

Conférence IBPSA France 2024 & Ecole thématique SIMUREX

PROCEEDINGS

La Rochelle – Ile d'Oléron, 13-17 mai 2024

Conference2024.ibpsa.fr

La conférence est organisée par le laboratoire LaSIE de La Rochelle Université au Campus universitaire de La Rochelle (le premier jour), puis à l'île d'Oléron au centre La Vieille Perrotine à Saint-Pierre d'Oléron. Le thème principal de la conférence est « les bâtiments de demain ». Les conférences IBPSA abordent tous les aspects de la modélisation, de la simulation et de la métrologie des bâtiments et des systèmes associés.



- Conférences plénières
- Liste des auteurs et des titres
- Table des matières & articles

Conférences plénières IBPSA France 2024

Conférence plénière n°1

« *De la conception bioclimatique à l'architecture* » par Clément Gaillard, Bureau d'études Freio

Cette conférence présente pourquoi certains architectes, ingénieurs et bricoleurs ont choisi de concevoir leur habitation en fonction du climat durant les années 1970. Bien qu'ils aient été préoccupés par les enjeux d'économie d'énergie après le premier choc pétrolier, leur motivation centrale était d'abord de vivre en accord avec le climat dans lequel ils habitaient. Ces concepteurs ont contribué à structurer la conception bioclimatique et à populariser l'architecture vernaculaire, qui connaissent tous deux un regain d'intérêt aujourd'hui sous l'impulsion des démarches dites "low-tech" en architecture et en urbanisme. À partir de leurs témoignages, l'idée est de montrer qu'il est possible d'imaginer des stratégies d'adaptation au changement climatique et des pistes pour rendre plus désirable l'évolution vers des modes de vie en accord avec les écosystèmes et les grands cycles climatiques.

Conférence plénière n°2

« *Modélisation de la qualité de l'air intérieur : enjeux et analogies avec les transferts thermiques* » par Patrice Blondeau, La Rochelle Université - LaSIE

La qualité de l'air intérieur (QAI) constitue une problématique environnementale majeure de par son impact sur la santé publique, son influence démontrée sur la productivité au travail et l'apprentissage scolaire, et son coût socio-économique qui s'élèverait en France à 19 milliards d'euros d'après l'ANSES. À l'image de ce que représente aujourd'hui la simulation thermique dynamique dans le domaine de l'énergétique, la modélisation des concentrations intérieures en polluants apparaît comme un outil incontournable pour concevoir des bâtiments sains. Après une présentation des enjeux et des verrous à lever pour tendre vers des outils numériques suffisamment génériques pour répondre à cet objectif, l'exposé s'attachera à mettre en avant les couplages et les analogies qui existent entre transferts de chaleur, d'humidité et de polluants dans les bâtiments. L'intérêt de recourir à la modélisation de la qualité de l'air intérieur pour développer ou caractériser des solutions qui concilient les préoccupations sanitaires, énergétiques et de confort dans les bâtiments sera également illustré par quelques exemples.

Conférence plénière n°3

« *La Base de Données Nationale des Bâtiments* » par Mathieu Thorel, CSTB

La Base de Données Nationale des Bâtiments (BDNB) est une base de données géoréférencées centralisant les données de plus de 30 bases publiques sur près de 32 millions de bâtiments dans l'hexagone. Des méthodes de croisements de données, de prédiction de données manquantes et de simulations (énergétiques, ACV environnementales, économie circulaire) ont été développées et incorporées à différentes applications métiers. Le CSTB travaille à faire de la BDNB la référence publique, avec son large socle open data, son ouverture méthodologique et technique, afin de faciliter sa réutilisation et se voir doter d'améliorations utiles pour la communauté. La documentation s'enrichit continuellement, une API existe, un site internet ainsi qu'un dépôt sur data.gouv.fr. Nous avons hâte de vous partager les actualités autour de ce produit, et de multiplier les formats d'exports vers vos outils de simulations préférés

Auteurs	Titre
Abboud, Charbel ; Parison, Sophie ; Filaine, Frédéric ; Hendel, Martin ; Royon, Laurent	Revêtements urbains frais pour l'adaptation de Paris aux canicules
Al Akkari, Noura ; Lespinats, Sylvain ; Fouquier, Aurélie	Parallel Between Water Disaggregation And Knapsack Problem
Alvarez Del Castillon Cardoso Estefania ; Ploix Stephane ; Reignier Patrick	Un système d'annotations sémantiques pour impliquer les occupants d'habitation dans une plus grande sobriété énergétique
Aridi, Mona ; Pannier, Marie-Lise ; Aridi, Rima ; Lemenand, Thierry	Evaluating Environmental Impacts of Domestic Heat Pumps: A Review through Life Cycle Assessment
Bakkour, Amer ; Ouldboukhitine, Salah-Eddine ; Biwole, Pascal ; Amziane, Sofiane	Évaluation des performances hygrothermiques des murs en béton de bois sous divers climats
Bascaules, Julie ; Marc, Olivier ; Adelard, Laetitia ; Maalouf, Chadi ; Caillet, Héléne	Perspectives et opportunités pour le développement d'un isolant biosourcé à base de fibres de choca et de plâtre recyclé.
Benakcha, Younes ; Labat, Matthieu ; Hazyuk, Ion ; Ginestet, Stephane ; Vitáloš, Michal	Modélisation dynamique d'une piscine couverte et de ses équipements: comparaison entre TRNSYS et Dymola
Benali, Fatima Zohra ; Robillart, Maxime ; Mora, Laurent ; Recht, Thomas ; Jamma, Mustapha ; Aketouane, Zakaria ; Brassier, Pascale ; Wurtz, Frédéric	Pilotage optimal des usages électriques flexibles d'un bâtiment tertiaire avec une production photovoltaïque locale utilisant l'outil OMEGAlpes
Benariba Mohammed Yacine ; Tran Le Anh Dung ; Nguyen Dang Mao ; Douzane Omar ; Promis Geoffrey	Caractérisation des propriétés thermiques de granulats de miscanthus pour la construction
Benariba, Mohammed Yacine ; Tran Le, Anh Dung ; Nguyen, Dang Mao ; Promis, Geoffrey	Revue analytique de l'influence de la microstructure sur les propriétés chimiques, physiques et thermiques de granulats végétaux
Bogdan Mateusz ; Walther Edouard ; Hubert Antoine	La distribution de Weibull, un outil utile ou dépassé ? Application au confort au vent
Boulinguez Maxime ; Castaing-Lasvignottes Jean ; Fouquier Aurélie	Pilotage des systèmes en rafraîchissement mixte centré sur le confort: une étude de sensibilité du modèle de Gagge pour une application en climat tropical
Boulmaiz, Fateh ; Reignier, Patrick ; Ploix, Stephane	Approche sans modèle basée sur le raisonnement à partir de cas pour la gestion d'énergie dans l'espace habité
Bourquin, Léo ; Bouquerel, Mathias ; Duforestel, Thierry ; Bozonnet, Emmanuel	Intégration d'un modèle de microclimat méso-échelle dans une plateforme d'énergétique du bâtiment à l'échelle quartier
Boutayeb, Zineb ; Labat, Matthieu ; Oms, Claire ; Ginestet, Stéphane	Analyse multi-échelles de l'influence de l'inertie thermique des parois opaques sur le confort d'été d'un logement
Breteau Antoine ; Salagnac Patrick ; Caous Jean-Marie ; Bozonnet Emmanuel	Performances des systèmes adiabatiques directs pour des locaux industriels pour différentes localisations en climats futurs
Bryk Alexandre ; Bozonnet Emmanuel ; Kyriakodis Georgios ; Riederer Peter	Etude du potentiel de rafraîchissement d'un quartier méditerranéen par ventilation naturelle avec un modèle couplé de microclimat et de bâtiment multizone
Cabezas-Rivière Enzo ; Robillart Maxime ; Recht Thomas ; Barlet Aline ; Sebastian Patrick	Feedbacks personnalisés : conception et évaluation de leur impact dans le processus de changement de comportement. Application au chauffage domestique
Campagna Kevin ; Fouquier Aurélie ; Machard Anaïs ; Charlier Dorothée ; Woloszyn Monika	Analyse et modélisation des interactions des occupants avec les fenêtres dans les chambres des logements français durant l'été
Chaumont, Maxime ; Filaine, Frédéric ; Hendel, Martin ; Royon, Laurent	Comportement thermo-climatique de toitures : impacts de l'isolant thermique, de la réflectivité et de l'arrosage sur l'échauffement urbain
Chouman Ali ; Riederer Peter ; Wurtz Frédéric	Evaluation methodology of Model Predictive Controllers for building's energy systems
Chouman, Ali ; Riederer, Peter ; Wurtz, Frédéric ; Grover-Silva, Etta ; Garreau, Enora ; Shahid, Muhammad Salman	Thermal modeling and calibration of Greener building in Grenoble
Colinart Thibaut ; Capp Maxime ; Nguyen Chi-Kien ; Duranona Unai	Évaluation de l'impact des matériaux bio/géosourcés sur le confort thermique d'été
Combes Lisa ; Walther Edouard	Inertie des isolants : mythe ou réalité ?
David, Damien ; Revol, Solène	Un modèle physique pour la prédiction de la hauteur de couche limite nocturne dans Urban Weather Generator
Derai, Ali ; Woloszyn, Monika ; Piot, Amandine ; Berrah, Lamia	Potentiel solaire exploité par un bâtiment : Évaluation des composantes actives et passives de son enveloppe
Dugué, Antoine ; Durand Estebe, Baptiste ; Frédérique, David ; Lafrechoux, Jérôme ; Bourreau, Pierre	Outil web paramétrique pour la rénovation de bâtiments résidentiels à destination des preneurs de décision
Duranona Unai ; Nguyen Chi-Kien ; Herbet Hans	Experimental comparison between earthen-based and conventional building systems: hygrothermal behavior and thermal inertia
El Assaad Machhour ; Colinart Thibaut ; Lecompte Thibaut	Impact des transferts d'humidité sur la performance énergétique d'une paroi en terre allégée
El Khoueiry, Dolly ; Maalouf, Chadi ; Moussa, Tala ; Piot, Amandine ; Bliard, Christophe ; Wurtz, Etienne	Isolant biosourcé : Etat de l'art sur le Miscanthus
Ferrari, Jérôme ; Wurtz, Frédéric ; Delinchant, Benoit ; Bovet, Anaïs ; Boisseau, Christophe ; Llerena, Daniel	Observation et analyse des mécanismes expérimentaux impliquant la récupération des données de consommation issues du compteur Linky : des expériences Etudelec à xKy
Ghiaus, Christian	dm4bem : Modèles dynamiques pour le développement des algorithmes de contrôle-commande
Goessel, Thibault ; Ligier, Simon ; Aublet-Mailhac, Adélaïde ; Girard, Robin	Holistic and forward-looking methodology for multi-criteria optimization of building energy renovation
Guyomard, Hugo ; Dugue, Antoine ; Hubert, Tessa ; Durand-Estebe, Baptiste ; Tanneau, Ewen ; Lacanette, Delphine	Conception paramétrique de rénovation par rajout de façade double peau avec évaluation multicritère
Hannad, Ayoub ; Godon, Alain ; Mercier, Franck ; Dematteo, Charline ; Chehouani, Hassan ; Pannier, Marie-Lise	Detecting CO2 anomalies using machine learning: case study of a library
Hodencq, Sacha ; Guimbretiere, Guillaume ; Laurent, Emmanuel	Low-Tech et énergie : une manière de repenser nos conceptions et usages énergétiques
Hoyet Valentin ; Robillart Maxime ; Pannier Marie-Lise	Collecte de données multi-paramètres dans des logements : une base de données exhaustive pour l'évaluation du confort intérieur
Huynh Minh Phuong ; Recht Thomas ; Mora Laurent	A methodology to detect changes in energy-consuming practices of residential occupants
Ibrahim, Mahdi ; Biwole, Pascal ; Ouldboukhitine, Salah ; Harkouss, Fatima ; Fardoun, Farouk	Hyperparameter optimization of artificial neural network in building energy retrofitting
Juricic Sarah ; Lahlou Fadi ; Thébault Simon ; Challanonnex Arnaud	Conditions de validité pour l'inférence d'une performance globale d'enveloppe de bâtiment à logements collectifs à partir d'une mesure par échantillonnage
Juricic Sarah ; Thebault Simon ; Challanonnex Arnaud ; Schalbart Patrick	Influence des flux mitoyens sur la précision d'une mesure Sereine du coefficient de transmission thermique d'un appartement seul
Kamara, James ; Filaine, Frédéric ; Grados, Arnaud ; Fillaoui, Nassim ; Chaix, Basile ; Bigorgne, Julien ; Hendel, Martin ; Royon, Laurent	Mesure mobile participative du stress thermique dans le Grand Paris
Khazaar Khaled ; Roux Charlotte ; Peuportier Bruno ; Schalbart Patrick	Intégration des limites planétaires dans l'ACV des bâtiments et des quartiers
Kraiem, Samy ; Machard, Anaïs	Sélection d'une vague de chaleur dimensionnante pour l'adaptation du bâtiment au changement climatique
Lahaye, Valentin ; Bonhomme, Marion ; Oms, Claire ; Dupont, Nicolas ; Ginestet, Stéphane	Influence des propriétés radiatives des revêtements intérieurs sur le confort thermique estival des occupants
Leconte, Antoine ; Winkler, Jean-Gabriel ; Ouvrier-Bonnaz, Ophélie	Vers la sobriété énergétique des bâtiments tertiaires : influence de différents paramètres de gestion sur la consommation énergétique et le confort des écoles et bureaux en France
Ling Haicheng ; Massé Pierre-Yves ; Rihet Thibault ; Wurtz Frédéric	Appliance Level Coordination through Nudges to Improve Self-Consumption in a Energy Community

Auteurs	Titre
Loubani, Rana ; Defer, Didier ; Alhajhasan, Ola ; Chamoin, Julien	Stratégie prédictive pour l'optimisation du contrôle d'un système de chauffage à eau chaude d'un bâtiment
Lucas, Franck ; Bozonnet, Emmanuel ; Boulic, Mikael ; Lodzinski, Virgile	Projet TROPIC pour l'étude du rafraîchissement passif des écoles polynésiennes dans un contexte de changement climatique : confort thermique, qualité de l'air, santé cognitive et réduction des consommations électriques
Maratier Julien ; David Damien ; Johannes Kevyn ; Ciuperca Gabriela	Plateforme pour l'étude de la vulnérabilité des logements et de leurs occupants face aux futures vagues de chaleur
Martinez Simon ; Rendu Manon ; Brangeon Boris ; Bozonnet Emmanuel	Modèle de données urbain pour l'étude de la surchauffe des quartiers
Merlier, Lucie ; Rodler, Auline ; Gresse, Teddy ; Soriano, Julie ; Sondaz, Célia ; Barone, Flavia ; David, Damien ; Kuznik, Frédéric ; Moujalled, Bassam ; Musy, Marjorie ; Roupioz,	Réflexions sur la définition d'une démarche de validation expérimentale des modèles thermo-hygro-aérauliques urbains couplés intérieur/extérieur pour l'étude du confort et de la santé des personnes en période de forte chaleur
Merville Alexandre ; Rodler Auline ; Leduc Thomas ; Musy Marjorie ; Rouchier Simon	Création d'une typologie de surfaces urbaines basée sur des paramètres morpho-climatiques
Moulouel, Rafik ; Houvin, Maxime ; Borel, Pascal ; Abadie, Marc ; Salagnac, Patrick	Développement d'un moyen d'essai pour l'étude du comportement thermo- aéraulique d'un local électrique
Musa, Mohammed Umar ; Biwole, Pascal Henry ; Labbe, André	Experimental validation of multi-3DPTV on the dispersin of a single unobstructed cough jet in indoor space
Nasser, Hadi ; Perrin, Guillaume ; Waeytens, Julien ; Chakir, Rachida ; Demeyer, Séverine	Approches multi-fidélité et problèmes inverses pour l'identification in-situ de la résistance thermique de parois de bâtiment
Omoya Tosin ; Bruneau Denis ; Recht Thomas ; Barlet Aline	Modeling-Experimental Methodology for Estimating the Psychological Adaptive Component of Occupants' Perceived Comfort
Osonuga, Seun ; Chouman, Ali ; Shahid, Muhammad Salman ; Delinchant, Benoit ; Wurtz, Frederic	PREDIS-MHI Data: Thermal readings from a section of a sub-metered tertiary multi-use building
Pedraza Aguirre, Paula Alejandra ; Jay, Arnaud ; Woloszyn, Monika ; Wurtz, Etienne	Methodology for a Techno-Economic Evaluation of Heating & Solar Solution Packages in the Context of Energy as a Service – A Case Study
Rit Martin ; Garreau Enora ; Thorel Mathieu ; Villot Jonathan ; Girard Robin	Optimiser les stratégies de rénovation des bâtiments résidentiels à l'échelle territoriale : analyse des plans climats de différentes villes
Roux Jean-Jacques ; Kuznik Frédéric	STD : Etat de l'art et bon usage des modèles des ponts thermiques et des parois hétérogènes 3D
Ruiz Margot ; Masson Valéry ; Bonhomme Marion ; Malagoli Marina ; Ginestet Stéphane	Intégration du comportement hygrothermique des parois dans un modèle de climat urbain : cas du centre-ville historique de Cahors
Sauvageon Alexis	Facing Wind-Driven Rain: Forecasting Fare System Resilience through Épône Train Station's Example
Schreck Cédric ; Fouquier Aurélie ; Rouchier Simon ; Wurtz Etienne	Ventilation naturelle par ouverture de fenêtre : analyse d'incertitude et de sensibilité dynamique du taux de renouvellement d'air dans le cas d'un bâtiment résidentiel
Sondaz, Célia ; Merlier, Lucie ; Harpet, Claire ; Kuznik, Frédéric	Simulation thermo-hydrigue dynamique de bâtiment et modèle thermo-physiologique : Adaptation et paramétrage pour l'étude des effets des surchauffes urbaines sur la santé
Striegel Lucas ; Walther Edouard ; Bouvenot Jean-Baptiste ; Nowamooz Hossein	Numerical study of a geothermal rainwater tank for buildings passive cooling
Thébault Simon ; Humbert Myriam	Programme Diane : Retour d'expérience sur les niveaux de déperditions thermiques mesurées en maison neuve avec la méthode ISABELE
Toesca, Adrien ; Machard, Anaïs ; Gervasi, Pierrick ; Partenay, Vincent ; Reynier, Laurent ; Kyriakodis, Georgios	Analyse comparative de solutions pour améliorer le confort thermique d'un bâtiment résidentiel neuf en climats futurs tout en limitant l'impact carbone
Twum-Duah, Nana Kofi ; Fito, Jaume ; Hodencq, Sacha ; Wurtz, Frédéric ; Delinchant, Benoit ; Debray, Francois	Towards a Digital Twin of Grenoble-Presqu'île: A Framework for District-Scale Digital Twin Development
Valizadeh, Mohammad ; Laporte-Chabasse, Quentin ; Cordeiro Mendonça, Kátia ; Bar-Hen, Avner ; Cormier, Pierre-Antoine	Calibration bayésienne du modèle d'un bâtiment d'enseignement : Une étude préliminaire
Wagner, Alexis ; Ruellan, Marie ; Bourdais, Romain	Archétypes de profils d'occupation dans le résidentiel : entre emploi du temps et consommation énergétique
Walther Edouard ; Dumontaud William	The transient P.E.T comfort index : A Description and analysis of the physiological model
Walther, Edouard ; Bogdan, Mateusz	Contribution solaire au bilan thermique du corps humain : un modèle anisotropique simplifié
Wang Chunxiao ; Berthou Thomas ; Duplessis Bruno ; Peirano Eric ; Schetelat Pascal ; Riederer Peter	Advancing Urban Building Energy Model Validation: A Comprehensive Multi-period Approach for Dynamic Outputs
Wurtz Aurore ; Recht Thomas ; Mora Laurent	Application d'une méthodologie d'évaluation environnementale adaptée à un projet d'aménagement urbain
Wyttenbach, Joël ; Boulier, Louison	Parametric study regarding thermochemical heat storage for individual houses

Abboud-revetements	5
AlAkkari-parallel	13
Alvarez-systemes	21
Aridi-evaluating	29
Bakkour-evaluation	37
Bascaules-perspectives	47
Benakcha-modelisation	55
Benali-pilotage	63
Benariba-caracterisation	71
Benariba-revue	79
Bogdan-weibull	91
Boulier-parametric	101
Boulinguez-pilotage	109
Boulmaiz-approche	117
Bourquin-integration	125
Boutayeb-analyse	133
Breteau-performances	141
Bryk-etude	149
CabezasRiviere-feedbacks	159
Campagna-analyse	167
Chouman-evaluation	175
Chouman-thermal	183
Colinart-evaluation	191
Combes-inertie	199
David-modele	209
Derai-potentiel	219
Dugue-outil	227
Duranona-experimental	235
ElAssaad-impact	243
ElKhoueiry-isolant	251

Ferrari-observation	259
Ghiaus-dm4bem	267
Goessel-holistic	275
Guyomart-conception	285
Hannad-detecting	293
Hodencq-lowtech	301
Hoyet-collecte	309
Huynh-methodology	317
Ibrahim-hyperparameter	325
Juricic-conditions	333
Juricic-influence	341
Kamara-mesure	349
Khazaal-integration	357
Kraiem-selection	365
Lahaye-influence	375
Leconte-sobriete	383
Ling-appliance	393
Loubani-strategie	405
Lucas-tropic	413
Maratier-plateforme	421
Martinez-modele	431
Merlier-reflexions	439
Merville-creation	447
Moulouel-developpement	455
Musa-experimental	463
Nasser-approches	471
Omoya-modeling	479
Osonuga-predis	489
Pedraza-methodology	497
Rit-optimiser	505

Roux-std	513
Ruiz-integration	521
Sauvageon-facing	529
Schreck-ventilation	539
Sondaz-simulation	547
Striegel-numerical	555
Thebault-diane	565
Toesca-analyse	573
TwunDuah-towards	583
Valizadeh-analyse	591
Wagner-archetypes	599
Walther-contribution	613
Walther-transient	621
Wang-advancing	631
Wurtz-applications	641

Revêtements urbains frais pour l'adaptation de Paris aux canicules

Charbel Abboud*^{1,3}, Sophie Parison¹, Frédéric Filaine¹, Martin Hendel^{1,2}, Laurent Royon¹

¹ Université Paris Cité, LIED, UMR 8236, CNRS, 75013, Paris.

² Université Gustave Eiffel, ESIEE Paris, département SEED, F-93162, Noisy-le-Grand, France.

³ Ville de Paris, Direction de la Voirie et des Déplacements (DVD), 75013, Paris.

Ville de Paris, Direction de la Transition Ecologique et de Climat (DTEC), 75013, Paris.

*charbel.abboud@paris.fr

RESUME.

L'objectif de cette étude est de comparer les contributions microclimatiques de différents matériaux de voirie lorsqu'ils sont soumis à des conditions caniculaires. Pour se faire, un site expérimental à Bonneuil-sur-Marne (94) a été aménagé en 16 alvéoles différentes, dont les propriétés radiatives ont été caractérisées. Les alvéoles sont instrumentées en surface et en profondeur de thermo-fluxmètres permettant ainsi de mesurer les différents termes du bilan thermique de surface et le flux de chaleur qui pénètre plus en profondeur. Les résultats montrent que les pelouses et pavés bois échauffent l'air en journée, mais le refroidissent la nuit et donc contribuent à limiter le phénomène d'ICU. Parmi les revêtements minéraux, les plus réfléchissants ont la même contribution à l'ICU, mais leur radiativité importante peut dégrader le stress thermique du piéton en journée.

MOTS-CLÉS : revêtements urbains, stress thermique, îlot de chaleur urbain (ICU).

ABSTRACT.

The aim of this communication is to evaluate and compare the microclimatic contributions of different urban pavements during intense heat. To this aim, an experimental site located at Bonneuil-sur-Marne (94) in France with 16 samples is studied. The samples are composed of different urban materials with different thermal and radiative properties. In addition, all the samples are monitored with thermo-flowmeters at several depths. The results show that the lawn and wood-paver samples increase the convective contribution during the day but decrease it at night, thus contributing to limit the urban heat island (UHI) effect. Among the other samples, those with high reflectivity exhibit small convective contributions during the day and at night. However, their daytime radiosity is significantly higher and may thus degrade pedestrian heat stress.

KEYWORDS: urban pavements, heat budget, urban heat island (UHI).

1. INTRODUCTION

En raison du réchauffement climatique, les vagues de chaleur sont de plus en plus fréquentes, intenses et longues. En ville, la combinaison de ces vagues de chaleur et du phénomène d'îlot de chaleur urbain (ICU) entraîne une augmentation importante des besoins énergétiques et pose des problèmes sanitaires, notamment pour les personnes les plus fragiles [1]. Pour limiter ces conséquences néfastes, plusieurs municipalités dont la Ville de Paris étudient différentes stratégies de rafraîchissement qui pourraient être appliquées dans l'espace public [2-4] comme par exemple l'arrosage ou la végétalisation des différentes facettes urbaines. Une autre solution consiste à déployer des nouveaux matériaux de voirie « frais » pour remplacer les matériaux classiques imperméables, dense et à faible albédo. [5-7].

Effectivement, les matériaux de voirie classiques absorbent et stockent une partie importante de l'énergie contenue dans le rayonnement solaire pendant la journée qu'ils restituent la nuit sous forme de chaleur. C'est l'une des raisons pour lesquelles les températures nocturnes restent importantes en ville contrairement au milieu naturel [8]. Bien que plusieurs études en rapport avec le comportement thermique et microclimatique des matériaux de voirie classiques ou frais existent dans la littérature [9-11], il est souvent difficile de comparer les différents résultats tant les conditions climatiques et l'environnement du lieu d'expérimentation diffèrent au sein d'une même étude ou d'une étude à l'autre. Cette étude propose donc, à l'aide d'un site expérimental situé Bonneuil-sur-Marne, de comparer simultanément le comportement thermique et microclimatique de seize échantillons de voirie lors de journées estivales. Pour chacune des structures, des mesures de température et de flux de chaleur sont réalisées en surface et en profondeur permettant ainsi de quantifier les échanges d'énergie entre l'échantillon de voirie et le microclimat local. L'objectif final de l'étude est d'identifier les revêtements qui participent le moins à l'échauffement urbain lors des vagues de chaleur en fonction de leurs propriétés radiatives et de leurs propriétés thermiques.

2. MATERIEL ET METHODES

2.1. SITE D'EXPERIMENTATION ET MATERIEL

Le site d'expérimentation (Bonneuil-sur-Marne, 94) comprend 16 alvéoles de 4,25 m de longueur, 3,95 m de largeur et 30 cm de profondeur (Figure 1). Chaque alvéole est composée d'une structure de voirie constituée de plusieurs couches de matériaux et vérifiant les prescriptions de la Ville de Paris.



Figure 1 : Photographie du site expérimental et de son instrumentation (à gauche) Bilan thermique et grandeurs mesurées (en noir) et calculées (en bleu) (à droite).

Chaque alvéole est instrumentée en surface et en profondeur de thermo-fluxmètres de type T de 10 cm de côté placés au centre. Ces capteurs mesurent une température (T_z) et une densité de flux thermique (Φ_z). En profondeur ($z \neq 0$), cette densité de flux est égale à la densité de flux conductif (V_z) au sein de l'alvéole. Le Tableau 1 détaille la composition et l'instrumentation de chaque structure. Dans cet article, on ne s'intéressera qu'au bilan thermique de surface. Dans les analyses, les alvéoles sont regroupées selon leur perméabilité et de leur albédo par rapport à la valeur de 0,4. On obtient 3 catégories : perméable à faible albédo, imperméable à albédo faible ou élevé. A défaut d'une mesure in situ, la perméabilité des structures est prise comme indicateur de leur inertie thermique.

Le site expérimental est également équipé d'une station météorologique qui mesure la température de l'air, l'humidité relative, le rayonnement incident (courte et grande longueur d'onde) et la vitesse du vent. Les données sont enregistrées toutes les cinq minutes.

#	Nom de l'échantillon/alvéole	Albédo	Emissivité	Perméable
1	Pavés enherbés arrosés	0,22	0,92	Oui
2	Pelouse arrosée	0,20	0,97	Oui
3	Enrobé 1	0,24	0,95	Oui
4	Enrobé 2	0,30	0,95	Oui
5	Dalle CERIB compo 5	0,50	0,95	Non
6	Pelouse	0,20	0,97	Non
7	Asphalte	0,18	0,95	Non
8	Peinture théolaur	0,55	0,95	Non
9	Pavé en bois	0,23	0,90	Non
10	Asphalte peinture LMC	0,68	0,95	Non
11	Enrobé 3	0,35	0,95	Oui
12	Béton	0,47	0,95	Non
13	Dalle CERIB	0,27	0,95	Non
14	Dalle granit	0,34	0,93	Non
15	Asphalte clair	0,45	0,95	Non
16	Asphalte PIR	0,47	0,88	Non

Tableau 1 : Numéro de l'alvéole, Nom de l'échantillon/alvéole, albédo, émissivité et perméabilité.

2.2. PERIODE D'EXPERIMENTATION

L'étude se focalise sur des journées radiatives chaudes, c'est-à-dire dont la couverture nuageuse est inférieure à 3 octas, la vitesse du vent à 3m.s^{-1} et où les températures minimales et maximales sont respectivement supérieures à 16°C et à 25°C . Les journées retenues pour cette étude sont celles du 15 au 18 juin 2022. L'évolution de la température de l'air et de l'humidité relative durant ces quatre journées d'expérimentation sont représentées Figure 2.

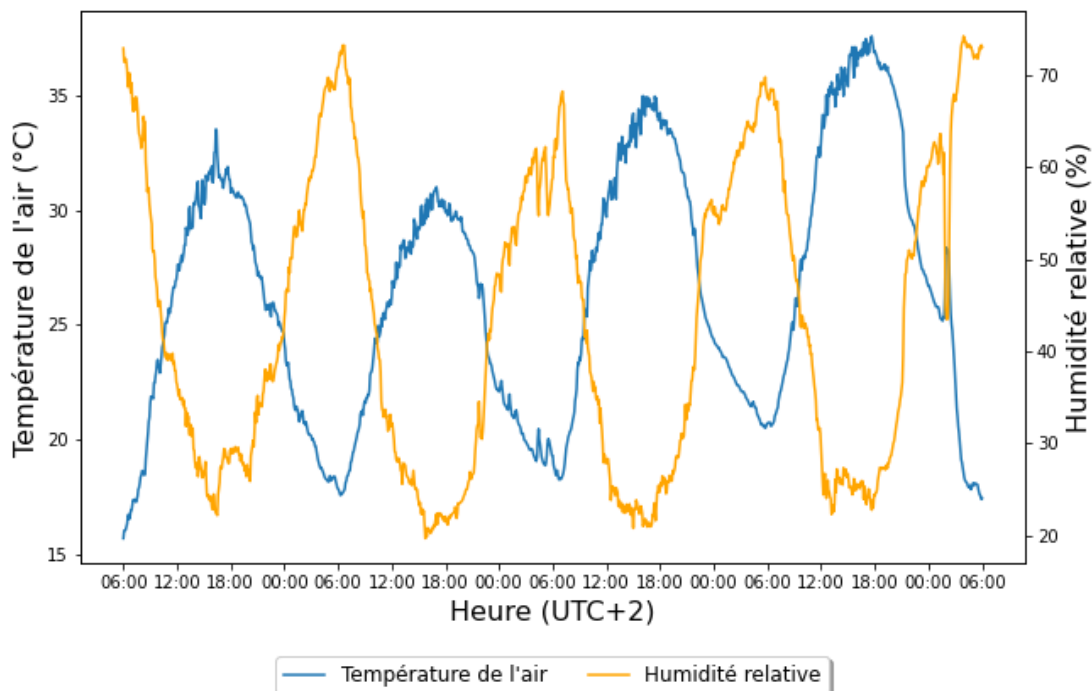


Figure 2 : Température de l'air T_a et humidité relative HR du 15 au 18 juin 2022

2.3. BILAN THERMIQUE DE SURFACE

Le bilan thermique de surface de chacune des alvéoles peut s'écrire de la façon suivante :

$$S + L = S_{up} + L_{up} + H + V_0 + IE \quad (1)$$

Avec S le rayonnement incident courte longueur d'onde (0.3-3 μ m), L le rayonnement incident grande longueur d'onde (3-100 μ m), S_{up} et L_{up} la radiosité courte et grande longueur d'onde, H les échanges convectifs entre la surface et l'atmosphère, V_0 le flux de chaleur absorbée par la surface et IE le flux rafraîchissant dû à l'évaporation de l'eau (pour les alvéoles arrosées ou celles composées de végétaux).

Les indicateurs suivis seront la convection atmosphérique H qui contribue à échauffer l'air ambiant et la radiosité S_{up} et L_{up} qui impacte directement le stress thermique des piétons en agissant notamment sur la température moyenne radiante. La convection est proportionnelle à la différence de température entre l'air et la surface, tandis que la radiosité dépend de l'albédo (le jour) et de la température de surface.

Le rayonnement incident total ($S+L$) est mesuré par la station de référence et l'albédo (α) est mesuré à l'aide d'un albedomètre tandis que l'émissivité (ϵ) est tirée de la littérature scientifique [15]. A partir de ces mesures il est possible de déterminer la radiosité courte et grande longueur d'onde (équations 2 et 3). Les mesures des capteurs de surface de l'ensemble des alvéoles sont analysées au regard de la différence entre T_s et T_{air} pour déterminer un coefficient d'échange convectif h moyen valable pour tous les échantillons. A partir de ce coefficient et des températures de surface et d'air, les échanges convectifs moyens sont obtenus pour chaque échantillon (équation 4).

$$S_{up} = \alpha S \quad (2)$$

$$L_{up} = (1 - \epsilon)L + \epsilon\sigma T_s^4 \quad (3)$$

$$H = h(T_s - T_a) \quad (4)$$

avec σ la constante de Stefan Boltzmann

Le thermofluxmètre en surface mesure :

$$\Phi_0 = \epsilon_{capteur}(S + L - \sigma T_0^4) - H \text{ pour } z=0 \quad (5)$$

avec $\epsilon_{capteur} = 0,95$ (sachant que $\alpha_{capteur} = 0,05$).

3. RESULTATS

3.1. CONVECTION ATMOSPHERIQUE

La Figure 3 illustre l'évolution des échanges convectifs entre les alvéoles et l'atmosphère au cours des quatre jours d'expérimentation. En journée, peu importe le revêtement, les échanges convectifs décrivent une courbe en cloche relativement identique à celle de la courbe d'ensoleillement. On observe des différences importantes entre les structures de faible albédo et celles dont l'albédo est élevé. Peu importe la perméabilité, lorsque l'albédo est inférieur à 0,4 les échanges convectifs sont compris entre 200 et 350 W/m² alors que pour les revêtements dont l'albédo est supérieur à 0,4 ils ne dépassent pas les 200 W/m². En effet, lorsque la réflectivité solaire est élevée, une partie importante du rayonnement solaire est réfléchi par la surface permettant ainsi de limiter son échauffement. On note une exception, celle des pavés arrosés. Dans ce cas, une partie des apports solaires sont consacrés à l'évaporation de l'eau ce qui permet de limiter l'échauffement de la surface et donc les échanges convectifs. On constate également l'impact de l'arrosage lorsque l'on compare la pelouse sèche à celle arrosée. On remarque aussi que les échanges convectifs sont plus importants pour les alvéoles composées de matière végétale (pelouse et pavés bois) comparés à celles composées de matière minérale. Comme la conductivité

thermique des alvéoles végétales est faible, la chaleur n'est pas conduite dans les couches profondes de l'alvéole. Finalement, l'accumulation de la chaleur proche de la surface entraîne un échauffement important de cette dernière, et donc des échanges convectifs conséquents.

La nuit, les échanges convectifs sont nuls ou légèrement positifs pour les alvéoles minérales sauf pour la n°10 (très légèrement négatifs). Cela signifie que ces structures ne restituent pas ou peu de chaleur la nuit et qu'elles contribuent donc peu à l'échauffement urbain nocturne. Pour les alvéoles végétales, les échanges convectifs sont négatifs, elles contribuent à rafraîchir l'air ambiant la nuit.

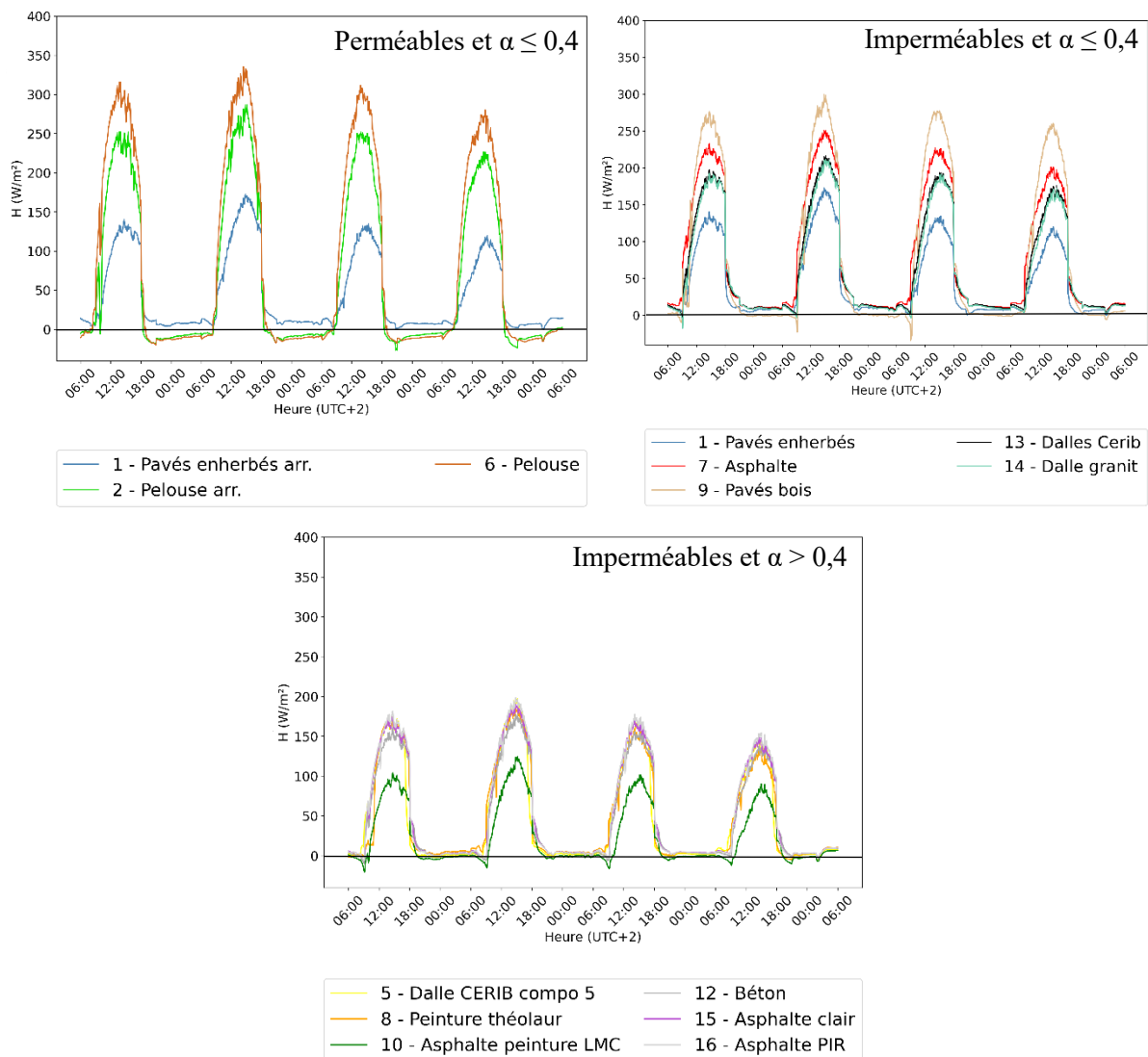


Figure 3 : Echanges convectifs des alvéoles perméables de faible albédo (en haut à gauche), imperméables de faible albédo (en haut à droite) et imperméables avec un albédo élevé (en bas).

Au cours des 4 journées de la vague de chaleur étudiée, on remarque que les échanges convectifs diminuent progressivement pour toutes les alvéoles. Cela tient au fait qu'au cours de la période, l'augmentation de la température de surface est moins rapide que celle la température de l'air, réduisant ainsi progressivement l'écart de température entre surface et air et donc les échanges convectifs.

Globalement, les variations fortes de la convection témoignent de la faible inertie des structures (n°2, 6 et 9), tandis que les faibles variations sont indicatrices d'une inertie plus forte. L'augmentation de

l'albédo tend à réduire la convection moyenne. On constate que le critère de perméabilité ne caractérise pas parfaitement l'inertie des structures (pavé bois ou pavés enherbés en particulier).

3.2. RADIOSITE

La Figure 4 illustre la radiosité des revêtements. En journée, cette grandeur est fortement influencée par l'albédo : les structures à faible albédo ont la radiosité diurne la plus faible. A l'inverse, les revêtements réfléchissants sont les plus défavorables en phase diurne du fait d'une radiosité nettement plus importante. En phase nocturne, les revêtements ayant l'inertie la plus faible (pelouses et pavés bois) ont une radiosité minimale (370 à 390 W/m²). En revanche, les revêtements dont l'inertie est importante (pavés enherbés, asphalté classique, dalles CERIB et dalle granit) ont une radiosité nocturne plus importante (410 à 420 W/m²). Les résultats montrent que la dalle granit se comporte comme les pavés bois en phase diurne, mais comme le trottoir asphalté classique la nuit. Par contre les pavés enherbés qui sont les plus frais en journée, sont les plus chauds durant la phase nocturne.

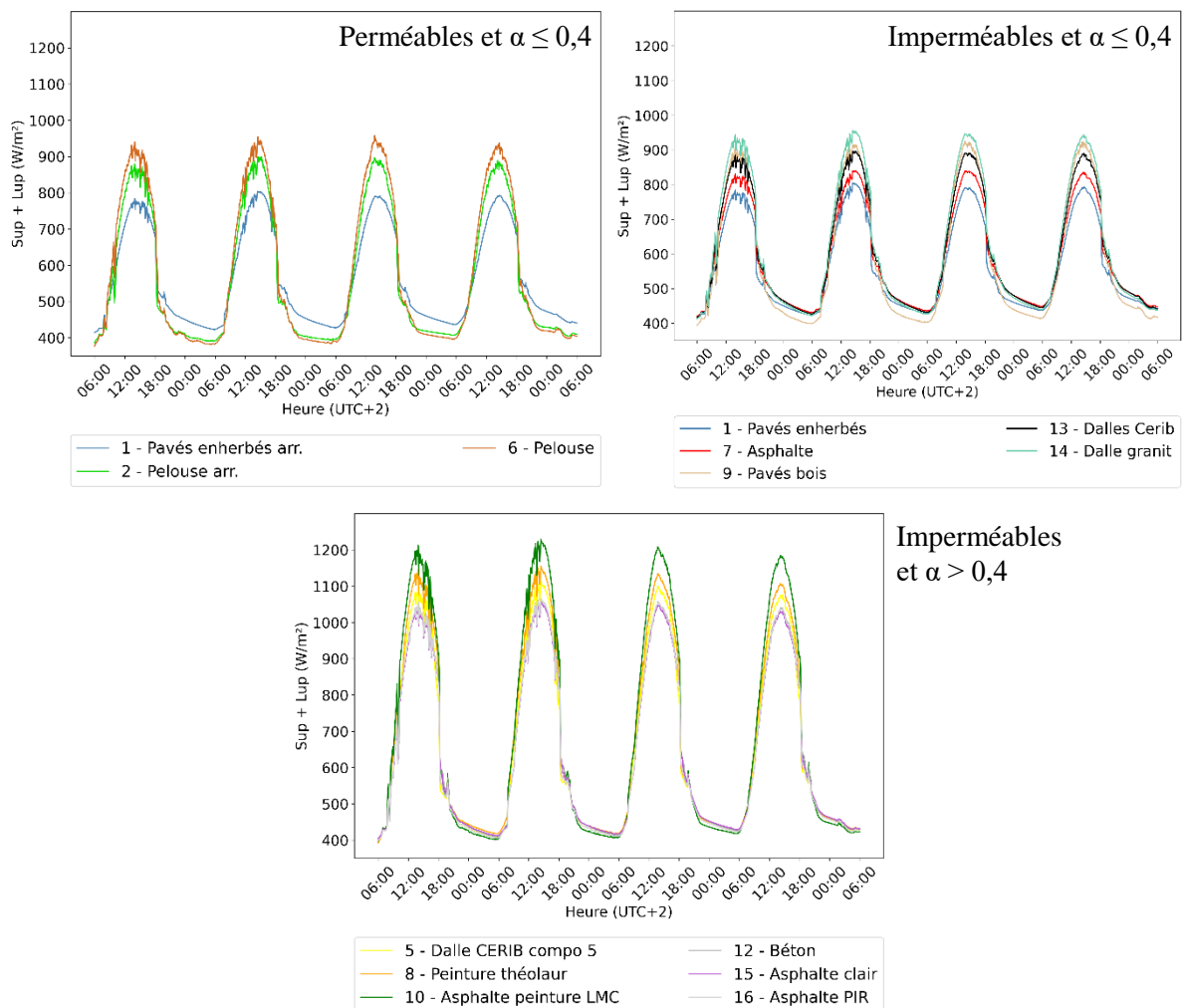


Figure 4 : Radiosité des structures perméables de faible albédo (en haut à gauche), imperméables de faible albédo (en haut à droite) et imperméables avec un albédo élevé (en bas).

Ces différences de radiosité sont indicatrices des différentes contributions des structures au stress thermique du piéton, en particulier à la température moyenne radiante. Pour autant, celle-ci dépend aussi des autres échanges radiatifs avec son environnement immédiat (facettes urbaines, voûte céleste, ...).

4. CONCLUSION

Cette étude expérimentale réalisée sur un démonstrateur a permis d'analyser la contribution microclimatique de différentes structures de trottoir du point de vue de l'échauffement de l'air et de la radiativité. Du point de vue de l'échauffement de l'air, les pelouses et les pavés en bois (n°2, 6 et 9), s'échauffent fortement en journée ce qui entraîne des échanges convectifs importants. En revanche, ce sont les seules alvéoles (à l'exception de la 10) dont les échanges convectifs sont négatifs la nuit : elles permettent donc de rafraîchir l'air localement et de limiter le phénomène d'ICU. Les structures imperméables et avec un albédo inférieur à 0,4 sont les revêtements de voirie les plus défavorables puisqu'elles participent à l'échauffement de l'air aussi bien le jour que la nuit. Elles contribuent donc à la formation de l'ICU. Les structures imperméables avec un albédo élevé sont les structures qui contribuent le moins à l'échauffement diurne et ne participent pas à l'échauffement nocturne (convection quasi-nulle). Elles contribuent peu ou pas à la formation de l'ICU.

Du point de vue de la radiativité, les revêtements à albédo élevé ont la radiativité la plus importante en journée, tandis que les revêtements à faible albédo et forte inertie ont la radiativité diurne la plus faible (Béton, Dalle CERIB, Asphalte PIR...), avec un écart de 200-300 W/m² environ. Même si la température moyenne radiante à un point donné ne dépend pas uniquement de la radiativité des revêtements, plusieurs travaux scientifiques relèvent un impact globalement défavorable sur le stress thermique diurne du piéton lors de la pose de revêtements à albédo élevé en raison de l'augmentation de leur radiativité diurne et de la température moyenne radiante [16-17]. La nuit, les structures à forte inertie (pavés enherbés, asphalte classique, dalles CERIB et dalle granit) ont les radiativités les plus élevées comparées aux structures à faible inertie (pelouses et pavés bois), mais les différences sont beaucoup plus faibles (environ 20-30 W/m²). Des simulations numériques ou des mesures de terrain en situation réelle permettraient de caractériser plus précisément l'importance de cette radiativité nocturne pour le stress thermique.

Il y a donc opposition entre limitation de l'échauffement atmosphérique (convection) et radiativité faible en journée en jouant uniquement sur l'albédo des revêtements. Les revêtements réfléchissants paraissent donc plus adaptés aux situations à faible fréquentation diurne. Les surfaces végétales et/ou humides permettent de limiter l'échauffement de l'air et la radiativité, mais nécessitent un arrosage. Les revêtements à faible inertie et faible albédo (pavé bois, pelouse arrosée ou non, ...) offrent un bon compromis, mais ne sont pas compatibles avec des situations de fort trafic (piéton ou routier). La mise en place d'un revêtement rafraîchissant, en particulier réfléchissant, nécessite de tenir compte de la fréquentation piétonne du lieu. Celle-ci n'est pas la même le jour (6h-18h), le soir (18h-minuit) et la nuit (minuit-6h). Si les deux premières périodes sont plutôt fréquentées et correspondent aux périodes d'ensoleillement ou de décharge des revêtements, la dernière est caractéristique de l'ICU.

5. BIBLIOGRAPHIE

[1] LEMONSU, A., KOUNKOU-ARNAUD, R., DESPLAT, J., SALAGNAC, J. L., et MASSON, V. Evolution of the Parisian urban climate under a global changing climate. *Climatic change*, 116(3), 679-692, (2013).

[2] PARISON, S., HENDEL, M., et ROYON, L. A statistical method for quantifying the field effects of urban heat island mitigation techniques. *Urban Climate*, 33, 100651, (2020).

- [3] HENDEL, M., GUTIERREZ, P., COLOMBERT, M., DIAB, Y., et ROYON, L. Measuring the effects of urban heat island mitigation techniques in the field: Application to the case of pavement-watering in Paris. *Urban Climate*, 16, 43-58, (2016)
- [4] CHAUMONT, M., PARISON, S., KOUNKOU-ARNAUD, R., LONG, F., BERNIK, A., DA SILVA, M., & HENDEL, M. “Tierce Forêt”: Greening a Parking Lot. 34rd Conference of the International Association of Climatology, Casablanca, Morocco, (2021).
- [5] SANTAMOURIS, M. Regulating the damaged thermostat of the cities—Status, impacts and mitigation challenges. *Energy and Buildings*, 91, 43-56, (2015).
- [6] BOWLER, D. E., BUYUNG-ALI, L., KNIGHT, T. M., et PULLIN, A. S. Urban greening to cool towns and cities: A systematic review of the empirical evidence. *Landscape and urban planning*, 97(3), 147-155, (2010).
- [7] GUO, X., et HENDEL, M. Urban water networks as an alternative source for district heating and emergency heat-wave cooling. *Energy*, 145, 79-87, (2018).
- [8] SANTAMOURIS, M., SYNNEFA, A., et KARLESSI, T. Using advanced cool materials in the urban built environment to mitigate heat islands and improve thermal comfort conditions. *Solar energy*, 85(12), 3085-3102, (2011).
- [9] AKBARI, H., et LEVINSON, R. (2008). Evolution of cool-roof standards in the US. *Advances in building energy research*, 2(1), 1-32, (2011).
- [10] DOYA, M., BOZONNET, E., et ALLARD, F. Experimental measurement of cool facades’ performance in a dense urban environment. *Energy and Buildings*, 55, 42-50, (2012).
- [11] WANG, C., WANG, Z. H., KALOUSH, K. E., et SHACAT, J. Cool pavements for urban heat island mitigation: A synthetic review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 146, 111171, (2021).
- [12] TAKEBAYASHI, H., et MORIYAMA, M. Study on surface heat budget of various pavements for urban heat island mitigation. *Advances in Materials Science and Engineering*, (2012).
- [13] LI, H., HARVEY, J., et KENDALL, A. Field measurement of albedo for different land cover materials and effects on thermal performance. *Building and environment*, 59, 536-546, (2013).
- [14] QIN, Y., et HILLER, J. E. Understanding pavement-surface energy balance and its implications on cool pavement development. *Energy and Buildings*, 85, 389-399, (2014).
- [15] PARISON, S., CHANIAL, M., FILAINE, F., & HENDEL, M. (2023). Surface heat budget of sixteen pavement samples on an experimental test site in the Parisian region. In *Roads and Airports Pavement Surface Characteristics* (pp. 857-866). CRC Press.
- [16] KARAM, G., CHANIAL, M., PARISON, S., HENDEL, M., & ROYON, L. (2022, July). Spatial Microclimatic Characterization of a Parisian “Oasis” Schoolyard. In *International Conference on Building Energy and Environment* (pp. 2957-2965). Singapore: Springer Nature Singapore.
- [17] ANDREEV, G., KUKOVKIN, A., & CHERNAYA, L. (1988). Albédo et indicatrices de diffusion des ondes millimétriques par des revêtements terrestres avec des irrégularités aléatoires. *Radiotekhnika i elektronika*, 33(7), 1352-1359.

Parallel Between Water Disaggregation And Knapsack Problem

Noura Al Akkari*^{1,2}, Sylvain Lespinats², Aurélie Fouquier²

¹Université Savoie Mont Blanc, Laboratoire de Mathématiques (LAMA), F-73375 Le Bourget-du-Lac, France

²Université Grenoble Alpes, INES, F-73375, Le Bourget du Lac, France

*noura.alakkari@cea.fr

RESUME. La gestion de la consommation d'eau est un aspect crucial de notre existence quotidienne. Le besoin de restreindre l'utilisation de l'eau se présente comme une nécessité fondamentale pour une gestion durable des ressources. Dans ce contexte, la désagrégation de la consommation d'eau émerge comme une stratégie prometteuse pour la conservation de l'eau. La désagrégation de la consommation d'eau implique la décomposition du débit global en appareils distincts. En décomposant le débit total en appareils individuels, les consommateurs peuvent surveiller leur consommation d'eau. Nous traçons un parallèle entre un problème d'optimisation - le problème du sac à dos - et l'identification des appareils consommateurs d'eau à partir des pics de débit. Nous utilisons des mesures d'évaluation des performances basées sur la précision, l'exactitude et la mesure F pour évaluer l'efficacité de notre approche par rapport aux techniques d'apprentissage automatique précédemment utilisées dans la revue de littérature telles que : la Machine à Vecteurs de Support (SVM) et le k-means. Les résultats montrent que les performances de l'algorithme non supervisé proposé sont comparables à celles de SVM, la méthode supervisée. Cependant, l'algorithme surpasse k-means, la technique non supervisée utilisée pour la désagrégation de l'eau.

MOTS-CLÉS : Désagrégation de l'eau, Problème du sac à dos, Machine à Vecteurs de Support(SVM), k-means

ABSTRACT. Managing water consumption is a crucial facet of our daily existence. The need to curtail water usage stands as a fundamental necessity for sustainable management of resources. Within this context, the disaggregation of water emerges as a promising strategy for water conservation. Water disaggregation involves the decomposition of the overall flowrate into distinct appliances. By breaking down the total flowrate into individual devices, consumers are able to monitor their water consumption. We draw a parallel between the knapsack problem -an optimization problem- and the identification of water consuming devices at each flowrate peak. We employ performance evaluation metrics based on precision, accuracy, and F-measure to evaluate the effectiveness of our approach compared to machine learning techniques previously used in the literature review such as: Support Vector Machine (SVM) and k-means. The results indicate that the performance of the proposed unsupervised algorithm is comparable with SVM, the supervised method, however it outperforms k-means, the unsupervised technique used for water disaggregation.

KEYWORDS : Water Disaggregation, Knapsack Problem, SVM, k-means

1. INTRODUCTION

It is essential to maintain a proper balance between water supply capacity and water demand considering the rapid population growth in Europe along with limited resources ('Population and Population Change Statistics', n.d). Water consumption in the residential sector accounts for a considerable amount of the overall water consumption (Du et al. 2022). This underscores the importance of managing residential water consumption where awareness alone, while crucial, is insufficient. Effective control and management of water consumption are highly needed. Water disaggregation, the

process of breaking down the total water consumption into its constituent end-uses, has been a subject of ongoing research due to its critical implications for water resource management. Water disaggregation techniques have seen significant evolution over the years. However, despite this progress, empirical comparisons among existing disaggregation algorithms remain challenging. The hurdles lie in the diverse measurements employed, the variability in datasets, the absence of reference implementations and the multitude of accuracy metrics used (Zaidi et al. 2018). Notably, prior research predominantly emphasized human-centric water consumption (toilet use, shower, sinks), often with datasets and code sources locked behind proprietary barriers making it impossible to trace and reproduce the work. Researchers have explored various methods, each with its own strengths and limitations (Zaidi et al. 2018). We begin with Rule-Based Approaches where predetermined rules attributed water consumption to specific end-uses. Such approaches make use of deterministic rules based on different parameters to classify water events into end-uses. For example, researchers used appliance specific rules to assign water consumption to specific appliances based on physical water use parameters like volume of water consumed, appliances flowrate and time of the day (Mazzoni et al. 2021). For instance, they allocate higher water consumption during specific times of the day, in the morning for showering or in the afternoon for cooking. Other researchers assigned a fixed percentage of total water consumption to different end-uses regardless of their actual usage patterns. For example, they allocate 30% to bathing, 20% to laundry, etc (Kowalski, and Marshallsay, 2003). Rule-Based approaches are straightforward and easy to implement however they do not capture the full complexity of individual water use behaviors because the percentage values of water consumption are fixed without accounting for the changes and variabilities that may occur during the period of the holidays as an example. In response to the limitations of Rule-Based approaches, researchers turned to machine learning and pattern recognition techniques. For instance, supervised learning methods, such as Support Vector Machines (SVM) and Neural Networks, learn patterns from labeled datasets, demonstrating improved accuracy in water disaggregation (Gourmelon et al. 2021). Features such as time of the day, weather conditions, and occupancy can be used to train SVM models to predict water end-uses. SVMs are effective in handling non-linear relationships in the data and can capture complex patterns (Vitter and Webber 2018). Moreover, Neural networks, particularly deep learning architectures, have shown promise in water disaggregation tasks (Vitter and Webber 2018). Random Forests are an ensemble learning method that can be applied to water disaggregation. They consist of multiple decision trees and can handle non-linear relationships, providing robust predictions. Random Forests have been used in capturing interactions between different features influencing water consumption (Oliveira-Esquerre et al. 2021). On the other side, unsupervised learning approaches like k-means can discover hidden patterns in the absence of labeled data. K-means clustering can be used to group similar water consumption patterns. These clusters can then be associated with specific end-uses (Zou, Zou, and Wang 2015). Additionally, ensemble methods, such as bagging and boosting, can combine multiple models (e.g., decision trees, SVMs) to enhance overall predictive performance. Ensemble methods are robust and can reduce overfitting, providing more reliable water disaggregation results (Lee and Derrible 2020). Machine learning techniques can adapt to diverse and complex patterns in water consumption data, offering improved accuracy compared to Rule-Based approaches, especially when trained on high-quality and representative datasets (Vašak, Banjac, and Novak 2015). However, there are still several challenges and limitations associated with machine learning techniques. Firstly, data quality and quantity play a pivotal role in model effectiveness, as the training data's accuracy and quantity directly impact model

bias and generalizability (Jain et al. 2020). Secondly, the scarcity of labeled data presents a hurdle, particularly in supervised learning methods like SVM and neural networks, due to the time-consuming and challenging nature of creating labeled datasets (Li et al. 2024). Thirdly, diverse water consumption patterns among households make it difficult to develop universally applicable models, limiting their generalization (Lee and Derrible 2020). Fourthly, certain black-box models, such as deep learning architectures, poses interpretability issues, crucial for user trust (Doshi-Velez and Kim 2017). In fact, the inner workings of deep learning architecture involve numerous layers of interconnected neurons making it difficult to trace how the input features contribute to the output and so difficult to interpret by users. Additionally, models may struggle to generalize to new scenarios or changing behaviors, especially when trained on historical data, limiting their applicability across regions and time periods. Finally, ensuring model robustness in the face of unexpected or outlier situations is imperative for real-world applications, necessitating strategies to address these challenges comprehensively (Zhang et al. 2017). Researchers and practitioners continue to work on addressing these challenges through advancements in data collection techniques, model development, and the exploration of hybrid approaches that combine Rule-Based methods with machine learning for improved water disaggregation (Mazzoni et al. 2021). This review sets the stage for current research, so we can introduce a novel approach—leveraging the knapsack problem for water disaggregation to handle the issues of rule-based approaches and machine learning techniques. The idea of the knapsack stems from recognizing that water disaggregation can be treated using optimization algorithm applied to solve the knapsack problem. This introduces new strategies for addressing water disaggregation. Also, the use of knapsack arises its unique attributes and the need for a more robust and versatile method to address limitations observed in existing approaches towards more generalizability.

2. MATERIAL AND METHODS

The water disaggregation methodology in this paper begins with Data Collection, we employ a public datasets of Italian households (Mazzoni et al. 2021). Following this, we conduct Data Preprocessing to prepare the data. Next, Peak Extraction task identifies peaks surpassing a predefined threshold, that is indicative of appliance activity. Finally, we draw parallels between the Knapsack Problem and water disaggregation and we take advantage on the method developed in this context for identifying the appliances or combination of appliances respective to each peak detected.

2.1. DATA COLLECTION

For this research work, we use a public dataset from an Italian residential house, including six water consumption profiles of appliances, a kitchen sink, a dishwasher, shower, bathtub, toilet and a washing machine (Mazzoni et al. 2021). Recorded over 2 months in 2018 (January and February) in Italy, the dataset shows flowrate variations in L/min, ranging from 0 to 14 L/min. Low flowrates (1-5 L/min) are typical for standard faucets or low flowrate cycles of dishwashers, while moderate flowrates (5-10 L/min) are common for showers. High flowrates (10-14 L/min) are associated with high-pressure showers or higher flowrate cycles of dishwashers and washing machines. Validation is done using another dataset from an Italian house, (Italian House 2), recorded over the same period in 2018 in Bologna, Italy ('Dati Statistici | I Numeri Di Bologna', n.d.).

2.2. DATA PREPROCESSING

We identify and remove outliers by employing the z-score method also known as standard score (Andrade 2021). The z-score essentially standardizes the data, transforming it into units of standard deviations from the mean. This standardization process normalizes the data, and in this way provides a standardized measure of how far each data point is from the mean of the distribution in terms of standard deviations (Andrade 2021). We calculate the z-score according to equation (1) for each data point and remove those that fall beyond a threshold (usually any z-score greater than 3 is considered an outlier). In this case, 1.7% of the dataset consists of outliers.

$$z = \frac{|x - \mu|}{\sigma} \quad (1)$$

Where x is the individual data point, μ is the mean of the dataset, σ is the standard deviation of the data.

2.3. PEAK EXTRACTION

Peaks in the signal represent deviations from surrounding values, indicating changes or transitions between appliances or different states of appliances. These changes are of particular interest in the time series data as it allows us to be informed on the use of appliances. We call deviations all values that exceed a background threshold (in our case, a value of 0.5 L/min) of water consumption. Estimating a background value involves identifying a baseline or reference level for comparison. This is done by visually examining the data's pattern to find a consistent level representing the background value. While the pattern in our case is identifiable, however, for more complex scenarios, the visually estimated background value can be validated and refined using quantitative methods. This approach ensures greater accuracy and reliability in cases where the data may exhibit more intricate variations or nuanced trends. The main characteristic of this state is that it is present, without significant alterations (Milioudis et al. 2013). To address the significance of peaks, we compare the magnitude of peaks to a baseline level of water consumption depending on the appliances present in each dataset.

2.4. KNAPSACK PROBLEM

The knapsack problem is an example of the combinatorial optimization problem. There exist four different types of knapsack problem (Pan and Zhang 2018). For this work, we consider the 0-1 type. It can be defined as follows : Given N items where x_i codes for the inclusion of the item i in the bag (if $x_i = 1$) or not including it ($x_i = 0$) and i being the index ranging from 1 to N ; considering that item i has a weight ω_i and a profit v_i , and given a bag with a total weight capacity W ; the task is to find the subset of items that maximizes the sum of profits while the sum of weights does not exceed W (see equation 2). The constraint in the 0-1 knapsack problem is that we can either put an item completely in the bag or cannot put it at all meaning that it is not possible to put a fraction of it and it is not possible to include it multiple times (Pan and Zhang 2018). Moreover, values, weights and capacity values are taken to be integer values. The consideration of integers is primarily for simplicity and practicality in problem-solving and algorithm design (Pan and Zhang 2018).

$$\text{We define } v_{cumulated} = \sum_{i=1}^N v_i x_i \text{ and } \omega_{cumulated} = \sum_{i=1}^N \omega_i x_i \quad (2)$$

The best solution is the one that maximizes $v_{cumulated}$ while verifying $\omega_{cumulated} \leq W$

2.5. KNAPSACK PROBLEM AND WATER DISAGGREGATION

In this research work, we are drawing a parallel between the Knapsack problem and water disaggregation : for a given peak, we know the total water consumption, we know the potential consumption of each appliance (the median flowrate) and we wonder which ones of the appliances contributed to the total. If we associate the total consumption (at each peak) to the overall capacity of the knapsack, the median flowrate of appliances to the item weights and the frequency of usage to values, then the features of water disaggregation and knapsack problem are close. Following this idea, we use the optimization algorithm, dynamic programming, designed to solve the Knapsack problem to identify the corresponding combinations of appliances.

3. RESULTS

In this section, we go over the outcomes of the proposed algorithm, we validate our approach with the dataset of Italian house 2 (Mazzoni et al. 2021). Then, we compare the results of our disaggregation approach with the 2 previously used methods in the literature review, SVM and k-means (Gourmelon et al. 2021; Bethke, 2020). We call rate of efficiency the overall percentage of correct identifications of a method. For the proposed method, the rate of efficiency is equal to 97.6%, which can be compared to the rate of efficiency of 98.6% and 89.9% for SVM (supervised method) and k-means (unsupervised method) respectively. Given that the proposed method is unsupervised, it should be noticed that it improved the overall efficiency of unsupervised methods reaching an efficiency that is close to that of a supervised approach. Figure 1 represents the confusion matrix of the proposed method. It is showing that sink, dishwasher, bathtap and toilet water consumptions have been detected without any error. However, the washing machine and the shower were misidentified with 62 confusions.

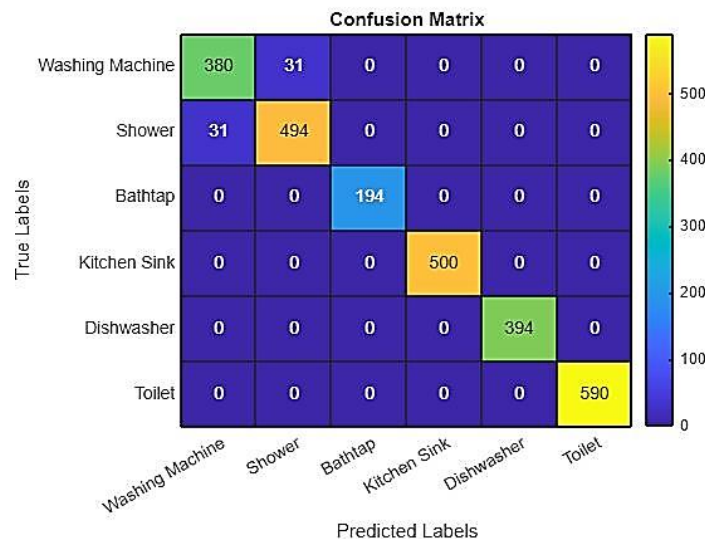


Figure 1 : Confusion matrix of the proposed method showing the instances where the appliances are correctly identified and the instances of washing machine and shower misidentified.

Additionally, comparison of the methods according to Precision, Recall and F1 measure provide additional insights on the results. Precision measures the accuracy of positive predictions made by the algorithm. Recall measures the ability of the algorithm to correctly identify all positive instances. F1 score is the harmonic mean of precision and recall, providing a balance between precision and recall as a useful overall performance metric.

$$Precision = \frac{True\ Positives}{True\ Positives+False\ Positives} \quad (3)$$

$$Recall = \frac{True\ Positives}{True\ Positives+False\ Negatives} \quad (4)$$

$$F1\ score = 2 \times \frac{Precision \times Recall}{Precision+Recall} \quad (5)$$

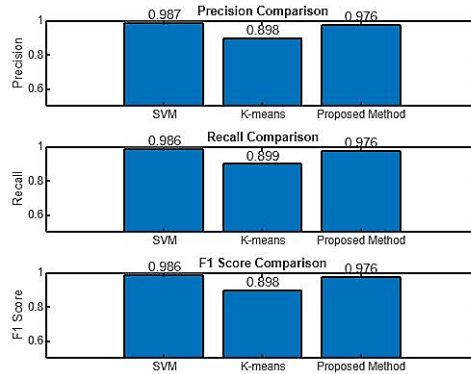


Figure 2 : Precision, Recall and F1 score values for SVM, k-means and our proposed method for Italian House 1

Results presented in Figure 2 are consistent with the overall rates of efficiency. A high value of F1 score (0.976) suggests that the algorithm balances between precision and recall. For SVM, water features used for disaggregation have clear patterns that helped in correctly identifying appliances (Basu et al. 2017). For k-means, an unsupervised technique, it achieved lower precision, recall, and F1 score compared to SVM. This can be explained by the fact that k-means does not inherently handle class labels or ground truth information, making it less suitable for classification and identification tasks compared to supervised algorithms like SVM (Aggarwal and Aggarwal 2012).

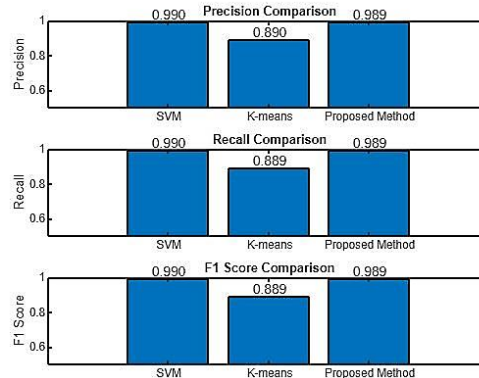


Figure 3 : Precision, Recall and F1 score values for SVM, k-means and our proposed method for Italian House 2

Results presented in Figure 3 on the Italian House 2 are consistent. Our unsupervised method is reaching indexes (precision, recall and F1 score) in the same order of magnitude of SVM (which is a supervised approach) overtaken the k-means based method (which is unsupervised). Moreover, for the proposed algorithm, indexes on the second dataset (Italian House 2) are higher than that of the first dataset (Italian House 1). In fact, the median flowrates of the washing machine and the shower in the first dataset of the Italian House 1 were similar which caused the misidentification to occur between these 2 appliances. In such cases, it is more challenging to accurately identify which appliance is truly working especially when we only consider the constraint of favoring shower over washing machine because it is more

frequently used than the washing machine. However, in the second dataset of Italian House 2, median flowrates were distinct values for each appliance reducing in this case the possibility of misidentification.

4. CONCLUSION

In this paper, we explored the parallel between water disaggregation and knapsack problem aiming at identifying the usage patterns of various water appliances within a household. Resulting disaggregation algorithm is tested on 2 datasets. It demonstrated effectiveness in identifying combinations of water appliances corresponding to flowrate peaks. Performance evaluation, precision, recall and F1 score were employed to evaluate the accuracy of the proposed algorithm in predicting appliance usage respective for consumption peaks. Some of the limitations and challenges rely on the appropriate parameters selection including weights, values and capacity of the knapsack problem. For future directions, we would like to explore the integration of additional features such as time, seasonal variations and power consumption (for washing machines and dishwashers) to enhance the approach's ability to adapt to diverse water consumption patterns. Moreover, we would like to develop user-friendly interfaces or applications that allow end-users to interact with and interpret the results of water disaggregation algorithms. In conclusion, the presented method, when appropriately configured and integrated with robust peak detection proves to be a promising tool for water disaggregation, considering that it does not need labeled data as supervised techniques. Also, with the correct implementation of items and constraints, it can be generalized across new scenarios. Addressing challenges and embracing future research directions can further refine its capabilities and can contribute to sustainable water management practices.

5. ACKNOWLEDGMENT

This work was done within the framework of Solar Academy Graduate School, grant ANR-18-EURE-0016.

6. BIBLIOGRAPHY

- Aggarwal, Neha, and Kirti Aggarwal. 2012. 'A Mid – Point Based k-Mean Clustering Algorithm for Data Mining' 4 (06).
- Andrade, Chittaranjan. 2021. 'Z Scores, Standard Scores, and Composite Test Scores Explained'. *Indian Journal of Psychological Medicine* 43 (6): 555–57. <https://doi.org/10.1177/02537176211046525>.
- Basu, Kaustav, Vincent Debusschere, Seddik Bacha, Ahmad Hably, Danny Van Delft, and Geert Jan Dirven. 2017. 'A Generic Data Driven Approach for Low Sampling Load Disaggregation'. *Sustainable Energy, Grids and Networks* 9 (March): 118–27. <https://doi.org/10.1016/j.segan.2016.12.006>.
- Bethke, Gabrielle M. n.d. 'DISAGGREGATION AND CLASSIFICATION OF RESIDENTIAL WATER EVENTS FROM HIGH-RESOLUTION SMART WATER METER DATA USING UNSUPERVISED MACHINE LEARNING METHODS'.
- 'Dati Statistici | I Numeri Di Bologna'. n.d. Accessed 30 April 2024. <https://inumeridibolognametropolitana.it/dati-statistici>.
- Doshi-Velez, Finale, and Been Kim. 2017. 'Towards A Rigorous Science of Interpretable Machine Learning'. arXiv. <http://arxiv.org/abs/1702.08608>.
- Du, Boyu, Xiaoqian Guo, Qiang Yan, Hongmei Duan, and Guwang Liu. 2022. 'Analysis of Domestic Water Consumption in Typical Countries and Its Enlightenment to China'. Edited by Z. Fang

- and D. Tong. *E3S Web of Conferences* 352: 03017.
<https://doi.org/10.1051/e3sconf/202235203017>.
- Gourmelon, Nora, Siming Bayer, Michael Mayle, Guy Bach, Christian Bebbber, Christophe Munck, Christoph Sosna, and Andreas Maier. 2021. ‘Implications of Experiment Set-Ups for Residential Water End-Use Classification’. *Water* 13 (2): 236.
<https://doi.org/10.3390/w13020236>.
- Jain, Hima, Lokesh, Nitin, Sameep, Abhinav, Patel, Nagalapatti, Gupta, Mehta, . 2020. ‘Overview and Importance of Data Quality for Machine Learning Tasks.’. ” *Proceedings of the 26th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery & Data Mining (2020)*.
- Kowalski, and Marshallsay, M, and D. n.d. “‘A System for Improved Assessment of Domestic Water Use Components.’” *Proc., 2nd Int. Water Assoc. Conf. on Efficient Use and Manag. of Urban Water Supply, IRC, Tenerife, Spain*.
- Lee, Dongwoo, and Sybil Derrible. 2020. ‘Predicting Residential Water Demand with Machine-Based Statistical Learning’. *Journal of Water Resources Planning and Management* 146 (1): 04019067. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0001119](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0001119).
- Li, Jeng-Lin, Chih-Fan Hsu, Ming-Ching Chang, and Wei-Chao Chen. 2024. ‘A Comprehensive Review of Machine Learning Advances on Data Change: A Cross-Field Perspective’. arXiv. <http://arxiv.org/abs/2402.12627>.
- Mazzoni, Filippo, Stefano Alvisi, Marco Franchini, Marco Ferraris, and Zoran Kapelan. 2021. ‘Automated Household Water End-Use Disaggregation through Rule-Based Methodology’. *Journal of Water Resources Planning and Management* 147 (6): 04021024.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0001379](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0001379).
- Milioudis, A. N., G. T. Andreou, V. N. Katsanou, K. I. Sgouras, and D. P. Labridis. 2013. ‘Event Detection for Load Disaggregation in Smart Metering’. In *IEEE PES ISGT Europe 2013*, 1–5. Lyngby, Denmark: IEEE. <https://doi.org/10.1109/ISGTEurope.2013.6695369>.
- Oliveira-Esquerre, Karla, Mariza Mello, Gabriella Botelho, Zikang Deng, Farinaz Koushanfar, and Asher Kiperstok. 2021. ‘Water End-Use Consumption in Low-Income Households: Evaluation of the Impact of Preprocessing on the Construction of a Classification Model’. *Expert Systems with Applications* 185 (December): 115623.
<https://doi.org/10.1016/j.eswa.2021.115623>.
- Pan, Xiaohui, and Tao Zhang. 2018. ‘Comparison and Analysis of Algorithms for the 0/1 Knapsack Problem’. *Journal of Physics: Conference Series* 1069 (August): 012024.
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/1069/1/012024>.
- ‘Population and Population Change Statistics’. n.d. Accessed 16 April 2024.
https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Population_and_population_change_statistics.
- Vašak, Mario, Goran Banjac, and Hrvoje Novak. 2015. ‘Water Use Disaggregation Based on Classification of Feature Vectors Extracted from Smart Meter Data’. *Procedia Engineering* 119: 1381–90. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.992>.
- Vitter, J.S., and M.E. Webber. 2018. ‘A Non-Intrusive Approach for Classifying Residential Water Events Using Coincident Electricity Data’. *Environmental Modelling & Software* 100 (February): 302–13. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.11.029>.
- Zaidi, Chandola, Allen, Sanyal, Stewart, Bhaduri, and McManamay. 2018. ‘Machine Learning for Energy-Water Nexus: Challenges and Opportunities’. *Big Earth Data* 2 (3): 228–67.
<https://doi.org/10.1080/20964471.2018.1526057>.
- Zhang, Chiyuan, Samy Bengio, Moritz Hardt, Benjamin Recht, and Oriol Vinyals. 2017. ‘Understanding Deep Learning Requires Rethinking Generalization’. arXiv. <http://arxiv.org/abs/1611.03530>.
- Zou, Hui, Zhihong Zou, and Xiaojing Wang. 2015. ‘An Enhanced K-Means Algorithm for Water Quality Analysis of The Haihe River in China’. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 12 (11): 14400–413. <https://doi.org/10.3390/ijerph121114400>.

Un système d'annotations sémantiques pour impliquer les occupants d'habitation dans une plus grande sobriété énergétique

Estefania Alvarez del Castillo Cardoso^{1,2,*}, Stephane Ploix¹, Patrick Reignier²

¹Univ. Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP, G-SCOP, 38000 Grenoble, France Institute of Engineering Univ. Grenoble Alpes. ²Univ. Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP, LIG 38000 Grenoble, France

*estefania.alvarez-del-castillo-cardoso@grenoble-inp.fr

RÉSUMÉ. Cet article présente un système coopératif d'aide aux occupants à mieux gérer l'énergie consommée dans leur habitat. Le système proposé collecte des informations grâce à des capteurs environnementaux et interagit avec les habitants pour compléter les mesures collectées par des informations relatives à l'intention des habitants. L'interaction avec les habitants se fait par une approche de type expérimentation couplée à un mécanisme d'apprentissage interactif et coopératif. L'information collectée permettra la mise en relation des intentions avec les impacts énergétiques de leurs actions comme montré dans (Alvarez del Castillo C. et al., 2022). Cet article propose une nouvelle approche pour gérer plusieurs activités en parallèle ainsi qu'une annotation sémantique des intentions des activités telle que vécu par les occupants. Différentes aides et outils d'aide à l'annotation sémantique sont proposés.

MOTS-CLÉS. gestion de l'énergie, apprentissage interactif, coopératif comportement humain

ABSTRACT. This paper presents a cooperative occupant assistance system, aimed at helping to better manage the energy consumed in the homes. The system collects information using environmental sensors and interacts with the inhabitants to supplement the collected measurements with information relating to the inhabitants' intentions. Interaction with residents is achieved through an experimental approach coupled with an interactive and cooperative learning mechanism. The information gathered will allow intentions to be related to the energy impacts of their actions as showed in ((Alvarez del Castillo C. et al., 2022). This article proposes a new approach for managing several activities in parallel, as well as a semantic annotation of the intentions of the activities as experienced by the occupants. Various semantic annotation aids and tools are proposed.

KEYWORDS. energy management, interactive and cooperative learning, human behavior

1. INTRODUCTION

Dans les habitations à haute performance énergétique, l'efficacité est fortement influencée par des facteurs environnementaux tels que les gains solaires, l'exposition au vent, la température, etc. Ces impacts dépendent de plusieurs éléments, tels que l'emplacement du bâtiment, son orientation, ses matériaux de construction, son système CVC, etc. Néanmoins, il a été montré que le comportement des acteurs humain est l'un des facteurs qui a le plus d'impact sur la consommation d'énergie dans ces bâtiments (Vorger, 2014).

Comprendre ce qui se passe dans un bâtiment nécessite de relier les impacts environnementaux aux intentions des habitants, car c'est ce qui correspond à leur vécu psychologique. Il est important de déterminer les intentions sous-jacentes derrière leurs actions (Adam et al., 2016). Une action telle que l'ouverture d'une fenêtre ne prend de sens que lorsque l'on connaît l'intention, ventiler pour évacuer de la fumée de cuisson par exemple, "action qui pourrait s'inscrire dans une séquence cohérente, c'est-à-dire une activité spécifique." Par définition, un système socio-technique (STS) dépend à la fois d'une partie technique et du comportement des personnes impliquées. Les résidences sont des STS où les habitants

doivent être considérés comme centraux, ils décident des configurations du lieu (CVC), de l'usage des équipements électriques, etc. Les systèmes socio-techniques collaboratifs (CSTS), constituent un sous-ensemble des STS, celui des STS dotés de systèmes d'aide à la décision offrant un service aux habitants afin de les accompagner vers un objectif partagé. On propose que dans un CSTS, l'aide à la décision pour mieux gérer l'énergie doit disposer d'informations associées à la partie technique : les données collectées par des capteurs in situ, mais aussi d'informations associées aux acteurs humains, par exemple sous la forme d'étiquettes décrivant des intentions. Un CSTS implémentant un apprentissage interactif et coopératif (AIC) a été testé dans (Silva et al., 2022). Les résultats sont satisfaisants dans le cadre d'une zone de type bureau, sans aucun parallélisme au niveau des activités, or, cette solution ne convient pas au contexte résidentiel, où de multiples activités peuvent être réalisées en parallèle, dans différentes zones.

On introduit, les concepts fondamentaux d'un CSTS, d'aide à la décision pour mieux gérer l'énergie, ainsi que différents types d'étiquetage. Un principe d'aide à l'étiquetage a posteriori est présentée et constitue la contribution principale de cette communication.

2. ÉTAT DE L'ART

On s'intéresse à l'association des causes perçues par les habitants, que nous nommons activités dans des contextes spécifiques, à des effets sur la consommation d'énergie et le confort interne des ménages. Notre objectif est de proposer aussi une solution pour les ménages multi-occupants dans un contexte multi-activité et dans des environnements d'habitation multi-zones comme montré dans (Alvarez del Castillo C. et al., 2022).

Il est nécessaire d'avoir des informations sur les impacts ainsi que sur les causes. Pour avoir des informations sur les impacts, on peut utiliser des groupes des capteurs comme (Schoofs et al., 2010) (sauf qu'au niveau des activités et pas des appareils). Ils ont présenté des travaux sur la génération de signatures construites à partir de plusieurs capteurs au lieu d'un seul, pour réduire les faux positifs. Par exemple, la durée d'utilisation d'une bouilloire peut être détectée par une mesure de vibrations, du niveau de température ainsi que du niveau sonore. Si seul le niveau de température avait été utilisé, l'estimation de durée de fonctionnement aurait été incorrecte, la température restant élevée même après que la bouilloire soit éteinte.

Pour compléter les informations fournies par les capteurs, on propose que les habitants fournissent des étiquettes basées sur leurs connaissances. Pour faciliter la tâche, des méthodes d'apprentissage automatique sont utilisées : les apprentissages interactif et coopératif. (Amayri et al., 2019) ont testé une méthode d'apprentissage de type supervisé pour la reconnaissance de présence. Avec une approche d'apprentissage interactif, le système interagit avec un utilisateur pour lui demander des informations sur l'occupation actuelle du lieu. Afin de minimiser le nombre d'interactions, tout en ayant au final le moins d'erreurs d'estimation de l'occupation, deux critères d'interaction ont été analysés : la densité et le taux de propagation. (Amine et al., 2020) ont introduit la méthode de codéfinition ou cooperative-learning, une méthode d'apprentissage supervisé qui coopère avec l'occupant en l'informant d'éventuelles erreurs d'étiquetage, si les étiquettes fournies par l'habitant ne coïncident pas avec les informations précédentes apprises par le système. Dans notre travail, on utilise ce deux méthodes d'apprentissage.

Une habitation abritant plusieurs personnes apporte une dimension de complexité supplémentaire : les multiactivités. (Liu et al., 2016) mentionnent que les personnes d'un ménage effectuent fréquemment des activités simultanées. Pour modéliser les relations temporelles, des modèles graphiques probabilistes ont été utilisés. Mais la complexité de la tâche augmente à mesure que le nombre d'activités augmente, et une grande quantité d'informations est nécessaire pour effectuer l'apprentissage. (Li et al., 2020) proposent une revue des approches pour la reconnaissance d'activité multi-utilisateurs. Ils décrivent des catégories des activités complexes comme : l'activité concurrente individuelle, où un seul utilisateur effectue différentes activités en même temps ; l'activité simultanée multi-individuelle, où plusieurs utilisateurs effectuent *la même activité* indépendamment ; et l'activité collaborative (multi-utilisateurs), lorsque les utilisateurs participent ensemble à la réalisation d'un objectif commun. Contrairement à (Li et al.,

2020), on considère qu'une activité simultanée multi-individuelle est quand plusieurs utilisateurs effectuent *différentes activités* individuellement et en même temps.

(Li et al., 2020) concluent que les approches basées sur les données pour la reconnaissance d'activité présentent des limites : le modèle de Markov caché convient mal aux situations impliquant plusieurs personnes ayant des activités simultanées, car le nombre de variables à prendre en compte devient très important. C'est pourquoi (Li et al., 2020) recommandent l'utilisation de technologies d'apprentissage profond pour les contextes complexes. La diversité des contextes et le bruit dans les données collectées rendent la tâche particulièrement difficile dans ces situations.

On présente dans cet article un système qui pourrait recueillir des informations auprès des habitants via une procédure d'étiquetage, dépassant la simple reconnaissance des activités par des capteurs ambiants. On détaillera les algorithmes nécessaires pour un processus d'AIC. En outre, le concept d'expériences permet d'étudier diverses activités, même simultanées. Enfin, on introduit une fonctionnalité permettant d'aider les résidents à se repérer dans leurs données historiques afin qu'ils puissent fournir des annotations à leur propre initiative.

3. APPROCHE PROPOSÉE

Les ménages disposent d'un ensemble de services pour assurer leur confort tels que les ouvertures/fermetures de fenêtres, l'éclairage et les appareils électriques, la gestion des systèmes CVC, etc. Les habitants ont une influence sur la consommation d'énergie par leur présence et l'utilisation de services. Dans les bâtiments performants, le principal impact est dû aux activités des habitants (Vorger, 2014). Pour satisfaire les demandes de confort des occupants, les services sont modifiés, par exemple les fenêtres sont ouvertes.

Considérons une action comme la modification de l'état des services. Considérons maintenant une activité (α), comme une séquence d'actions, réalisées avec une *intention particulière*, sachant qu'un cas particulier est une séquence d'une seule action. Une même *activité* peut être exécutée de différentes manières, ce qui conduit à des modalités d'activités (α_i). Une modalité d'activité fait référence à : un ensemble d'appareils utilisés et/ou la configuration d'un appareil, par exemple, un cycle de lavage à 60°C, pour un service d'une machine à laver. Et/ou une activité spécifique, comme ouvrir la porte ou ouvrir la fenêtre.

Le but du CSTS est d'évaluer l'impact (effets) sur la consommation d'énergie et le confort interne, des causes qui ne peuvent pas être observées à l'aide des mesures des capteurs. Pour nous, la cause implique non seulement l'activité, mais aussi son contexte. Les *effets* sont ici définis comme des changements mesurables dans l'état des dispositifs mesurés ou estimés lors de la réalisation des activités. Il est ensuite demandé aux habitants de fournir, s'ils le souhaitent, des étiquettes sous la forme d'un texte. Un étiquetage sur une période donnée correspond à *la réalisation* d'une activité. On propose d'étiqueter ce qu'on appelle des *faits*. Un fait est décrit par : une étiquette significative, librement choisie, exprimant *une activité* ayant du sens pour les habitants de telle manière qu'elle précise par rapport à l'intention de l'activité, des annotations sémantiques paramétrées par des attributs, provenant d'un ensemble fermé prédéfini. Une annotation sémantique paramétrée spécifie le contexte d'une action ou d'une activité.

On utilise l'approche 5W1H (pour son acronyme en anglais), un ensemble de questions (What?, Why?, Who?, When?, Where? et How?), utilisé par (Kashif et al., 2011) en faisant une analogie entre la méthode BRAHMS (Business redesign agent-based holistic modelling system) et les questions. BRAHMS est un simulateur multi-agent et un langage descriptif permettant d'enregistrer le comportement humain. Le langage décrit un contexte (Kashif et al., 2013) et (Habtamu et al., 2020).

Il est proposé que les habitants déclarent les réalisations des activités expérimentées et fournissent éventuellement des annotations sémantiques paramétrées complémentaires :

- pourquoi : spécialise l'intention pour la réalisation particulière d'une activité.
- comment : précise la façon dont une activité est réalisée : @comment(un ou plusieurs mots qui aident

les habitants à identifier la modalité "comment").

- qui : précise les acteurs humains @qui(les personnes impliquées).
- quoi : permet de décrire les objets impliqués dans l'activité exécutée @quoi().
- où : spécifie la localisation.

La question "quand ?" est déduite de l'étiquetage début/fin de la réalisation d'une activité.

Voici quelques exemples d'annotations :

- "améliorer la qualité de l'air de la pièce"/(date début, fin), @comment(ouvrir la fenêtre).**
- "rafraîchir la pièce"/(date début, fin), @comment(ouvrir la fenêtre).**
- "héberger des personnes"/(date début, fin), @qui(2 personnes) @où(chambre bleue)
- "partir en vacances"/(date début, fin), @qui(enfants)
- "laver des vêtements"/(date début, fin), @comment(programme 60°C), @quoi(vêtements très sales).

**Notez que lorsqu'il s'agit de deux faits différentes avec des intentions différentes, la même modalité peut être utilisée. Les modalités serviront au filtrage des faits lors de l'étape d'analyse des impacts. Par exemple, étudier l'impact de toutes les réalisations "rafraîchir la pièce" ayant la modalité @comment(ouvrir la porte).

Parce que les faits dans un CSTS peuvent être nombreux, l'idéal est que les acteurs humains n'agissent que s'ils veulent en savoir plus. Pour cela, on introduit le concept d'*expérience* qui rassemble une étiquette décrivant l'intention étudiée ainsi que les capteurs susceptibles de mesurer des impacts. Les différentes étapes d'une *expérience* sont : dans un premier temps, les habitants choisissent l'activité à analyser. Puis, ils définissent la période pendant laquelle ils souhaitent que l'analyse soit effectuée en termes de date de début et de date de fin. Enfin, ils sélectionnent les capteurs et leurs équipements associés et potentiellement impactés (capteurs de température, de concentration de CO_2 , de contact, consommation d'énergie d'appareils, etc). La sélection des capteurs dépend de l'activité étudiée dont l'intention donne une idée des effets qui doivent être observés. De cette façon, l'habitant pourra évaluer l'efficacité de son action. De plus, les habitants connaissent les appareils qu'ils utilisent. Si le système était automatisé, certains des appareils utilisés pourraient manquer.

Durant la phase de collecte de données capteurs, les algorithmes AIC interviennent pour la récupération des annotations (Silva et al., 2022).

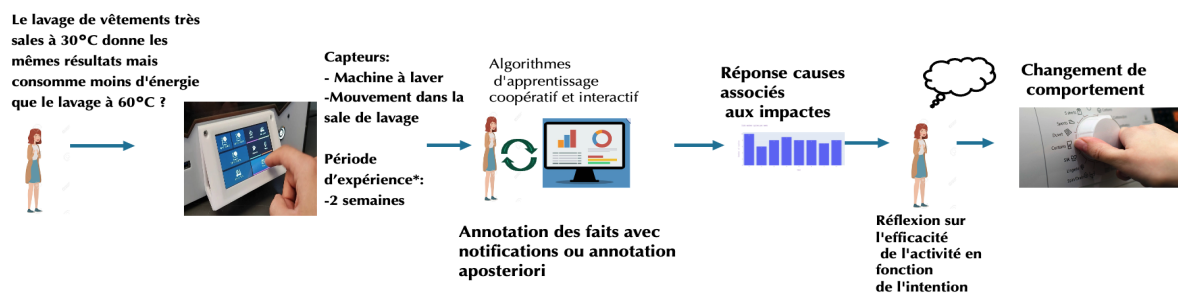


Figure 1 : Diagramme de la méthode générale

L'AIC a besoin d'information déduit des mesures en s'appuyant sur des extracteurs de caractéristiques. Il s'agit de transformer des données issues des capteurs en informations catégorielles, plus faciles à interpréter. Les extracteurs de caractéristiques sont des algorithmes généralement paramétrés, intégrant un modèle de connaissances qui effectuent des opérations de filtrage. Ils sont donc des fonctions à entrées multiples, allant de \mathbb{R}^m à \mathbb{R} . Ils prennent des séries temporelles de données de mesure en entrée et produisent une série temporelle de données catégorielles en sortie. Voici quelques exemples d'extracteurs de caractéristiques : *On-off* qui détecte quand un appareil est allumé/éteint ou dans un état indéterminé, *magnitude* qui discrétise un signal en différents niveaux où les amplitudes sont paramétrées, *tendance* qui est utile pour déterminer l'augmentation ou la diminution des niveaux de concentration de CO_2 .

On appelle *signature* de la série temporelle résultante, les données brutes d'un capteur transformées en informations discrétisées.

4. ANNOTATION A POSTERIORI

Les habitants n'auront pas besoin d'annoter chaque fois qu'ils réalisent une activité grâce aux AIC. Des notifications sont envoyées pour ajouter une nouvelle annotation ou pour corriger les étiquettes (le système suggère des erreurs d'étiquetage si les étiquettes fournies par l'acteur humain ne correspondent pas à ce que le système a appris des étiquettes précédentes). Étant donné que les habitants ne sont pas toujours disponibles pour répondre aux notifications, ils peuvent reporter et effectuer une annotation de leur propre initiative avec une fonctionnalité permettant l'intervention des habitants à un autre moment : *la révision a posteriori*.

Après avoir obtenu les signatures résultant des extracteurs de caractéristiques, une *méthode de détection des points de changement* est appliquée à l'ensemble des signatures. L'objectif est de trouver des instants où ce qui se passe avant dans les mesures des capteurs est différent de ce qui se passe après, car cela pourrait indiquer le début ou la fin d'une activité.

La détection des points de changement est basée sur la méthode de divergence de Jensen-Shanon pour calculer la divergence entre deux distributions de probabilité. En tant que somme pondérée pour les valeurs discrètes est exprimée comme suit :

$$D_{JS}(p|q) = 1/2 \sum_i p_i \ln \frac{p_i}{\frac{p_i+q_i}{2}} + 1/2 \sum_i q_i \ln \frac{q_i}{\frac{p_i+q_i}{2}} \quad (1)$$

Un composant d'état est une valeur extraite à un intervalle de temps t_k . Il contient des *mots*, c'est-à-dire des valeurs entières, résultat des extracteurs de caractéristiques. Les mots sont comparés par un processus de fenêtre glissante. La méthode de Jensen Shanon nécessite des informations sur la distribution des probabilités (p_i, q_i). Dans notre cas, on ne dispose pas d'informations sur les distributions de probabilités, c'est la fréquence d'apparition des mots qui est utilisée pour l'évaluation de la divergence.

Le principe de cette approche est le suivant : on considère que la fréquence d'apparition des mots sur une fenêtre temporelle (avant et après l'instant t considéré) est représentatif de l'activité en cours. La divergence de Jensen Shanon calcule la différence entre ces fréquences avant et après le temps t . On cherche donc l'ensemble des instants t_i où cette différence est maximum, indiquant que ce qui se passe après est très différent de ce qui se passe avant. Ces instants t_i sont donc vraisemblablement des points de changement d'activité. La taille de la fenêtre temporelle considérée doit permettre de construire (via la fréquence d'apparition) une distribution de probabilité représentative de l'activité en cours. La taille de cette fenêtre est donc un paramètre important. Une fenêtre plus petite rendra la méthode plus sensible aux fluctuations mineures, ce qui peut entraîner un grand nombre de faux positifs. En revanche, une fenêtre plus grande rendra la méthode moins sensible, mais elle pourrait manquer certains changements importants. Ce paramètre peut être réglé par l'utilisateur lui-même directement à travers un curseur. Il pourra comparer les points de changement obtenus au regard des données capteurs visualisées sous forme de heat map (voir section suivante).

La méthode a été testée en utilisant la base de données de (Lago et al., 2017). Cette base de données contient des informations provenant de plusieurs capteurs dans un appartement de deux étages avec un habitant. Les capteurs installés comprennent des prises de consommation électrique, des capteurs de mouvement, de pression acoustique moyennée, d'humidité et de température de l'air. Un test a été effectué pour l'activité : "cuisiner". Les capteurs sélectionnés étaient les capteurs de consommation électrique de la plaque de cuisson et du four et les mouvements détectés dans la cuisine. La consommation électrique a été enregistrée en watts (W) et le mouvement est exprimé en pourcentage de temps (sur une période de 5 minutes) pendant lequel un mouvement a été enregistré.

Pour obtenir les signatures de chaque capteur sélectionné, on a utilisé l'extracteur de caractéristiques appelé *magnitude*, qui discrétise un signal en différents niveaux en fonction de l'amplitude des mesures.

Des seuils sont établis pour transformer les données brutes en niveaux que l'on peut définir comme bas, moyen et élevé. Pour les capteurs, trois niveaux ont été calculés (0, 1 et 2 où 0 est le plus bas, par exemple, consommation d'énergie négligeable ou mouvement détecté négligeable).

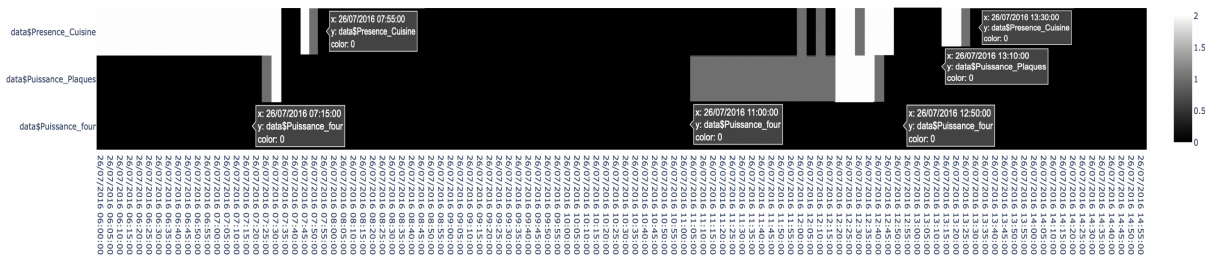


Figure 2 : Carte thermique des signatures pour l'activité "cuisiner"

La figure 2, une carte thermique des signatures, montre plus de 10 instants où au moins un capteur, de l'ensemble des capteurs, a changé d'état (chaque changement de couleur est un changement d'état du noir au gris, par exemple). On peut constater que le four n'a pas été utilisé, car à aucun moment une consommation d'énergie n'a été détectée (il n'y a pas eu de changement dans les mesures du capteur de consommation). Pour que les points de changement puissent servir de référence aux activités, on s'intéresse alors à l'observation des pics à des moments précis, plutôt qu'à la recherche de chacun des changements. L'activité "cuisiner" est reconnue aux 6 moments marqués (voir la figure 2), lorsqu'il y a détection d'une présence et que la plaque de cuisson est utilisée.

Lorsque la taille de la fenêtre de comparaison est trop petite, beaucoup de changements sont détectés. Cela peut être observé lorsque les valeurs sont constantes autour de 1,3 sur l'axe des ordonnées dans le graphique (voir la figure 5). L'algorithme a comparé les mots des capteurs chaque 300s (5min). La définition des mots est donnée dans le paragraphe suivant (équation 1).

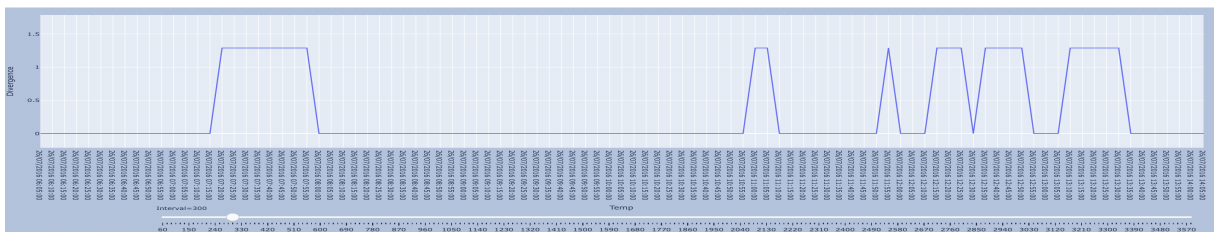


Figure 3 : Taille de la fenêtre du modèle de point de changement égale à 300s pour l'activité "cuisiner"

Quand la fenêtre est augmentée à 1200s (20min), le nombre de changements détectés est réduit. Au lieu de comparer chaque instant, il compare des instants groupés, ce qui permet d'observer les changements sur une période plus longue (voir la Figure 4). On a ajusté la taille de la fenêtre coulissante jusqu'à ce qu'elle corresponde mieux aux moments de changement observés dans la carte thermique (voir la Figure 2). Les lignes (voir la figure 4) permettent une meilleure visualisation des moments qui correspondent à l'activité. Cela signifie qu'une activité a probablement eu lieu de 7 :20 à 7 :35, puis une autre de 7 :35 à 8 :05. Plus tard, on détecte une probabilité de nouvelle activité de 11 :05 à 12 :15, puis de 12 :15 à 12 :45 et enfin une de 13 :10 à 13 :35.

En comparant avec les activités annotées dans la base de données, on a pu observer les labels montrés dans la figure 5.

En raison des changements des différents capteurs, on a trouvé deux activités probables au lieu d'une, comme le montrent les activités 1 et 2, 3 et 4. Cependant, la période de temps couverte par les deux



Figure 4 : Taille de la fenêtre du modèle de point de changement égale à 1230s pour l'activité "cuisiner"

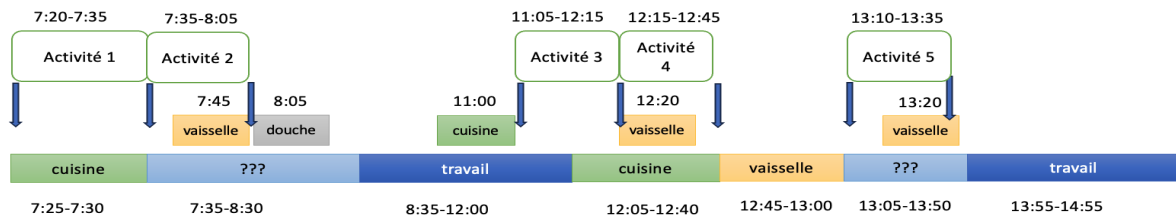


Figure 5 : Étiquettes données dans la base de données, points de changement détectés (flèches bleues), activités estimées numérotées de 1 à 5

correspond bien au début et à la fin de l'activité complète "cuisine". L'activité 5 a été principalement reconnue par le capteur de mouvement (voir figure 2). Il est possible que l'activité "vaisselle" ait été terminée à ce moment-là et que la personne se soit trouvée dans la cuisine. A 08 :05 le label "douche" a été annoté. Sur la figure 2 on observe à 07 :55 que de présence négligeable est enregistré ce que peut indiquer que les habitants ont abandonné la cuisine, et donc il y a eu un changement d'activité. De 8 :35 à 12 :00 l'activité travail a été annoté, mais c'est le cas des activités simultanées où l'habitant a travaillé et réchauffé et réchauffé de la nourriture au même temps. Sur la figure 2, on observe de la consommation d'énergie de la plaque de cuisson et aussi il y a l'annotation "cuisine" à 11 :00. L'habitant a dû choisir entre annoter soit l'activité cuisiner soit l'activité travail. Pareil pour le créneau de 12 :05 à 12 :40 et 13 :05 à 13 :50.

5. CONCLUSION

Le travail présenté propose un système dans lequel des expériences peuvent être programmées par les habitants d'un logement. Cela permet d'appréhender les contextes multi-activités. Dans la figure 5, on montre l'utilité des expériences pour pouvoir séparer l'information quand il y a des activités simultanées. C'est possible aussi de mettre en évidence les causalités entre consommation d'énergie avec une coopération entre les habitants et le système. Les habitantes font des annotations sur la notion des faits car ça permet de mieux évaluer l'efficacité des activités, en fonction de l'intention. Ce méthode peut contribuer aux deux étapes de persuasion des systèmes interactifs pour la gestion de l'énergie, comme (Cano et al., 2015) le "mirroring" et "explication". Ce qui permet aux habitants d'observer leur comportement et d'évaluer leurs effets. Des méthodes similaires d'auto-expérimentation ont été testées, par exemple, dans le domaine de la santé. (Daskalova et al., 2021) ont découvert que l'utilisation courante de données d'auto-surveillance incite à changer de comportement.

L'annotation peut être effectuée au moment de la réception d'une notification ou a posteriori, de façon à ce que les résidents soient libres de choisir le moment où ils souhaitent coopérer avec le système. L'annotation a posteriori permet aux utilisateurs de se repérer dans le temps, selon ce qu'on a observé dans la figure 5. C'est utile pour aider à se souvenir des moments ou des activités ont été réalisées

dans le passé. Des techniques interactives homme-machine (IHM) peuvent être mises en place pour faciliter la manipulation et la compréhension de l’outil. Le système IHM pourrait comporter une phase d’apprentissage afin que les habitants puissent comprendre et être guidés tout au long du processus du système. Cela inclut la compréhension du type de questions pouvant être testées, des capteurs pouvant être sélectionnés en fonction de la question posée, des exemples des annotations, etc.

REMERCIEMENTS

Travail soutenu par l’appel générique ANR-2021(Agence Nationale de la Recherche). Projet LearningHome.

BIBLIOGRAPHIE

- Adam, C., Danet, G., Thangarajah, J., and Dugdale, J. (2016). Bdi modelling and simulation of human behaviours in bushfires. *nformation Systems for Crisis Response and Management in Mediterranean Countries : Third International Conference, ISCRAM-med 2016, Madrid, Spain*, pages 47–61.
- Alvarez del Castillo C., E., Amayri, M., Ploix, S., and Reignier, P. (2022). Apprentissage interactif et coopératif pour l’expérimentation de son chezsoi. *IBPSA France 2022- International Building Performance Simulation Association. Châlons en Champagne, France.*, pages <https://hal.science/hal-03714506>.
- Amayri, M., Ploix, S., Bouguila, N., and Wurtz, F. (2019). Estimating occupancy using interactive learning with a sensor environment : Real-time experiments. *IEEE Access*, pages 53932 – 53944.
- Amine, A., Reignier, P., Ploix, S., Jacomino, M., and El-safadi, E. (2020). Identification collaborative d’activités dans une zone habitée. *Conférence IBPSA*.
- Cano, G., Laurillau, Y., and Calvary, G. (2015). Persuasion technologique et energie : revue critique de l’état de l’art. *Journal d’Interaction Personne-Système*, 4 :48–68.
- Daskalova, N., Kyi, E., Ouyang, K., Borem, A., Chen, S., Hyun, P., Nugent, N., , and Huang, J. (2021). Self-e : Smartphone-supported guidance for customizable self-experimentation. *In Proceedings of the 2021 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems. Yokohama Japan : ACM*, page 1–13.
- Habtamu, T., Bril El-Haouzi, H., Pannequin, R., and Benelmir, R. (2020). Multi-agent simulation of occupant behavior impact on building energy consumption. *10th Workshop on Service Oriented, Holonic and Multi-Agent Manufacturing Systems for Industry of the Future, Paris, France*.
- Kashif, A., Binh, L., Dugdale, J., and Ploix, S. (2011). Agent based framework to simulate inhabitants’ behaviour in domestic settings for energy management. *In Proceedings of the 3rd International Conference on Agents and Artificial Intelligence*, pages 190–199.
- Kashif, A., Ploix, S., Dugdale, J., and Le, X. (2013). Simulating the dynamics of occupant behaviour for power management in residential buildings. *Energy and buildings*, 56 :85–93.
- Lago, P., Lang, F., Roncancio, C., and Jiménez-Guarín, C. (2017). The contextact@a4h real-life dataset of daily-living activities. *Lecture Notes in Computer Science*, 10257.
- Li, Q., Gravina, R., Saeed, Y., Alsamhi, H., Sun, F., and Fortino, G. (2020). Multi-user activity recognition : Challenges and opportunities. *Information Fusion*, 63 :121–35.
- Liu, Y., Nie, L., Liu, L., and Rosenblum, D. (2016). From action to activity : Sensor-based activity recognition. *Neurocomputing*, 181 :108–15.
- Schoofs, A., Guerrieri, D., Delaney, G., P., O. M., and Ruzzelli, A. (2010). Annot : Automated electricity data annotation using wireless sensor networks. *7th Annual IEEE Communications Society Conference on Sensor, Mesh and Ad Hoc Communications and Networks (SECON). Boston, MA, USA : IEEE*.
- Silva, J., Amayri, M., Ploix, S., Reignier, P., and Santos Silva, C. (2022). Cooperative and interactive learning to estimate human behaviours for energy applications. *Energy and Buildings*, 258.
- Vorger, E. (2014). *Étude de l’influence du comportement des habitants sur la performance énergétique du bâtiment. PhDthesis*. Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2014.

Evaluating Environmental Impacts of Domestic Heat Pumps: A Review through Life Cycle Assessment

Mona Aridi¹, Marie-Lise Pannier¹, Rima Aridi¹, Thierry Lemenand*¹

¹ Univ Angers, LARIS, SFR MATHSTIC, F-49000 Angers, France

62 avenue Notre Dame du Lac, 49000 Angers

*thierry.lemenand@univ-angers.fr

RÉSUMÉ. Avec le besoin croissant de solutions de chauffage économiques et éco-énergétiques, les pompes à chaleur (PAC) ont émergé comme une alternative prometteuse pour les systèmes de chauffage résidentiels, jouant un rôle crucial dans le virage mondial vers une technologie de chauffage plus durable. Cet article de revue présente une analyse approfondie des techniques d'Analyse du Cycle de Vie (ACV) appliquées aux PAC domestiques, en (i) examinant la littérature existante sur les ACV menées pour les PAC domestiques, dans le but d'évaluer leur impact environnemental tout au long de leurs étapes de cycle de vie ; (ii) discutant des indicateurs environnementaux clés et des paramètres couramment évalués dans les ACV pour les PAC domestiques tels que le Coefficient de Performance et les réfrigérants ; (iii) indiquant les défis liés à la réalisation d'ACV pour ces systèmes. Cette étude met en évidence la nécessité de méthodologies normalisées et d'améliorations de la qualité des données, et propose des recommandations pour les orientations futures de la recherche afin de soutenir le développement de technologies de chauffage durables dans les structures résidentielles. En conclusion, l'ACV réalisée sur les HP révèle des perspectives précieuses pour améliorer leur impact environnemental à travers différentes étapes.

MOTS-CLÉS : Pompes à chaleur, Analyse du Cycle de Vie, Revue

ABSTRACT. With the growing need for economical and energy-efficient space heating solutions, heat pumps (HP) have emerged as a promising alternative for residential heating systems playing a crucial role in the global shift to a more sustainable heating technology. This review paper presents a thorough analysis of Life Cycle Assessment (LCA) techniques applied to domestic HP, by (i) examining the existing literature on LCAs conducted for domestic HP, aiming to assess their environmental effect across their life cycle stages ; (ii) discussing the key environmental indicators and parameters commonly assessed in LCAs for domestic HP such as Coefficient of Performance and refrigerants ; (iii) stating the challenges in conducting LCAs for these systems. This study highlights the necessity for standardized methodologies and data quality refinements and offers recommendations for future research directions to support the development of sustainable heating technologies in residential structures. In conclusion, the LCA conducted on HP reveals valuable insights to improve their environmental impact across various stages.

KEYWORDS: Heat pumps, Life Cycle Assessment, Review.

1. INTRODUCTION

1.1. LIFE CYCLE ASSESSMENT

The concept of Life Cycle Assessment (LCA) emerged during the 1960s due to concerns about environmental deterioration, particularly limited resource availability (Amahmoud et al., 2022). Afterward, a remarkable achievement was made in standardization, with LCA gaining recognition in policy and legal frameworks. Additionally, many prominent life-cycle impact assessment techniques originated during this period. LCA experienced methodological divergence in response to increased

demand. Challenges in interpreting ISO criteria led to the emergence of various approaches (Curran, 2016) (Guinée et al., 2011). Nowadays, LCA is expanding its focus to encompass all three dimensions of sustainability – environmental, social, and economic (Amahmoud et al., 2022).

1.2. LCA OF HEAT PUMPS

To maintain the increase in the global temperature to 2°C, over 190 countries committed to cutting their emissions by 40% by 2030 as part of the Paris Climate Agreement (*Paris Agreement on Climate Change*, 2024). Nations are putting serious efforts into decarbonization by introducing a renewable energy source, resulting in improving the architectural style. Enhancing efficiency in appliances entails applying methods derived from nature (*2019 Global Status Report for Buildings and Construction*, 2019). Heat pumps (HP) are crucial for EU decarbonization goals. However, regular assessment is necessary to ensure their ongoing performance and minimize environmental impact.

Since 1990, LCA has been applied to the HP industry (Lis et al., 2019) (Taborianski & Prado, 2004) (Fava, 2006), and as a good diagnostic tool for monitoring the performance of products, it contributed significantly to its improvement over years. Many comparative studies have been conducted to compare the performance of HP systems to conventional ones in terms of environmental impact (Marinelli et al., 2019) (Lin et al., 2021) (Lozano Miralles et al., 2020). Various Life Cycle Impact Assessments (LCIA) were utilized to identify those impacts such as CML2001, ReCiPe, Eco-indicator 99, IPCC, EF method, and many others. Some methods assessed impact categories at intermediate levels (midpoint), while others focused on the overall environmental damage (endpoint), with some employing both levels depending on the approach of the study. Despite being energy-efficient, HP systems still contribute to the environmental impact by increasing greenhouse gas (GHG) emissions, notably the refrigerants used and carbon dioxide (CO₂) emissions through the generation of electricity needed to power them.

1.3. OBJECTIVES AND SCOPE OF THE STUDY

This review examines existing literature on LCA conducted for domestic HP in residential buildings, evaluating their environmental impact across their life cycle stages, discussing the key environmental indicators and parameters in LCAs, and addressing the challenges in conducting LCAs for these systems. Eventually, this work aims to propose clear and objective recommendations for future action plans in the realm of heat pumps.

2. METHODOLOGY

2.1. SEARCH STRATEGY AND STUDY EVALUATION

This review evaluates the environmental impacts of domestic HP in residential buildings by examining their LCA. An electronic search was conducted on SCOPUS and Web of Science databases due to their scientific standards and extensive coverage. Key terms were formulated to initiate the research followed by an organized, phased search approach to filter out the irrelevant articles.

Criteria such as date and type were applied to narrow down the search. Only English-language research articles were considered in which they were screened based on titles and abstracts for relevance, with non-aligned or irrelevant abstracts excluded. After removing inaccessible articles and duplicates, a comprehensive full-text reading was carried out to ensure the credibility of the selected articles in terms of study design, methodology, and relevant outcomes.

The key terms used in both databases are “Domestic heat pumps” OR “Ground-source heat pumps” OR “Water-source heat pumps” OR “Air-source heat pumps” AND “Life Cycle Assessment” OR “Life Cycle Analysis” OR “LCA”, then 297 articles were addressed in SCOPUS and 169 in Web of Science, for which each of them underwent a systematic path of filtering.

Out of the English research articles that evaluated the impact of domestic HP on the environment using LCA methods during the last two decades, 36 articles were chosen and retrieved to be discussed in this review.

2.2. DATA IDENTIFICATION

The 36 articles under study were issued between 2010 and 2023 in which 22 of them (equivalent to 61%) were released in the last four years, between 2020 and 2023, inclusively. The box plot of the distribution of years of publication in Figure 1, is negatively skewed due to the dominance of data to the right side of the axis which resulted in a skewness to the left showing the attention that has been recently drawn to the assessment of domestic HPs using the LCA approach.

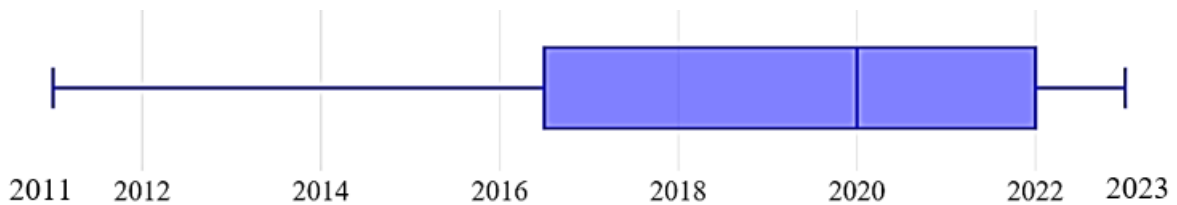


Figure 1: Boxplot for the distribution of years of publication.

Attaining environmental goals has been a serious concern for the European countries especially in the last decade and after the Paris Agreement in 2016. Eventually, most of the European countries have launched the Nationally Determined Contributions (NDCs) to reduce their GHG emissions by enhancing and improving their technologies (*Paris Agreement on Climate Change, 2024*). Most of the articles (69.5%) were carried out in European countries along with their case studies, as illustrated in Figure 2.

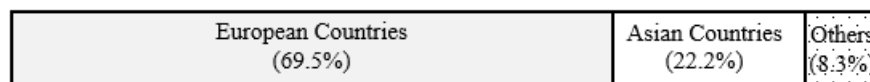


Figure 2: Distribution of articles among countries.

As each type of the studied HP may have a different impact on the environment, the 36 studied papers were classified and regrouped according to the type of HP under study. These classifications are well presented in Figure 3. Interestingly, 18 studies – equivalent to 50% of the articles – aimed to evaluate the environmental impact of Ground-Source Heat Pumps (GSHP) and Geothermal Heat Pumps (GHP), in which six of them compared the GSHP with Air-Source Heat Pumps (ASHP), and five other studies compared the GSHP with conventional heating systems such as condensing natural gas, biomass, and coal boilers. Finally, seven studies assessed the GSHP without comparison.

Four studies compared the ASHP to conventional systems and only one study focused on ASHP without any comparison. A group of five miscellaneous types of heat pumps were investigated in comparison with another system. Another group of eight miscellaneous types of HP was compared to conventional systems.

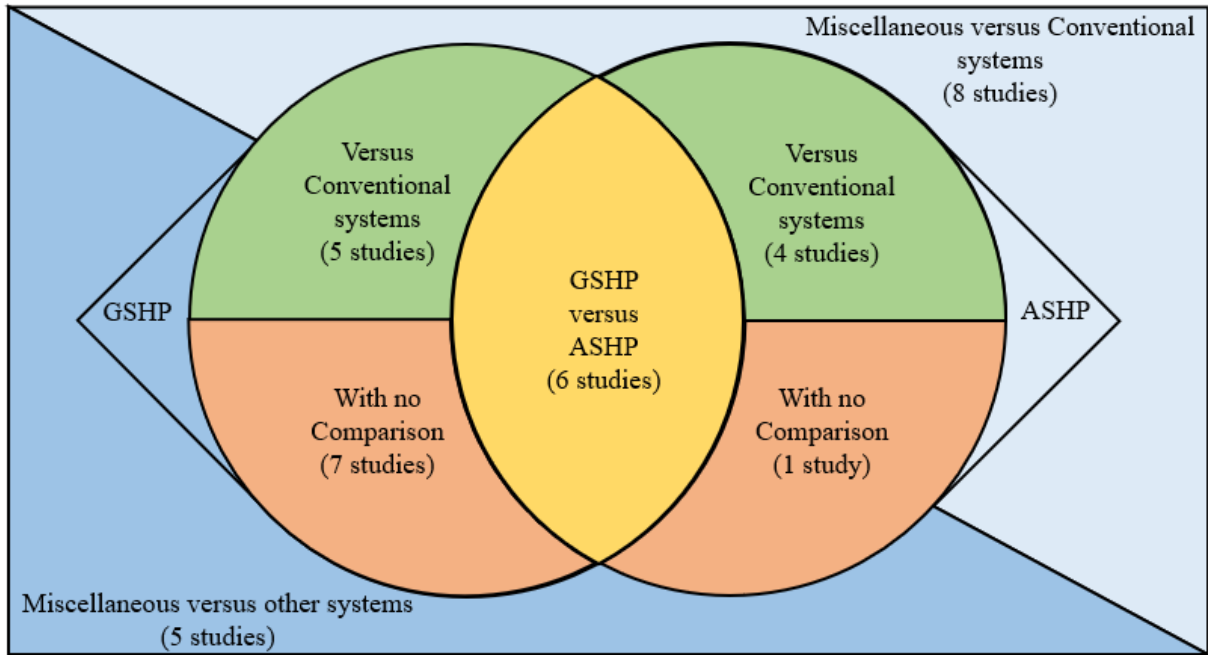


Figure 3: Classification of articles according to the type of heat pump.

These seven classifications are compared and examined in terms of their load on the environment. It should be noticed that none of the articles were about double service heat pumps.

2.3. DISSIMILARITIES

Comparing these 36 articles was challenging as dissimilarities took place among the factors that should be comparable, such as the refrigerants, the Coefficient of Performance (COP), the functional unit, and the Life Cycle Impact Assessment (LCIA) method.

Refrigerants. The type of refrigerant used in the HP systems considerably affects the system environmental impacts. However, it was not available in all studies in which 13 studies (accounting for 36%, as shown in Table 1) didn't mention the type of refrigerant used. Ignoring the contribution of refrigerants to the environmental load created an essential dissimilarity. However, for the studies that defined the refrigerants being used, the environmental impacts of refrigerants vary based on factors like their chemical composition, Global Warming Potential (GWP), and energy efficiency.

Table 1 : Type of refrigerant used in percentage.

R134a	R410a	R22	R32	Ammonia	NA
30.6%	19.5%	5.5%	5.5%	2.7%	36.2%

LCA Boundaries. The LCA for 26 out of the 36 studies was carried out from the cradle-to-grave considering the whole cycle from the extraction phase of the raw materials to the disposal phase, whereas the other 10 were performed using the cradle-to-gate approach with a partial assessment that terminates at the gate stage focusing on the upstream stages of production where significant environmental impacts occur. Interestingly, nine out of those ten articles discussed the GSHP or the GHP case, while the tenth one investigated the waste heat-fed heat pump.

Coefficient of Performance (COP). 27 studies (75%) presented the Coefficient of Performance (COP) as a significant comparable measure to assess the efficiency of the tested heat pumps at a specific

point in time, in which five of them defined and tested the Seasonal Coefficient of Performance (SCOP) providing a more comprehensive evaluation of its performance over an entire heating season, considering variations in operating conditions and energy use.

Functional Unit (FU). A huge difference in the functional units was observed among the literature. 53% of the studies used the thermal energy in Watt-hours (kWh or MWh) as their FU, 11% used the thermal energy in Joules (MJ or GJ), and 19% referred to the lifetime (in years) as their FU.

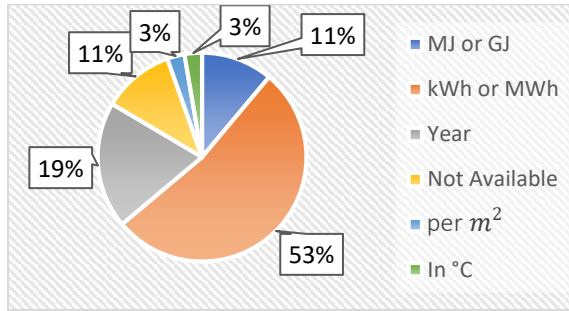


Figure 4: Functional units of heat pump systems (in percentage).

However, 11% of the studies didn't mention their functional unit at all.

Harmonizing the FUs is essential to enable comparable analysis in LCA studies. A unified functional unit ensures consistency and comparability among tested items. This would facilitate benchmarking against best practices to identify areas of improvement and enhance efforts in achieving sustainability goals.

Life Cycle Impact Assessment (LCIA) method. The LCIA method is a crucial component of LCA, providing valuable insights into the environmental impacts of HP throughout their entire lifetime. LCIA can be performed through several methods depending on the data availability, goal, and scope of the study (illustrated in Table 2) such as Eco-indicator 99, which serves as both a scientifically grounded method and a practical tool for eco-design ('Sustainable Development', 2012) and which was used by 20% of the articles of this review. The CML method was created by the "Centrum voor Milieukunde Leiden" in the Netherlands in 1992 (Acero et al., 2015) and was used by 14% of the papers as compared to other methods.

Table 2: Life Cycle Impact Assessment methods (LCIA) per type of heat pump.

	CML (1992, 2000, 2001)	ReCiPe (2008, 2016)	EF method 3.0	IMPACT 2002+	(IPCC2001, ELCD, CED, EPS2000 ...)	Eco Indicator (95 and 99)
Geothermal HP	Russo et al., 2014	Pratiwi & Trutnevyte, 2021			Scharrer et al., 2020	
GSHP		Zhang et al., 2022	Famiglietti, Gerevini, et al., 2021	Zhang et al., 2022	Zhang et al., 2022	Koroneos & Nanaki, 2017
		Bonamente & Aquino, 2017				Abusoglu & Sedeeq, 2013
ASHP	Naumann et al., 2022	Sevindik & Spataru, 2022			Zheng et al., 2016 Lozano Miralles et al., 2020	Lozano Miralles et al., 2020
GSHP versus ASHP	Greening & Azapagic, 2012	Marinelli et al., 2020		Violante et al., 2022	Marinelli et al., 2020	
	Sevindik et al., 2021	Aresti et al., 2022 Sevindik et al., 2021				
Systems versus conventional heating methods		Lin et al., 2021	Famiglietti, Toppi, et al., 2021	Khan et al., 2020	Rey Martínez et al., 2011	Khan et al., 2021 Khan et al., 2020
		Riva et al., 2021				

		Famiglietti, Gerevini, et al., 2021		Rey Martínez et al., 2011
Systems versus each other's	(Mahon et al., 2022)	Caduff et al., 2014 Autelitano et al., 2023	Famiglietti et al., 2023	Nitkiewicz & Sekret, 2014
	References with a midpoint	References with endpoint		References with endpoint and midpoint

ReCiPe for the analysis of Environmental Footprints combining Eco-indicator and CML (Acero et al., 2015) was highly used among the tested studies with 36%. Also, IMPACT 2002+ is widely used in academia and industry (Jolliet et al., 2003), and Environmental Footprint (EF) package normalization and weighting was discussed and developed by the Directorate General for the Environment (DG ENV) in 2018 (European Commission. Joint Research Centre., 2018), each method was used by three studies only (accounting for 8%).

Some of these LCIA methods used the endpoint perspective at intermediate stages of cause-effect chains, focusing on specific environmental stressors, such as GHG gas and acidification. However, others employed the endpoint method where evaluation was carried out at the outcomes such as human health or ecosystem quality. Interestingly, some studies chose to use both approaches, the midpoint, and the endpoint. The proposed midpoint-to-endpoint weighting set was primarily intended to draw attention to the relative significance of midpoint indicators with the influence categories they have on endpoints.

3. ENVIRONMENTAL IMPACT ASSESSMENT

The performance of domestic HP using LCA was studied over the last two decades in 36 journal articles distinctively in several ways and using different criteria. Some of those studies focused on the effect of refrigerants, other studies focused on the phase that is contributing the most, that is, the usage phase and end-of-life phase of the HP over its lifetime, 75% of the studies presented the COP as a significant indicator for performance evaluation and 64% expressed the FU in terms of thermal energy using different units (kWh, MWh, MJ, or GJ).

According to the seven classifications of heat pump systems presented in this study (Figure 3), environmental impacts such as Global Warming Potential (GWP), Acidification Potential (AP), Eutrophication Potential (EP), and Ozone Depletion were the most reported impact factors, in which some of them were reduced when a conventional system such natural gas furnace, biomass-based, oil-based, bio-oil-based, or condensed gas boilers were replaced by GSHP, GHP, or even in some few cases ASHP. It was concluded in most of the studies that the production and the use phases accounted for the biggest portion of the environmental impact when compared to the other phases (extraction, installation, and end-of-life). Even the most efficient heat pumps equipped with renewable resources discussed by (Autelitano et al., 2023; Famiglietti et al., 2023; Famiglietti, Gerevini, et al., 2021; Famiglietti, Toppi, et al., 2021; Pratiwi & Trutnevyte, 2021; Scharrer et al., 2020; Violante et al., 2022) had a considerable impact on the environment such as Water Use (WU), Land Use (LU) in case of hydropower generation, wind turbine, or solar photovoltaic PV panels.

4. LIMITATIONS

Lacking consistency in the methodology (LCIA), form, input of parameters (COP, SCOP, EER, ...), and many others made the comparison of the 36 articles of this review from all aspects impossible. Studying the SCOP of heat pumps is crucial as it provides insights into their overall energy efficiency,

guiding optimization efforts in design, operation, and control strategies. Additionally, understanding SCOP provides informed decisions about system performance and cost-effectiveness when considering heat pump installations.

Dissimilarities in functional units and LCA boundaries led to divergent conclusions about the environmental impact of heat pumps. Moreover, insufficient information was observed about several significant factors such as the geographical area (e.g. climate conditions), the type of refrigerants used, electricity source, electricity mix, and their change over time. In fact, the variation of the electricity mix in a residential building highly affects the LCA outcomes (Bayer et al., 2012) (Pei et al., 2022). By understanding the sources of electricity generation, we can assess environmental footprint, predict energy costs, and inform policies to promote sustainability and energy security. All these factors were not adequately addressed in the LCA studies in which many of them were missing. As consistency and reliability of HPs are achieved on the industrial level through the Environmental Product Declaration (EPD), they can be attained as well on the research level through the development and implementation of a standardized LCA template for HP.

5. CONCLUSION

This review suggests that the main methodology for carrying out an LCA for domestic HP in residential buildings needs to be defined in further studies to make a quantitative comparison possible among LCAs of other energy systems such as standardized functional units, typical norms, and measures reflecting the performance of heat pumps and their efficiency such as COP, SCOP, Energy Efficiency Ratio (EER) and LCA system boundaries. A comprehensive methodology for a well-organized LCA for heat pumps should be created and developed that can serve as a practical template for future assessments on heat pumps. This would in turn facilitate well-informed decision-making and sustainable technological advancements in the heating and cooling industry.

6. BIBLIOGRAPHY

- 2019 global status report for buildings and construction. (2019). International Energy Agency : Global Alliance for Buildings and Construction.
- Abusoglu, A., & Sedeeq, M. S. (2013). Comparative exergoenvironmental analysis and assessment of various residential heating systems. *Energy and Buildings*, 62, 268–277. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.03.024>
- Acero, A., Rodriguez, C., & Citroth, A. (2015). *Impact assessment methods in Life Cycle Assessment and their impact categories (1.5.4)*. GreenDelta.
- Amahmoud, A., El Attar, M. M., & Meleishy, A. (2022). The Evolution of Life Cycle Assessment Approach: A Review of Past and Future Prospects. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 992(1), 012002. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/992/1/012002>
- Aresti, L., Florides, G. A., Skaliontas, A., & Christodoulides, P. (2022). Environmental Impact of Ground Source Heat Pump Systems: A Comparative Investigation From South to North Europe. *Frontiers in Built Environment*, 8, 914227. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2022.914227>
- Autelitano, K., Famiglietti, J., Toppi, T., & Motta, M. (2023). Empirical power-law relationships for the Life Cycle Assessment of heat pump units. *Cleaner Environmental Systems*, 10, 100135. <https://doi.org/10.1016/j.cesys.2023.100135>
- Bayer, P., Saner, D., Bolay, S., Rybach, L., & Blum, P. (2012). Greenhouse gas emission savings of ground source heat pump systems in Europe: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(2), 1256–1267. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.09.027>
- Bonamente, E., & Aquino, A. (2017). Life-Cycle Assessment of an Innovative Ground-Source Heat Pump System with Upstream Thermal Storage. *Energies*, 10(11), 1854. <https://doi.org/10.3390/en10111854>
- Caduff, M., Huijbregts, M. A. J., Koehler, A., Althaus, H., & Hellweg, S. (2014). Scaling Relationships in Life Cycle Assessment: The Case of Heat Production from Biomass and Heat Pumps. *Journal of Industrial Ecology*, 18(3), 393–406. <https://doi.org/10.1111/jiec.12122>
- Curran, M. (2016). *Life Cycle Assessment* (p. 8).
- European Commission. Joint Research Centre. (2018). *Development of a weighting approach for the environmental footprint*. Publications Office. <https://data.europa.eu/doi/10.2760/945290>
- Famiglietti, J., Gerevini, L., Spirito, G., Pozzi, M., Dénarié, A., Scoccia, R., & Motta, M. (2021). Environmental Life Cycle Assessment scenarios for a district heating network. An Italian case study. *Energy Reports*, 7, 368–379. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.08.094>

- Famiglietti, J., Toppi, T., Bonalumi, D., & Motta, M. (2023). Heat pumps for space heating and domestic hot water production in residential buildings, an environmental comparison in a present and future scenario. *Energy Conversion and Management*, 276, 116527. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.116527>
- Famiglietti, J., Toppi, T., Pistocchini, L., Scoccia, R., & Motta, M. (2021). A comparative environmental life cycle assessment between a condensing boiler and a gas driven absorption heat pump. *Science of The Total Environment*, 762, 144392. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144392>
- Fava, J. A. (2006). Will the Next 10 Years be as Productive in Advancing Life Cycle Approaches as the Last 15 Years? *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 11(S1), 6–8. <https://doi.org/10.1065/lca2006.04.003>
- Greening, B., & Azapagic, A. (2012). Domestic heat pumps: Life cycle environmental impacts and potential implications for the UK. *Energy*, 39(1), 205–217. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.01.028>
- Guinée, J. B., Heijungs, R., Huppes, G., Zamagni, A., Masoni, P., Buonamici, R., Ekvall, T., & Rydberg, T. (2011). Life Cycle Assessment: Past, Present, and Future. *Environmental Science & Technology*, 45(1), 90–96. <https://doi.org/10.1021/es101316v>
- Jolliet, O., Margni, M., Charles, R., Humbert, S., Payet, J., Rebitzer, G., & Rosenbaum, R. (2003). IMPACT 2002+: A new life cycle impact assessment methodology. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 8(6), 324. <https://doi.org/10.1007/BF02978505>
- Khan, U., Zevenhoven, R., Stougie, L., & Tveit, T.-M. (2021). Prediction of Stirling-Cycle-Based Heat Pump Performance and Environmental Footprint with Exergy Analysis and LCA. *Energies*, 14(24), 8478. <https://doi.org/10.3390/en14248478>
- Khan, U., Zevenhoven, R., & Tveit, T.-M. (2020). Evaluation of the Environmental Sustainability of a Stirling Cycle-Based Heat Pump Using LCA. *Energies*, 13(17), 4469. <https://doi.org/10.3390/en13174469>
- Koroneos, C. J., & Nanaki, E. A. (2017). Environmental impact assessment of a ground source heat pump system in Greece. *Geothermics*, 65, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2016.08.005>
- Lin, H., Clavreul, J., Jeandaux, C., Crawley, J., & Butnar, I. (2021). Environmental life cycle assessment of heating systems in the UK: Comparative assessment of hybrid heat pumps vs. condensing gas boilers. *Energy and Buildings*, 240, 110865. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.110865>
- Lis, A., Warzszak, A., & Gliński, M. (2019). Analysis of a single-family building life cycle – case study. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 362(1), 012140. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/362/1/012140>
- Lozano Miralles, J. A., López García, R., Palomar Carnicero, J. M., & Martínez, F. J. R. (2020). Comparative study of heat pump system and biomass boiler system to a tertiary building using the Life Cycle Assessment (LCA). *Renewable Energy*, 152, 1439–1450. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.12.148>
- Mahon, C., Mediboyina, M. K., Gartland, D., & Murphy, F. (2022). Life cycle assessment of Irish district heating systems: A comparison of waste heat pump, biomass-based and conventional gas boiler. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 24(5), 1437–1451. <https://doi.org/10.1007/s10098-021-02257-y>
- Marinelli, S., Lollo, F., Butturi, M. A., Rimini, B., & Gamberini, R. (2020). Environmental performance analysis of a dual-source heat pump system. *Energy and Buildings*, 223, 110180. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110180>
- Marinelli, S., Lollo, F., Gamberini, R., & Rimini, B. (2019). Life Cycle Thinking (LCT) applied to residential heat pump systems: A critical review. *Energy and Buildings*, 185, 210–223. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.12.035>
- Naumann, G., Schropp, E., & Gaderer, M. (2022). Life Cycle Assessment of an Air-Source Heat Pump and a Condensing Gas Boiler Using an Attributional and a Consequential Approach. *Procedia CIRP*, 105, 351–356. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.02.058>
- Nitkiewicz, A., & Sekret, R. (2014). Comparison of LCA results of low-temperature heat plant using electric heat pump, absorption heat pump, and gas-fired boiler. *Energy Conversion and Management*, 87, 647–652. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.07.032>
- Paris Agreement on climate change. (2024). Council of the European Union. <https://www.consilium.europa.eu/en/policies/climate-change/paris-agreement/>
- Pei, L., Schalbart, P., & Peuportier, B. (2022). Life cycle assessment of a residential building in China accounting for spatial and temporal variations of electricity production. *Journal of Building Engineering*, 52, 104461. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104461>
- Pratiwi, A. S., & Trutnevite, E. (2021). Life cycle assessment of shallow to medium-depth geothermal heating and cooling networks in the State of Geneva. *Geothermics*, 90, 101988. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2020.101988>
- Rey Martínez, F. J., Velasco Gómez, E., Martín García, C., Sanz Requena, J. F., Navas Gracia, L. M., Hernández Navarro, S., Correa Guimaraes, A., & Martín Gil, J. (2011). Life cycle assessment of a semi-indirect ceramic evaporative cooler vs. A heat pump in two climate areas of Spain. *Applied Energy*, 88(3), 914–921. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.08.025>
- Riva, C., Roumpedakis, T. C., Kallis, G., Rocco, M. V., & Karellas, S. (2021). Life cycle analysis of a photovoltaic driven reversible heat pump. *Energy and Buildings*, 240, 110894. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.110894>
- Russo, G., Anifantis, A. S., Verdiani, G., & Mugnozza, G. S. (2014). Environmental analysis of geothermal heat pump and LPG greenhouse heating systems. *Biosystems Engineering*, 127, 11–23. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2014.08.002>
- Scharrer, D., Eppinger, B., Schmitt, P., Zenk, J., Bazan, P., Karl, J., Will, S., Pruckner, M., & German, R. (2020). Life Cycle Assessment of a Reversible Heat Pump–Organic Rankine Cycle–Heat Storage System with Geothermal Heat Supply. *Energies*, 13(12), 3253. <https://doi.org/10.3390/en13123253>
- Sevindik, S., & Spataru, C. (2022). An Integrated Methodology for Scenarios Analysis of Low Carbon Technologies Uptake towards a Circular Economy: The Case of Orkney. *Energies*, 16(1), 419. <https://doi.org/10.3390/en16010419>
- Sevindik, S., Spataru, C., Domenech Aparisi, T., & Bleischwitz, R. (2021). A Comparative Environmental Assessment of Heat Pumps and Gas Boilers towards a Circular Economy in the UK. *Energies*, 14(11), 3027. <https://doi.org/10.3390/en14113027>
- Sustainable Development. (2012). In *Lees' Loss Prevention in the Process Industries* (pp. 2507–2521). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-397189-0.00040-9>
- Taborianski, V. M., & Prado, R. T. A. (2004). Comparative evaluation of the contribution of residential water heating systems to the variation of greenhouse gases stock in the atmosphere. *Building and Environment*, 39(6), 645–652. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2003.12.007>
- Violante, A. C., Donato, F., Guidi, G., & Proposito, M. (2022). Comparative life cycle assessment of the ground source heat pump vs air source heat pump. *Renewable Energy*, 188, 1029–1037. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.02.075>
- Zhai, Y., Zhang, T., Tan, X., Wang, G., Duan, L., Shi, Q., Ji, C., Bai, Y., Shen, X., Meng, J., & Hong, J. (2022). Environmental impact assessment of ground source heat pump system for heating and cooling: A case study in China. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 27(3), 395–408. <https://doi.org/10.1007/s11367-022-02034-z>
- Zhang, T., Zhai, Y., Feng, S., Tan, X., Zhang, M., Duan, L., Shi, Q., Meng, J., & Hong, J. (2022). Does it pay to develop a ground source heat pump system? Evidence from China. *Journal of Environmental Management*, 305, 114378. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.114378>
- Zheng, M., Fang, R., & Yu, Z. (2016). Life Cycle Assessment of Residential Heating Systems: A Comparison of Distributed and Centralized Systems. *Energy Procedia*, 104, 287–292. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.12.049>

Évaluation des performances hygrothermiques des murs en béton de bois sous divers climats

Amer Bakkour*¹, Salah-Eddine Ouldboukhitine¹, Pascal Biwolé¹, and Sofiane Amziane¹

¹ Université Clermont Auvergne, Clermont Auvergne INP, CNRS, Institut Pascal, F-63000 Clermont–Ferrand, France

adresse de l'entité,

*amer.bakkour.95@gmail.com

RESUME. Pour réduire l'impact environnemental des bâtiments, le béton végétal fabriqué à partir d'agrégats renouvelables apparaît comme une solution prometteuse, grâce à ses propriétés isolantes. Cette étude examine numériquement les performances hygrothermiques des murs en bois, composés d'agrégats de bois en tant que charge et d'un liant en ciment, dans différentes conditions climatiques. Pour ce faire, le modèle réduit de transfert de chaleur, d'air et de masse est adopté et implémenté dans le logiciel MATLAB en utilisant la méthode des éléments finis. Les résultats de l'approche de modélisation sont analysés en termes de l'évolution de la température et de l'humidité relative à l'intérieur du mur, ainsi que du risque de condensation. Les conclusions soulignent la capacité du béton biosourcé étudié à réguler de manière efficace les fluctuations de température et d'humidité relative à l'intérieur du mur, ce qui en fait un excellent régulateur hygrothermique.

MOTS-CLÉS : béton bois ; performance hygrothermique ; modélisation.

1. INTRODUCTION

De grands efforts sont actuellement déployés pour minimiser la consommation d'énergie dans les bâtiments et améliorer la qualité de l'air intérieur en incorporant des matériaux de construction présentant des performances hygrothermiques élevées. Les matériaux d'origine végétale montrent un grand potentiel pour des solutions innovantes et efficaces. Ils ont la capacité de réduire considérablement la consommation d'énergie dans les bâtiments grâce à leur faible conductivité thermique et leur forte inertie thermique. De plus, ces matériaux présentent la capacité de réguler à la fois la température intérieure et l'humidité relative, offrant un confort hygrothermique amélioré pour les occupants (Bakkour et al. 2024). Des exemples notables de matériaux de construction d'origine végétale couramment utilisés dans ce contexte comprennent le chanvre (Benkhaled et al. 2021), la paille (Tlajji et al. 2022), le bois (Dias et al. 2022) et le tournesol (Abbas et al. 2020).

Dans ce contexte, le béton à base de bois fait partie d'une catégorie en pleine expansion de matériaux à base végétale. L'objectif de cette étude est d'approfondir la compréhension des performances hygrothermiques des murs en bois-ciment. Un modèle réduit de transfert de chaleur, d'air et de masse (HAM) est adopté et validé à travers des mesures expérimentales menées sur un bâtiment en béton de bois. Cela implique de surveiller les niveaux de température et d'humidité relative à la fois à l'intérieur et à l'extérieur du bâtiment, ainsi qu'à l'intérieur des murs sur une période de 6 mois. Une fois le modèle numérique validé, le comportement hygrothermique du mur en béton de bois est évalué dans divers climats. Les propriétés thermiques du béton en bois, notamment la conductivité thermique, l'effusivité et la diffusivité, sont caractérisées expérimentalement pour fournir des paramètres d'entrée pour le modèle numérique.

2. INVESTIGATION EXPERIMENTALE

Dans cette étude, six spécimens ont été préparés et testés. Le béton de bois utilisé dans cette analyse est un mélange composé d'eau, d'agrégats de bois représentant 80 % du volume du béton, et de ciment Portland ordinaire. Les spécimens ont été divisés en deux groupes en fonction de leurs dimensions géométriques (longueur, largeur et hauteur) (cm) : le Groupe 1 se composait de spécimens cubiques avec des dimensions de (14,9, 14,9, 14,9) cm, tandis que le Groupe 2 comprenait des spécimens parallélépipédiques avec des dimensions de (14,9, 14,9, 4,8) cm, comme illustré dans la Figure 1. Il convient de souligner que la forme parallélépipédique est en réalité une section découpée à partir d'une forme cubique. Les échantillons parallélépipédiques partagent des caractéristiques structurelles et de composition avec les échantillons cubiques, mais diffèrent dans leur géométrie spécifique.

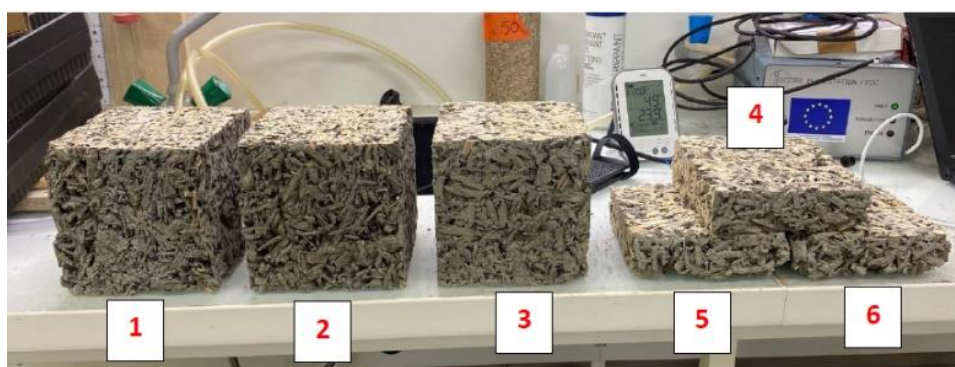


Figure 1 : Composites bois-ciment.

Les propriétés thermiques des composites bois-ciment ont été mesurées dans des conditions humides et sèches. Pour le test humide, les spécimens ont été maintenus à une humidité relative constante d'environ 40 % et une température de 22 °C dans une salle climatisée. En revanche, pour mesurer leurs propriétés dans un état sec, les spécimens ont été conditionnés à 50 °C avec une humidité ambiante de 5 % pendant une période de 3 jours à l'aide d'une chambre sèche. Pour mesurer la conductivité thermique, la diffusivité et l'effusivité thermique des spécimens bois-ciment, le dispositif NeoTIM-FP2C, avec une précision de mesure de 5 %, a été utilisé. Cet appareil s'appuie sur la méthode du fil chaud pour mesurer la conductivité thermique, la méthode de l'anneau chaud pour mesurer la diffusivité thermique, et la méthode du plan chaud pour mesurer l'effusivité thermique. Le fonctionnement de cette sonde à chocs repose sur la génération d'une légère augmentation de température au niveau local du matériau (quelques degrés au-dessus de la température de l'échantillon) et la mesure de cette variation de température dans le temps. Pour garantir la précision, la mesure a été répétée plusieurs fois afin d'obtenir la valeur la plus précise pour chaque propriété thermique.

Le tableau 1 donne la moyenne et l'écart type de la conductivité thermique, de l'effusivité et de la diffusivité thermique des matériaux étudiés. Les mesures expérimentales de la conductivité thermique dans ce travail sont proches de celles réalisées lors de la recherche menée par (Mnasri 2016), qui ont donné une valeur moyenne de $0,185 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, basée sur 20 tests, utilisant la méthode du fil chaud. En comparant les propriétés thermiques des différents bétons à base de plantes, il est clairement observable que les valeurs des propriétés thermiques pour les divers agrégats à base de plantes sont proches. Par exemple, dans une étude menée par (Rahim et al. 2016), les propriétés thermiques des bétons de chanvre et de lin ont été étudiées. L'étude a rapporté que les valeurs de conductivité thermique étaient de 0,123

$W.m^{-1}.K^{-1}$ pour le chanvre et de $0,168 W.m^{-1}.K^{-1}$ pour le lin. De plus, les valeurs d'effusivité thermique ont été trouvées à $256 J.m^{-2}.K^{-1}.s^{-1/2}$ pour le chanvre et à $339 J.m^{-2}.K^{-1}.s^{-1/2}$ pour le lin. Les valeurs de diffusivité thermique ont été déterminées à $2,33 \times 10^{-7} m^2.s^{-1}$ et $2,46 \times 10^{-7} m^2.s^{-1}$ pour les bétons de chanvre et de lin, respectivement.

Propriétés Thermiques	Condition humide		Condition sèche	
	Cubique	Parallélépipédique	Cubique	Parallélépipédique
Conductivité thermique ($W.m^{-1}.K^{-1}$)	$0,146 \pm 0,017$	$0,129 \pm 0,018$	$0,132 \pm 0,027$	$0,118 \pm 0,021$
Effusivité thermique ($J.m^{-2}.K^{-1}.s^{-1/2}$)	303 ± 44	276 ± 41	266 ± 45	248 ± 28
Diffusivité thermique ($m^2.s^{-1}$) ($\times 10^{-7}$)	$4,42 \pm 0,43$	$3,70 \pm 0,56$	$3,72 \pm 0,67$	$3,37 \pm 0,50$

Tableau 1 : Les propriétés thermiques de béton de bois.

En outre, les résultats expérimentaux ont mis en évidence des différences notables entre les valeurs des propriétés thermiques obtenues pour chaque forme d'échantillon. Ces variations pourraient être attribuées à la nature de la surface de l'échantillon, laquelle pourrait influencer sur les mécanismes de transfert de chaleur.

3. INVESTIGATION NUMERIQUE DU COMPORTEMENT HYGROTHERMIQUE DU MUR EN BOIS-CIMENT

3.1. LE MODELE NUMERIQUE

Dans cette étude, le modèle réduit de transfert de chaleur, d'air et de masse (HAM), élaboré par (Benkhaled et al. 2022), est adopté. Le modèle HAM réduit est le fruit d'une analyse de sensibilité paramétrique qui visait à établir des corrélations entre les paramètres hygrothermiques du béton de chanvre et les potentiels de transfert (température T , pression de vapeur P_v et pression totale P). Les paramètres les plus influents (conductivité thermique λ , capacité calorifique spécifique C_p , capacité de stockage d'eau C_m et perméabilité à la vapeur d'eau K_m) ont été identifiés, et les moins influents ont été éliminés. Le modèle HAM simplifié est décrit comme suit :

$$C_p \rho_s \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div}[\lambda \nabla T] + L_v \rho_s C_m \frac{\partial P_v}{\partial t} \quad (1)$$

$$\rho_s C_m \frac{\partial P_v}{\partial t} = \text{div}[K_m \nabla P_v] \quad (2)$$

où :

C_p ($J.kg^{-1}.K^{-1}$) est la capacité calorifique spécifique,

ρ_s ($kg.m^{-3}$) est la masse volumique,

λ ($W.m^{-1}.K^{-1}$) est la conductivité thermique,

$L_v = 2,5 \times 10^6$ ($J.kg^{-1}$) est la chaleur latente,

$C_m = (\partial \omega / \partial \phi) \cdot (1/P_{vsat})$ ($kg.kg^{-1}.Pa^{-1}$) est la capacité de stockage d'humidité,

ϕ (%) est l'humidité relative,

ω ($kg.kg^{-1}$) est le teneur en eau dans le matériau, et

K_m ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{Pa}^{-1}$) est la perméabilité totale à l'humidité.

Le choix du modèle HAM réduit réside dans sa simplicité en termes de paramètres d'entrée facilement déterminables. Bien que plusieurs modèles aient été récemment développés pour prédire les performances des enveloppes de construction d'origine végétale, leur complexité découle du grand nombre de paramètres d'entrée et de la connaissance limitée des propriétés intrinsèques des matériaux biosourcés, ce qui rend la mise en œuvre de ces modèles difficile.

L'objectif est de valider la fiabilité de ce modèle pour le béton de bois et d'évaluer ses performances hygrothermiques dans différentes conditions climatiques.

3.2. RESOLUTION D'EQUATIONS : METHODE DES ELEMENTS FINIS

Pour résoudre les équations couplées liées au modèle HAM réduit, le logiciel MATLAB a été sélectionné. Ce logiciel permet une meilleure visualisation des paramètres et offre une plus grande liberté de programmation. La méthode des éléments finis est utilisée pour résoudre les équations aux dérivées partielles. Cette approche permet d'obtenir des résultats précis et fiables pour notre problème de transfert de chaleur et de masse. Le modèle défini dans les équations (1) et (2) peut être écrit, respectivement, sous la forme matricielle compacte suivante :

$$[C_1]\{\dot{T}\} + [K_1]\{T\} = [C_2]\{\dot{P}_v\} \quad (3)$$

$$[C_3]\{\dot{P}_v\} + [K_2]\{P_v\} = \mathbf{0} \quad (4)$$

où les matrices élémentaires peuvent être calculées comme suit : $[C_1^e] = \rho C_p \Delta x \begin{bmatrix} \frac{1}{3} & \frac{1}{6} \\ \frac{1}{6} & \frac{1}{3} \end{bmatrix}$, $[K_1^e] = \frac{\lambda}{\Delta x} \begin{bmatrix} \mathbf{1} & -\mathbf{1} \\ -\mathbf{1} & \mathbf{1} \end{bmatrix}$, $[C_2^e] = L_v \rho C_m \Delta x \begin{bmatrix} \frac{1}{3} & \frac{1}{6} \\ \frac{1}{6} & \frac{1}{3} \end{bmatrix}$, $[C_3^e] = \rho C_m \Delta x \begin{bmatrix} \frac{1}{3} & \frac{1}{6} \\ \frac{1}{6} & \frac{1}{3} \end{bmatrix}$, $[K_2^e] = \frac{K_m}{\Delta x} \begin{bmatrix} \mathbf{1} & -\mathbf{1} \\ -\mathbf{1} & \mathbf{1} \end{bmatrix}$, et Δx est la taille de pas spatial.

Pour l'ensemble du système, les matrices globales peuvent être écrites comme suit : $[C_1] = \sum_e [C_1^e]$, $[K_1] = \sum_e [K_1^e]$, $[C_2] = \sum_e [C_2^e]$, $[K_2] = \sum_e [K_2^e]$, $[C_3] = \sum_e [C_3^e]$.

Enfin, les équations couplées sont discrétisées en temps en utilisant le schéma d'intégration du temps (schéma- θ) qui a une valeur varie de 0 à 1. Dans cette étude, la valeur de θ est systématiquement fixée à 1. Ce choix spécifique est fait pour obtenir un schéma implicite et garantir que la solution reste stable sans aucune restriction conditionnelle.

3.3. VALIDATION NUMERIQUE

Pour valider le modèle, des campagnes de surveillance ont été menées sur un immeuble de bureaux d'un seul étage situé à Lyon, en France. L'enveloppe du bâtiment est constituée de murs en bois-ciment d'une épaisseur de 30 cm. Les conditions de température et d'humidité relative intérieures et extérieures, ainsi que celles à l'intérieur des murs en béton bois-ciment, sont enregistrées sur une base horaire pendant une période de 6 mois, du 20 avril 2023 au 20 octobre 2023.

Les propriétés thermiques caractérisées dans la section précédente offrent des données pour la validation du modèle sur le béton de bois. Nous considérons la valeur moyenne entre les formes cubiques et parallélépipédiques dans des conditions humides. La capacité thermique (C_p) a été dérivée de la conductivité thermique et de l'effusivité à l'aide de la formule $E = \sqrt{(\rho \cdot C_p \cdot \lambda)}$. Comme il existe des informations limitées sur la perméabilité à la vapeur d'eau et la capacité de stockage d'eau du béton à

agrégats de bois et de ciment dans la littérature, les valeurs de la capacité d'absorption d'eau C_m et de la perméabilité à la vapeur d'eau K_m sont supposées être les mêmes que celles utilisées dans l'étude numérique menée par (Benkhaled et al. 2022) sur le béton biosourcée. Le tableau 2 résume les paramètres hygrothermiques d'entrée utilisés dans cette validation numérique.

ρ_s (kg.m^{-3})	λ ($\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$)	C_p ($\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$)	C_m ($\text{kg.kg}^{-1}.\text{Pa}^{-1}$)	K_m ($\text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}.\text{Pa}^{-1}$)
612	0,14	1007	$3,7 \times 10^{-6}$	6×10^{-10}

Tableau 2 : Les paramètres d'entrée utilisés dans la validation numérique.

Dans cette étude, le flux de chaleur (q) et le flux de masse (g) ont été appliqués comme conditions aux limites de la manière suivante :

$$q = h_c(T_{air} - T_{surf}) \quad (5)$$

$$g = h_m(P_{v,air} - P_{v,surf}) \quad (6)$$

La simulation est effectuée avec un nombre de nœuds de 100 et un pas de temps d'une heure. Les figures 2 et 3 présentent les résultats expérimentaux et simulés moyennés sur une journée, montrant la température et l'humidité relative au milieu de la paroi 'nord'.

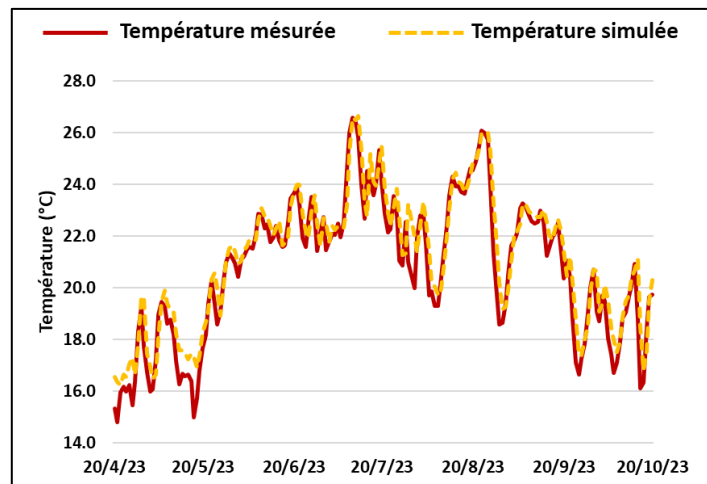


Figure 2 : Les résultats simulés et mesurés de la température au milieu de la paroi nord.

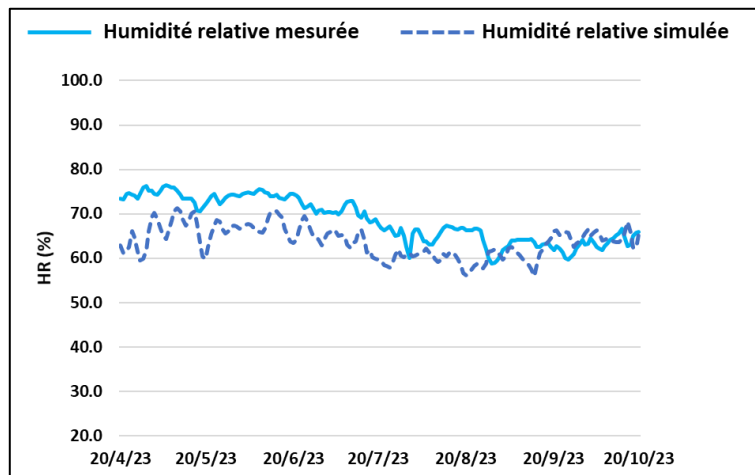


Figure 3 : Les résultats simulés et mesurés de l'humidité relative au milieu de la paroi nord.

Le modèle HAM réduit implémenté dans MATLAB génère des résultats presque similaires aux mesures in situ du bâtiment en béton bois-ciment pour les conditions météorologiques étudiées. En termes de température, les valeurs tracées correspondent bien aux valeurs mesurées au milieu de la paroi. De plus, le modèle restitue de manière globalement correcte l'évolution de l'humidité dans la paroi. L'erreur relative (ER) calculée pour la température et l'humidité relative est de 3,21 % et 8,06 % respectivement. L'erreur quadratique moyenne (RMSE) calculée est de 0,84 °C et 6,54 % pour T et RH respectivement.

Ces valeurs démontrent un fort accord entre les résultats numériques et les mesures expérimentales. Le modèle réduit peut donc être utilisé pour prédire les performances hygrothermiques des murs en bois-ciment sous divers climats avec différentes conditions aux limites.

4. CLIMATS ETUDIÉS

Après avoir validé avec succès le modèle, les performances hygrothermiques du mur en bois-ciment sont évaluées sous différentes conditions climatiques. La même configuration de mur en béton bois-ciment (avec une épaisseur de 30 cm) est adoptée. Deux villes ont été sélectionnées en se basant sur la classification de Köppen-Geiger (Kottek et al. 2006), représentant chacune des climats extrêmement divers avec des profils de température et d'humidité relative différents. Les villes sélectionnées sont Toronto, Canada (climat continental humide à étés chauds Dfb); et Caire, Égypte (climat désertique aride BWh). La Figure 4 présente la température et l'humidité relative pour ces climats sélectionnés.

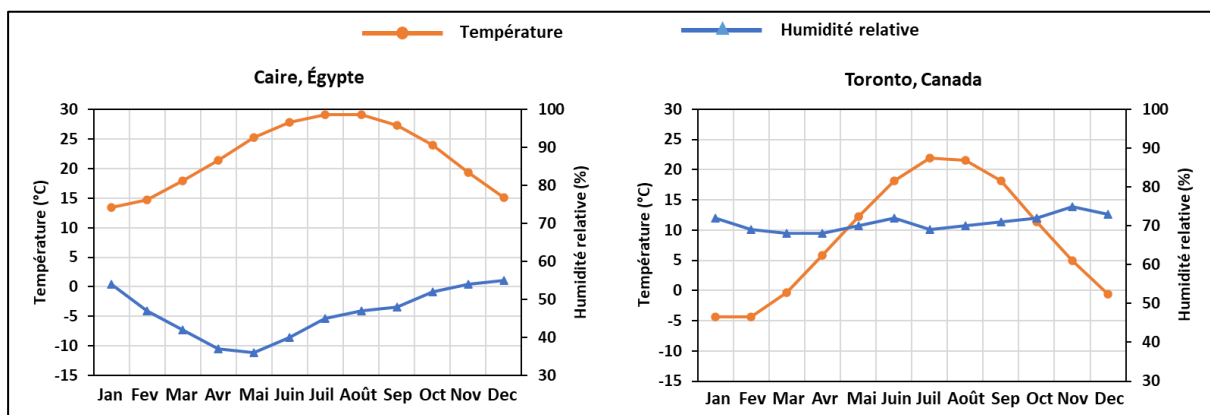


Figure 4 : Les valeurs moyennes de la Température et de l'humidité relative.

Les valeurs de température de l'air intérieur et d'humidité relative sont choisies en fonction de l'utilisation attendue du bâtiment, conformément aux recommandations de la norme internationale NF EN 16798-1. Ainsi, la température intérieure varie de 19 °C en hiver à 24 °C en été, avec une humidité relative intérieure variant entre 40 % (en hiver) et 60 % (en été).

4.1. ÉVOLUTION DE LA TEMPERATURE AU MILIEU DU MUR

Afin d'illustrer l'importance du mur en bois-ciment dans le maintien du confort thermique, en particulier pendant la saison estivale, la simulation couvre une durée de 36 heures, centrée spécifiquement sur les journées du 15 et 16 août en Égypte, où les températures extérieures sont généralement très élevées en été. La Figure 5 illustre l'évolution de la température extérieure et au centre du mur pour l'Égypte.

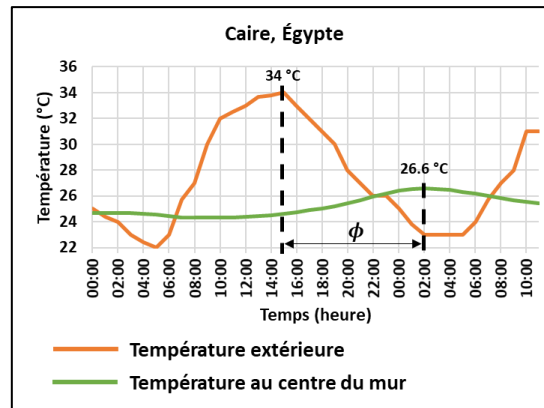


Figure 5 : Évolution de la température extérieure et de la température au milieu du mur pour Le Caire les 15 et 16 août.

Le 15 août, une différence de température notable est évidente entre la température extérieure et la position centrale du mur. La température atteint son maximum à 15 heures, enregistrant une valeur de 34 °C. Cependant, la valeur maximale de température prédite au centre du mur est de 26,6 °C. En plus, un décalage de phase d'environ 11 heures est observé, avec un taux d'amortissement d'environ 19 %. Grâce à l'inertie thermique du mur en bois-ciment, les pics de température observés au centre du mur en bois se produisent lorsque la température extérieure diminue, notamment la nuit. Cette propriété thermique contribue à atténuer le chauffage excessif pendant l'été.

4.2. ÉVOLUTION DE L'HUMIDITE RELATIVE AU MILIEU DU MUR

Pour fournir une illustration claire de la capacité de contrôle de l'humidité des murs en bois, l'évolution horaire de l'humidité relative sur une période d'un mois est effectuée. Pour ce faire, deux mois distincts sont délibérément sélectionnés : février et août (Figure 6). Le premier a été choisi pour représenter les conditions froides de l'hiver, où des baisses significatives de température extérieure entraînent des niveaux élevés d'humidité relative. Le dernier a été choisi pour illustrer les conditions chaudes et humides.

Pendant le mois chaud, l'humidité relative au centre du mur fluctue autour de 60 % pour Le Caire. Cependant, pendant le mois plus froid, les profils d'humidité relative pour Toronto montrent une augmentation lorsque la température au centre atteint son minimum d'environ 2 °C. La température extérieure dans cette ville peut descendre jusqu'à -17 °C en février.

En général, il est à noter que pendant la nuit, l'humidité relative extérieure atteint ses valeurs maximales, tandis que pendant la journée, elle diminue. Cependant, la position centrale maintient un niveau d'humidité relative relativement stable pendant toute la durée, démontrant la capacité du béton bois-ciment à réguler l'humidité à l'intérieur du mur.

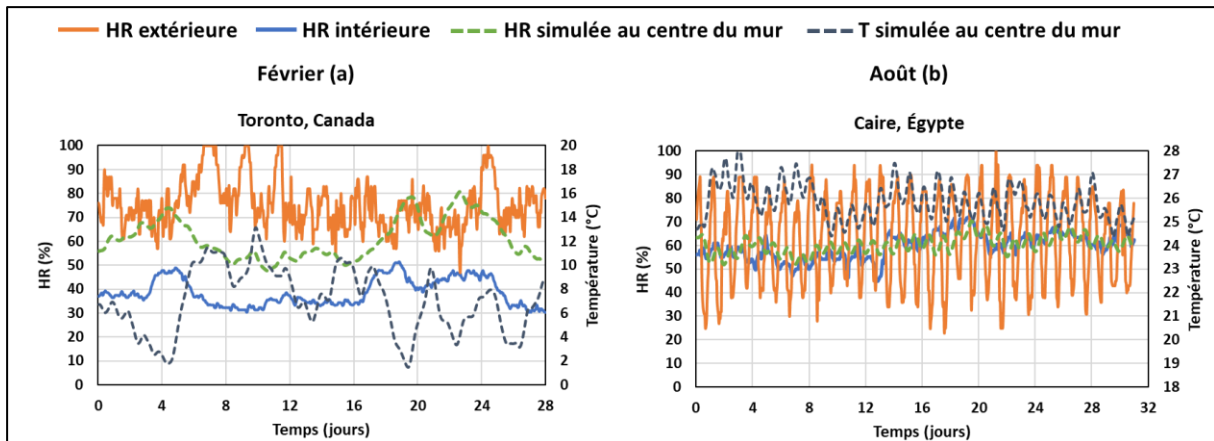


Figure 6 : Évolution de l'humidité relative au milieu du mur pour février (a) et août (b).

Lors de l'étude de l'évolution de l'humidité relative à l'intérieur du mur, il est également important d'examiner le risque de condensation de l'eau. Lorsque la pression de vapeur (P_v) à l'intérieur du mur atteint ou dépasse la pression de vapeur de saturation (P_{vs}) à une température donnée, l'humidité se condense en eau liquide.

À cette fin, le mois critique choisi pour cette étude est février. L'évolution de la pression de vapeur et de la pression de vapeur saturée sur toute l'épaisseur, de l'intérieur vers l'extérieur, du mur en bois-ciment au cours de ce mois est présentée dans la Figure 7.

L'analyse du mur en bois n'a révélé aucun risque de condensation dans aucun des endroits considérés. La pression de vapeur est constamment située en dessous de la pression de vapeur saturée.

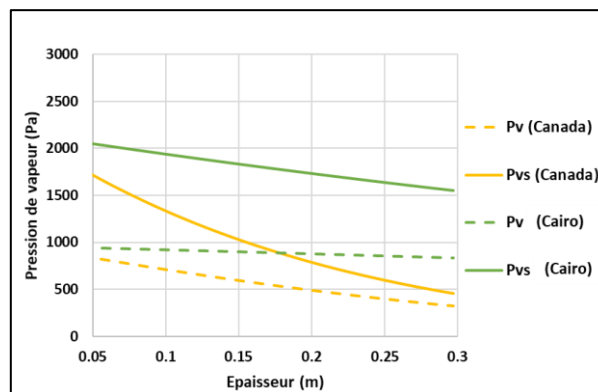


Figure 7 : Évaluation du risque de condensation sur toute l'épaisseur pendant le mois de février.

5. CONCLUSION

Les résultats de simulation de la température (T) et de l'humidité relative (HR) pour le mur en bois-ciment ont montré une concordance très proche avec les données mesurées. Ceci met en évidence la capacité du modèle HAM réduit à reproduire de manière précise les performances hygrothermiques des murs en bois. En étudiant la performance sous divers climats, le béton en bois a démontré son efficacité dans la régulation de l'humidité et la fourniture d'isolation thermique. Il peut minimiser dans une large mesure les fluctuations de T et d'HR.

6. REMERCIEMENT

Les auteurs tiennent à exprimer leur appréciation au Conseil Départemental de l'Allier et à l'Institut Carnot (MECD) pour avoir fourni le soutien financier nécessaire à la réalisation de ce travail.

7. BIBLIOGRAPHIE

- Abbas, Mohamed Said, Fionn McGregor, Antonin Fabbri, et Mohammed Yacine Ferroukhi. 2020. « The Use of Pith in the Formulation of Lightweight Bio-Based Composites: Impact on Mechanical and Hygrothermal Properties ». *Construction and Building Materials* 259: 120573.
- Bakkour, Amer, Salah-Eddine Ouldboukhitine, Pascal Biwole, et Sofiane Amziane. 2024. « A review of multi-scale hygrothermal characteristics of plant-based building materials ». *Construction and Building Materials* 412: 134850. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134850>.
- Benkhalel, Maroua, Salah-Eddine Ouldboukhitine, Amer Bakkour, et Sofiane Amziane. 2021. « A 1D Model for Predicting Heat and Moisture Transfer through a Hemp-Concrete Wall Using the Finite-Element Method ». *Materials* 14 (22): 6903. <https://doi.org/10.3390/ma14226903>.
- Benkhalel, Maroua, Salah-Eddine Ouldboukhitine, Amer Bakkour, et Sofiane Amziane. 2022. « Sensitivity Analysis of the Parameters for Assessing a Hygrothermal Transfer Model HAM in Bio-Based Hemp Concrete Material ». *International Communications in Heat and Mass Transfer* 132: 105884. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2022.105884>.
- Dias, Sara, António Tadeu, João Almeida, Pedro Humbert, Julieta António, Jorge de Brito, et Pedro Pinhão. 2022. « Physical, Mechanical, and Durability Properties of Concrete Containing Wood Chips and Sawdust: An Experimental Approach ». *Buildings* 12 (8): 1277. <https://doi.org/10.3390/buildings12081277>.
- Kotteck, Markus, Jürgen Grieser, Christoph Beck, Bruno Rudolf, et Franz Rubel. 2006. « World Map of the Köppen-Geiger Climate Classification Updated ». *Meteorologische Zeitschrift* 15 (3): 259-63. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2006/0130>.
- Mnasri, F. 2016. « Etude du transfert de chaleur et de masse dans les milieux complexes: application aux milieux fibreux et à l'isolation des bâtiments ». Thèse de doctorat, Université de Lorraine.
- Rahim, M., O. Douzane, A. D. Tran Le, et T. Langlet. 2016. « Effect of Moisture and Temperature on Thermal Properties of Three Bio-Based Materials ». *Construction and Building Materials* 111: 119-27. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.061>.
- Tlajji, Ghadie, Salah Ouldboukhitine, Fabienne Pennec, et Pascal Biwole. 2022. « Thermal and Mechanical Behavior of Straw-Based Construction: A Review ». *Construction and Building Materials* 316: 125915. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125915>.

Perspectives et opportunités pour le développement d'un isolant biosourcé à base de fibres de choca et de plâtre recyclé.

Julie Bascaules*^{1,2,3}, Olivier Marc¹, Laetitia Adelard¹, Chadi Maalouf², Hélène Caillet¹

¹ Laboratoire Physique et Ingénierie Mathématique pour l'Energie, l'environnement et le bâtiment (PIMENT). Université de La Réunion, 40 avenue de Soweto, 97410 Saint-Pierre, La Réunion.

² Laboratoire MATériaux et Ingénierie Mécanique (MATIM). Université de Reims, Chemin des Rouliers Campus Moulin de la Housse, 51100 Reims.

³ ADEME, Agence de la transition écologique. 20 Av. du Grésillé, 49004 Angers.

*julie.bascaules@univ-reunion.fr

RESUME. L'association de fibres de Furcraea foetida et de plâtre recyclé permet de répondre à plusieurs problématiques, à savoir, le recyclage du plâtre localement, la lutte contre une espèce invasive et la diminution des importations d'isolants à forte empreinte carbone. L'objectif de cet article est de présenter une analyse de l'état de l'art sur les problématiques de gestion de plâtre (ii), de Furcraea foetida (iii), et d'isolation à La Réunion (iv), ainsi que sur les solutions de valorisations possibles. Nous nous concentrerons ensuite sur la bibliographie d'un isolant à base de plâtre recyclé (v) et de fibres de Furcraea foetida (vi) en prenant en compte la préparation et la fabrication des matières premières. Si les conditions de production du plâtre recyclé sont déjà établies, des expérimentations doivent encore être menées à La Réunion pour en améliorer la qualité. Pour la fibre de Furcraea foetida, bien que des caractéristiques thermiques initiales aient été établies, il est crucial de définir un protocole précis de préparation pour maximiser rendement et propriétés thermiques.

MOTS-CLÉS : isolant biosourcé, fibre végétale, plâtre recyclé.

ABSTRACT. The combination of Furcraea foetida fibers and recycled gypsum offers solutions to several issues, namely, the local recycling of gypsum, combating an invasive species, and reducing the importation of insulating materials with high carbon footprints. The aim of this article is to present an analysis of the state of the art concerning the issues of gypsum management (ii), Furcraea foetida (iii), and insulation in Reunion Island (iv), as well as possible valorization solutions. We will then focus on the bibliography of an insulator made from recycled gypsum (v) and Furcraea foetida fibers (vi), taking into account the preparation and manufacturing of raw materials. While the production conditions for recycled gypsum are already established, further experiments must still be conducted in Reunion to improve its quality. For Furcraea foetida fibers, although initial thermal characteristics have been established, it is crucial to define a precise preparation protocol to maximize yield and thermal properties.

KEYWORDS : bio-based insulator, plant fiber, recycled plaster.

1. INTRODUCTION

Située dans l'Océan Indien, l'île de La Réunion est reconnue pour sa riche biodiversité et ses divers écosystèmes, allant des littoraux aux reliefs montagneux. Cette île française (Département et Région d'Outre-Mer - DROM) fait face à des défis environnementaux importants, accentués par son isolement géographique et les effets du changement climatique. La croissance démographique de La Réunion induit une expansion de la construction de bâtiments. La climatisation représente 40% de la consommation électrique globale de l'île. Face aux enjeux du réchauffement climatique, l'isolation des bâtiments est un levier important pour maîtriser la consommation. Les isolants minéraux, telle que la laine de roche, sont importés et largement utilisés. Ils possèdent donc une forte empreinte carbone. Dans ce contexte, les isolants biosourcés permettraient de répondre aux enjeux du territoire. A l'instar du chanvre en métropole, le développement d'un matériau composite à base de fibres de choca vert (*Furcraea Foetida*) pourrait être une solution. Cette espèce a été définie comme une plante envahissante à partir du 19^{ème} siècle, et reste à ce jour non valorisée. Des premières études ont mis en avant la capacité d'isolation de la fibre de choca en vrac (Caillet et al. 2023). En parallèle, les déchets de plâtre sont majoritairement enfouis. Un centre de valorisation de déchets, permettant de transformer le plâtre en matière première secondaire, a été mis en place à La Réunion depuis 2014. Cette matière pourrait être intégrée dans l'élaboration de nouveaux matériaux isolants composites de second-œuvre.

Cet article propose un état de l'art qui explore ces trois dimensions à La Réunion : la gestion durable des déchets, la lutte contre une espèce invasive, et le développement d'isolants thermiques biosourcés. À travers une revue bibliographique approfondie, l'objectif est de mettre en lumière les recherches récentes, afin d'évaluer les stratégies actuelles de gestion et de valorisation, et d'identifier les verrous scientifiques de développement d'un isolant à partir de fibres de *Furcraea foetida* et de plâtre recyclé.

2. GESTION DURABLE DES DECHETS DE PLATRE DANS LE SECTEUR DU BTP

Le secteur du Bâtiment et des Travaux Publics (BTP) en France totalise 224 millions de tonnes de déchets. Parmi eux, le plâtre est un déchet classé comme non dangereux et non inerte. Issus principalement des chutes de découpe de plaques neuves ainsi que des opérations de rénovation, de démolition ou de déconstruction selon le SEDDRé, le plâtre représente un défi spécifique dans le cadre de l'économie circulaire en raison de sa capacité à absorber l'humidité, à durcir lorsqu'il est mélangé avec de l'eau, à devenir fragile une fois sec et à contenir éventuellement des contaminants.

Dans le cadre de l'engagement en faveur de la croissance verte (2020), 66 000 tonnes de plâtre recyclé ont été répertoriées en 2014. En 2016, la filière plâtre s'est fixée des objectifs visant à valoriser 70% (environ 250 000 tonnes sur un total de 400 000 tonnes de déchets de plâtre) de l'ensemble des déchets de plâtre d'ici 2020. En 2022, selon le Syndicat National des Industries du Plâtre (SNIP), le volume réellement recyclé était de 164 500 tonnes. Suite à ce constat, l'arrêté du 10 juin 2022 portant sur le cahier des charges des éco-organismes, des systèmes individuels et des organismes coordonnateurs de la filière à responsabilité élargie du producteur des produits et matériaux de construction du secteur du bâtiment vise un objectif de recyclage du plâtre à hauteur de 37% d'ici 2027.

A La Réunion, la gestion des déchets est confrontée à des défis logistiques et environnementaux accentuant la problématique, et nécessitant des stratégies adaptées pour le recyclage et la valorisation. La CERBTP (Cellule Economique du Bâtiment et des Travaux Publics de La Réunion) a estimé que le

secteur du bâtiment produit environ 4 000 t de déchets de plâtre par an. En 2017, 70% des déchets de plâtre sont enfouis, tandis que seulement 15% sont recyclés, et 15% sont non captés par les installations connus. Le centre de valorisation de Pierrefonds STS (Sud Traitement Services) constitue le seul site capable de recycler localement du plâtre. Son objectif de traitement est de traiter 100% des déchets de plâtre de La Réunion afin de réduire l'enfouissement et l'importation de gypse.

3. GESTION DU *FURCRAEA FOETIDA*, ESPECE ENVAHISSANTE A LA REUNION

Furcraea foetida, aussi connu sous le nom de choca vert à La Réunion, est une espèce de plante succulente pérenne originaire d'Amérique centrale. Caractérisée par sa grande hampe florale qui peut s'élever à plusieurs mètres et par ses longues feuilles de couleur vert vif terminées par une épine brune, cette plante se reproduit principalement de manière végétative à travers des bulbilles. Cette méthode de reproduction facilite sa dissémination rapide, contribuant ainsi à son caractère invasif.



Figure 1 : Photos de *Furcraea foetida* et de sa hampe florale (Photo : Jardin botanique Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, CC BY-SA 4.0).

Introduite sur l'île de La Réunion avant 1825 initialement pour la production de cordages, *Furcraea foetida* est devenue une menace significative pour les sous-bois des forêts semi-sèches indigènes, où elle forme des peuplements denses qui entravent la régénération naturelle des espèces locales (Sarrailh, Madaule, et Rivière 2008). Un inventaire non exhaustif en 2019 a montré la répartition des principaux individus dans l'île (Fenouillas 2021). L'envahissement par le *Furcraea foetida* constitue une menace écologique majeure à La Réunion. La lutte contre cette espèce implique une combinaison de méthodes manuelles, chimiques, mécaniques, et des initiatives de sensibilisation et d'éducation du public.

L'une des approches les plus directes pour contrôler le choca vert est l'élimination manuelle et mécanique (Hivert et Oudin 2020). L'arrachage manuel et la coupe des hampes florales constituent les principales méthodes de gestion, nécessitant un effort collectif important et un suivi régulier pour empêcher la repousse de la plante. Ces méthodes ont montré une certaine efficacité, comme en témoigne l'éradication en cours de *Furcraea foetida* sur l'île Europa. Cependant, à La Réunion, l'éradication à grande échelle reste complexe en raison de la diversité des habitats affectés et de la nécessité d'une intervention humaine soutenue (Triolo 2016). L'Office National des Forêts (ONF) à La Réunion a mené un projet ambitieux de lutte contre le choca vert, couvrant une superficie de 38 hectares entre 2004 et 2013 dans des reliques de forêts sèches. Ce travail a inclus l'arrachage manuel des plantes et la coupe des hampes florales, une méthode reconnue pour son efficacité bien qu'elle exige un investissement significatif en termes de main-d'œuvre et de suivi régulier. Le programme européen Life+Corexerun (2009-2014) (Thueux 2015) et le projet LIFE+Forêt Sèche ont adopté diverses approches. Une

intervention manuelle, qui implique la coupe des tiges et des rosettes de feuilles de cette plante, a été suivie d'une application ciblée d'un herbicide à base de glyphosate directement dans la tige pour garantir une éradication efficace. Néanmoins, elle requiert une gestion et une surveillance méticuleuses pour prévenir les effets indésirables sur l'environnement. Finalement, l'arrachage complet est considéré comme la méthode la plus efficace pour contrôler cette espèce envahissante et restaurer les écosystèmes touchés par sa présence. Bien que l'éradication du choca vert nécessite des efforts conséquents et une vigilance constante, ces méthodes d'intervention manuelle et mécanique se révèlent cruciales pour le contrôle efficace de cette espèce invasive et la préservation de la biodiversité des milieux qu'elle affecte. Les feuilles coupées peuvent être laissées à même le sol ou récupérées à des fins de valorisation.

Malgré les défis posés par son invasion, *Furcraea foetida* présente un potentiel de valorisation notable grâce à la robustesse de ses fibres. Leur diamètre moyen varie entre 142 et 181 μm , et elles s'étendent sur toute la longueur des feuilles, permettant ainsi d'obtenir des fibres de grande longueur, pouvant atteindre jusqu'à 2 m. Historiquement utilisées dans la fabrication de cordages, ces fibres possèdent une résistance mécanique élevée utilisées pour des applications industrielles, notamment dans les matériaux composites (Haja Syed Hussain et al. 2023), les textiles techniques et l'isolation biosourcée (Caillet et al. 2023). Dans cette dernière étude, la conductivité thermique de fibres en vrac, avec une densité de 0,022, a été mesurée à 0,066 W/m.K. A titre de comparaison, le chanvre en vrac, affiche une conductivité thermique de 0,076 W/m.K lorsqu'il a une densité de 0,018. La densité en vrac des fibres conditionnées influence directement la conductivité thermique ; ainsi, une densité en vrac plus élevée pourrait améliorer les propriétés isolantes du matériau. Ainsi, avec une densité de 0,085, le chanvre en vrac atteint une conductivité de 0,04 W/mK. Cette observation souligne des perspectives prometteuses pour l'isolation à base de fibres de *Furcraea foetida*, en particulier si une densité supérieure est obtenue. L'utilisation de ces matériaux ne se limite pas donc seulement à la gestion de l'espèce invasive *Furcraea foetida* ; elle propose également des alternatives durables aux matériaux traditionnels non renouvelables utilisés dans l'industrie de l'isolation. Leurs fibres peuvent être transformées en plusieurs produits innovants tels que des panneaux composites pour l'isolation des murs, des doublages de parois pour améliorer les performances thermiques des bâtiments, ou encore des parois multicouches pour une isolation efficace tout en contribuant à la régulation de l'humidité intérieure. Pour cela, les performances thermiques sont cruciales afin d'assurer une efficacité énergétique optimale dans les bâtiments. Des facteurs clés tels que la perméabilité à la vapeur, la capacité thermique spécifique, et la conductivité thermique, dont les valeurs doivent se situer en dessous de 0,065 W/m.K pour les laines minérales (syndicat national des fabricants d'isolants en laines minérales manufacturées), jouent un rôle déterminant dans l'évaluation de l'efficacité d'un isolant. Ces paramètres sont essentiels pour optimiser la régulation thermique et l'humidité au sein des structures.

4. L'ISOLATION THERMIQUE A LA REUNION : DEFIS ET PERSPECTIVES

La Réunion, située à plus de 9 300 km de la France hexagonale, est confrontée à des défis en matière d'isolation thermique en raison de son climat tropical humide (température 30°C et humidité 80%) et de sa situation géographique isolée. L'importation de matériaux traditionnels tels que la laine de roche, malgré leur efficacité, soulève des préoccupations environnementales et économiques majeures. Leur fabrication, transport et élimination contribuent à une empreinte carbone élevée. Par exemple, d'après la base de l'INIES, l'impact environnemental de 1 m² de laine de roche FGD MAX C2 pour 160 mm

d'épaisseur durant toute sa durée de vie est de 31,5 kg CO₂. Les matériaux non biosourcés posent des défis en termes de gestion des déchets à la fin de leur vie. Ils sont largement enfouis et contribuent aux émissions de gaz à effet de serre. La dépendance de La Réunion aux importations augmente la sensibilité de l'île aux fluctuations des coûts de transport et aux politiques commerciales internationales (Pacheco-Torgal et Jalali 2012). Comme le démontre l'Agence Qualité Construction AQC et Conseils d'Architecture d'Urbanisme et de l'Environnement CAUE, les isolants peuvent rencontrer des problèmes de performance, notamment en raison de la condensation liée à un climat tropical humide, altérant leurs propriétés thermiques et mécaniques. Leur exposition à l'humidité peut entraîner la formation de moisissures, nuisibles à la qualité de l'air intérieur et à la santé. Cette étude met en avant l'importance de considérer des matériaux locaux adaptés aux conditions climatiques de l'île. La production de matières biosourcées, comme le choca vert, réduirait la dépendance aux importations et permettrait à La Réunion de réduire son empreinte carbone et de promouvoir une construction plus responsable et durable (Grigoletto et Courard 2018).

5. LA FABRICATION DU PLÂTRE RECYCLE

Il existe aujourd'hui un consensus général sur le recyclage du plâtre, démontrant la viabilité du recyclage complet des déchets de plâtre pour la production de nouveaux matériaux de construction, soutenant ainsi les objectifs de durabilité dans le secteur. Cependant, le protocole spécifique et les paramètres de traitement peuvent varier en fonction des caractéristiques des déchets de plâtre et des exigences du produit final.

Tout d'abord la collecte permet de rassembler les déchets de plâtre. Le nettoyage permet l'élimination des impuretés et des matériaux non gypseux tels que les vis, les supports métalliques, et le papier de doublure. Puis, le broyage réduit les déchets de plâtre en une poudre fine pour faciliter le traitement ultérieur. La deuxième étape du processus est la calcination. Les déchets de plâtre broyés sont chauffés à une température spécifique (entre 125 °C et 180 °C) pour éliminer l'eau cristalline et obtenir le hémihydrate de calcium ou bassanite ($\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$) (Geraldo et al. 2017). La température et le temps de chauffage doivent être soigneusement contrôlés pour éviter la production de phases anhydres qui pourraient affecter la qualité du plâtre recyclé. La troisième étape consiste à réhydrater et formuler le plâtre. Il est ainsi mélangé avec de l'eau pour former une pâte (rapport eau/plâtre de 0,6 à 0,8). À ce stade, des additifs peuvent être incorporés pour modifier les propriétés du produit final, comme des retardateurs ou des accélérateurs de prise. La pâte est ensuite coulée dans des moules ou appliquée directement sur des surfaces, selon l'application visée. La pâte se durcit en reprenant de l'eau et en formant le dihydrate de sulfate de calcium ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), retrouvant ainsi une structure similaire à celle du gypse naturel. Le temps de durcissement varie selon le plâtre utilisé et l'application. Des analyses de la composition chimique, de la granulométrie, de la porosité, de la conductivité thermique et des propriétés mécaniques peuvent être faites suivant l'application finale.

À La Réunion, des recherches sont nécessaires afin de déterminer la température et la durée de calcination idéales, ainsi que les paramètres optimaux de gâchage. L'objectif est d'élaborer un protocole exhaustif. Cette démarche viserait à optimiser l'utilisation de cette poudre en tant qu'isolation thermique, en tenant compte des spécificités climatiques de l'île.

6. LA FABRICATION DES FIBRES DE *FURCRAEA FOETIDA*

La collecte des feuilles est effectuée manuellement. Elles sont ensuite lavées, pour éliminer terre et impuretés, puis mesurées et pesées (Caillet et al. 2023; Shahril et al. 2022; Manimaran et al. 2018).

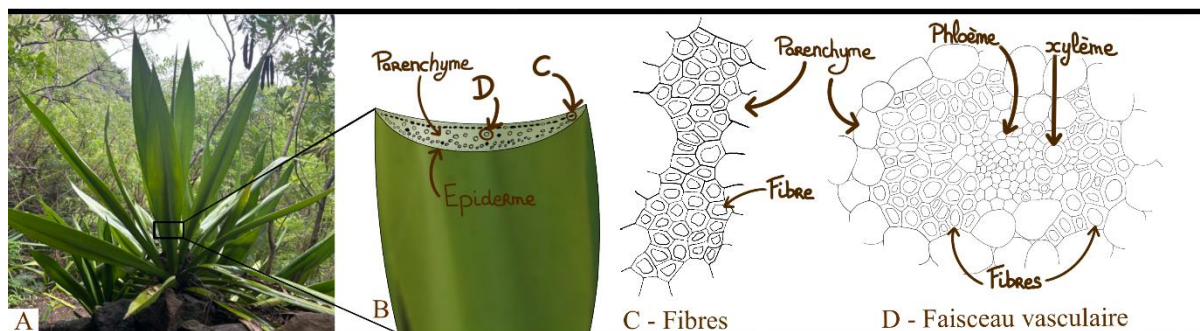


Figure 2 : A, Photo d'un *Furcraea foetida* à La Réunion. Schémas dessinés par Julie Bascaules à partir des observations de (Blunden et al. 1973): B, anatomie d'une feuille. C, ensemble de fibres. D, faisceau vasculaire comportant des fibres, le xylème et le phloème.

Le défibrage, manuel ou mécanique, sépare les fibres en cassant la feuille et en peignant les fibres. Le rouissage correspond à la macération des plantes pour séparer efficacement l'enveloppe externe des feuilles de leurs fibres. Le rouissage en plein sol, qui peut s'étendre sur plusieurs mois, exploite les micro-organismes du sol pour dissoudre la pectine des feuilles, facilitant ainsi la libération des fibres (Haja Syed Hussain et al. 2023). Le rouissage contrôlé implique l'immersion des feuilles dans de l'eau jusqu'à trois semaines pour décomposer les composants non cellulosiques (Shahril et al. 2022). Cette étape peut être accélérée en chauffant l'eau ou en utilisant un traitement chimique avec de la pectinase (Muñoz-Blandón et al. 2022). Le rouissage rend les fibres plus flexibles mais les affaiblit, justifiant la nécessité de tests pour évaluer l'impact du rouissage sur les propriétés des fibres (Bessadok et al. 2009). Des travaux expérimentaux sont nécessaires pour déterminer la meilleure technique de défibrage des feuilles de *Furcraea foetida*, étant donné que la littérature ne privilégie aucune méthode.

Les fibres peuvent être séchées naturellement, au soleil ou en étuve (Haja Syed Hussain et al. 2023). Dans cette étude, après deux jours de séchage à l'air libre, les fibres ont été placées en étuve pour une durée de 24h à une température de 80°C. Cependant, des températures trop élevées peuvent altérer les fibres, nécessitant une évaluation de l'impact de la température sur leurs performances mécaniques.

Un traitement post-défibrage améliore significativement les propriétés des fibres. Le procédé alcalin, utilisant du NaOH, réduit jusqu'à 50% l'hémicellulose et diminue la présence d'éléments non cellulosiques (Shahril et al. 2022). Cette méthode augmente le pourcentage de cellulose de 60 à 80%, diminuant ainsi leur capacité d'absorption d'eau (Huerta-Cardoso et al. 2020). Un ajustement optimal de la concentration de NaOH peut améliorer la température de dégradation des fibres, passant de 210 à 230°C. Des fibres traitées avec une solution alcaline à 9% en poids ont montré une baisse de 3% du taux d'humidité relative, une augmentation de la résistance à la traction de 192 à 416 MPa, et une augmentation du module d'Young de 7,5 à 12,4 GPa (Shahril et al. 2022). La durée du traitement alcalin influence également les performances des fibres. Un traitement de 2h peut augmenter la résistance à la traction jusqu'à 120 MPa, tandis qu'une prolongation à 5h peut réduire cette même résistance à 100 MPa, illustrant l'importance d'un calibrage précis du temps de traitement (Huerta-Cardoso et al. 2020). Un séchage est recommandé pour retirer toute humidité résiduelle, comme démontré dans l'étude (Shahril et al. 2022) où les fibres ont été séchées à 80°C durant 24h. D'autres méthodes chimiques

comme l'acétylation, le traitement enzymatique, et la silanisation peuvent être explorées, bien que leurs effets sur les fibres de bagasse soient jugés moins significatifs (Huerta-Cardoso et al. 2020).

Les connaissances sur le *Furcraea foetida* sont limitées, avec une seule publication sur la morphologie de leurs feuilles (Blunden, Yi, et Jewers 1973). Les recherches de valorisation des fibres, débutées en 2018, en sont à leurs débuts en matière de caractérisation. La documentation sur la préparation des fibres, les paramètres de rouissage et les utilisations potentielles est également limitée. Il est donc nécessaire de développer la caractérisation et l'utilisation des fibres. La plupart des études se concentrent sur la création de composites, tandis que l'application des fibres en tant qu'isolants thermiques est peu explorée (Caillet et al. 2023). Nous manquons d'informations sur l'efficacité des fibres sous différentes formes (vrac, coupées, tressées, broyées) ainsi que sur leur intégration dans du plâtre recyclé, soulignant ainsi le besoin de recherches approfondies dans ces domaines.

7. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Cet état de l'art explore diverses dimensions environnementales et économiques clés à La Réunion, soulignant les défis et les opportunités dans la gestion durable des déchets, la lutte contre les espèces invasives, et la fabrication locale d'isolants thermiques. Malgré les progrès dans le recyclage du plâtre, les objectifs pour 2027 soulignent la nécessité d'améliorer encore la valorisation de ces déchets. La gestion de l'espèce invasive *Furcraea foetida* illustre les complexités de protection de la biodiversité. La valorisation de ces fibres à travers de nouvelles applications industrielles représente à la fois un défi écologique et une opportunité économique. Enfin, les stratégies d'isolation thermique à La Réunion révèlent les défis posés par la dépendance aux matériaux importés et les opportunités offertes par les matériaux biosourcés locaux. L'étude révèle une opportunité significative dans l'utilisation combinée des fibres de *Furcraea foetida* et de plâtre recyclé pour la création d'isolants biosourcés, offrant un modèle prometteur pour le développement de matériaux de construction écologiques, réduisant ainsi l'impact environnemental et améliorant l'efficacité énergétique des bâtiments de l'île.

8. REMERCIEMENTS

Ce travail a été soutenu par l'ADEME, l'agence de la transition écologique, dans le cadre du financement d'une thèse co-dirigée par le laboratoire PIMENT (Physique et Ingénierie Mathématiques pour l'Energie, l'Environnement et le bâtiment) de La Réunion, et le laboratoire MATIM (MATériaux et Ingénierie Mécanique) de Reims.

9. BIBLIOGRAPHIE

- Bessadok, A., D. Langevin, F. Gouanvé, C. Chappey, S. Roudesli, et S. Marais. 2009. « Study of Water Sorption on Modified Agave Fibres ». *Carbohydrate Polymers* 76 (1): 74-85. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2008.09.033>.
- Blunden, G., Yi Yi, et K. Jewers. 1973. « The Comparative Leaf Anatomy of Agave, Beschorneria, Doryanthes and Furcraea Species (Agavaceae: Agaveae) ». *Botanical Journal of the Linnean Society* 66 (2): 157-79. <https://doi.org/10.1111/j.1095-8339.1973.tb02167.x>.
- Caillet, Hélène, Julie Bascaules, Youssoufou Mahaman, Jean-François Martin, Laetitia Adélar, et Olivier Marc. 2023. « Caractérisation et performances thermiques des fibres de *Furcraea foetida* en tant que matériau isolant en vrac ». *Congrès annuel de la société française de thermique (SFT 2023)*.

- Caillet, Hélène, Julie Bascaules, Youssoufou Mahaman, Patrick Rousset, Jean-François Martin, Laetitia Adelard, et Olivier Marc. 2023. « Caractérisation et performances thermiques des fibres de *Furcraea foetida* et de broyat d'ananas en tant que matériau isolant en vrac ». *Entropie thermodynamique – énergie – environnement – économie* 4 (octobre). <https://doi.org/10.21494/ISTE.OP.2023.1017>.
- Fenouillas, Pauline. 2021. « Identification des enjeux de conservation et priorisation des actions de lutte contre les espèces exotiques envahissantes à La Réunion ».
- Geraldo, Rodrigo H., Sayonara M.M. Pinheiro, Jefferson S. Silva, Heloysa M.C. Andrade, Jo Dweck, Jardel P. Gonçalves, et Gladis Camarini. 2017. « Gypsum Plaster Waste Recycling: A Potential Environmental and Industrial Solution ». *Journal of Cleaner Production* 164 (octobre): 288-300. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.06.188>.
- Grigoletto, Sophie, et Luc Courard. 2018. « Matériaux bio-sourcés et recyclés: de nouvelles ressources pour construire mieux? » *Salon Energie & Habitat, Urban & Environmental Engineering (UEE), Université de Liège*, octobre.
- Haja Syed Hussain, Mohd Ridzuan Mohd Jamir, M.S. Abdul Majid, et Ferriawan Yudhanto. 2023. « Friction and wear characteristics of *Furcraea foetida* fiber-reinforced epoxy composites ». *Polymer Composites*, septembre. <https://doi.org/10.1002/pc.27719>.
- Hivert, Jean, et Dominique Oudin. 2020. « Mission Europa du 6 au 7 juillet 2020 ». Compte rendu. Europa: CBN-CPIE Mascarin, TAAF. <https://ileseparse.cbnm.org/index.php/component/jdownloads/send/19-rapports-scientifiques-et-techniques/348-hivert-j-oudin-d-2020-mission-europa-du-6-au-7-juillet-2020>.
- Huerta-Cardoso, Omar, Isidro Durazo-Cardenas, Veronica Marchante-Rodriguez, Phil Longhurst, Frederic Coulon, et Adriana Encinas-Oropesa. 2020. « Up-Cycling of Agave Tequilana Bagasse-Fibres: A Study on the Effect of Fibre-Surface Treatments on Interfacial Bonding and Mechanical Properties ». *Results in Materials* 8 (décembre): 100158. <https://doi.org/10.1016/j.rinma.2020.100158>.
- Manimaran, P., P. Sentharamaikannan, M. R. Sanjay, M. K. Marichelvam, et Mohammad Jawaid. 2018. « Study on characterization of *Furcraea foetida* new natural fiber as composite reinforcement for lightweight applications ». *Carbohydrate Polymers* 181 (février): 650-58. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2017.11.099>.
- Muñoz-Blandón, Oscar, Margarita Ramírez-Carmona, Beatriz Cuartas-Urbe, et José Antonio Mendoza-Roca. 2022. « Evaluation of Original and Enzyme-Modified Figue Fibers as an Azo Dye Biosorbent Material ». *Water* 14 (7): 1035. <https://doi.org/10.3390/w14071035>.
- Pacheco-Torgal, F., et Said Jalali. 2012. « Earth Construction: Lessons from the Past for Future Eco-Efficient Construction ». *Construction and Building Materials* 29 (avril): 512-19. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.10.054>.
- Sarrailh, Jean-Michel, Tiana Madaule, et Jean-Noël Rivière. 2008. « Étude de la forêt semi-sèche de la Réunion: application à la réhabilitation de la flore indigène ». 2008. https://agritrop.cirad.fr/543728/1/document_543728.pdf.
- Shahril, S. M., M. J. M. Ridzuan, M. S. Abdul Majid, A. M. N. Bariah, M. T. A. Rahman, et P. Narayanasamy. 2022. « Alkali treatment influence on cellulosic fiber from *Furcraea foetida* leaves as potential reinforcement of polymeric composites ». *Journal of Materials Research and Technology* 19 (juillet): 2567-83. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.06.002>.
- Thueux, Pierre. 2015. « Un projet réunionnais pour sauver la forêt semi-sèche Life+corexerun ». Recueil d'expériences LIFE07 NAT/F/000188. programme européen LIFE+ COREXERUN, Parc National de La Réunion, Conservatoire du Littoral - Antenne de La Réunion. https://www.genieecologique.fr/sites/default/files/documents/rex/livret6_reconstitution.pdf.
- Totong, Totong, Wiah Wardiningsih, Muhammad Al-Ayyuby, Ria Wanti, et Ryan Rudy. 2022. « Extraction and Characterization of Natural Fiber from *Furcraea foetida* Leaves as an Alternative Material for Textile Applications ». *Journal of Natural Fibers* 19 (13): 6044-55. <https://doi.org/10.1080/15440478.2021.1904477>.
- Triolo, Julien. 2016. « Méthodes de lutte contre les plantes envahissantes ». Fiche technique. Office National des Forêt (ONF) Réunion avec le soutien de la DEAL Réunion. <https://www.cen.nc/documents/22209/84851/M%C3%A9thodes+de+Lutte+contre+les+plantes+envahissantes/8d16f3ac-8d70-433e-8fce-7fd24db5ce9a>.

Modélisation dynamique d'une piscine couverte et de ses équipements : comparaison entre TRNSYS et Dymola

Younes Benakcha^{*1,2}, Matthieu Labat¹, Ion Hazyuk², Stéphane Ginestet¹, Michal Vitáloš¹

¹ LMDC, Université de Toulouse, INSA, UPS, Toulouse, France.

² Institut Clément Ader (ICA), University of Toulouse, INSA, ISAE-SUPAERO, MINES Albi, UPS, CNRS, 31400 Toulouse, France.

* benakcha@insa-toulouse.fr

RÉSUMÉ. Les piscines couvertes (PCs) représentent une proportion importante de la consommation énergétique du parc immobilier d'une commune. Les PCs contiennent un nombre important de systèmes CVC pour assurer le bon fonctionnement des circuits d'air et d'eau. La gestion globale de ces équipements est complexe car ces derniers agissent simultanément sur des phénomènes qui sont couplés, mais la commande de chaque équipement est dissociée. Mener une analyse à ce niveau, ce qui manque dans la littérature scientifique, nécessite un environnement de simulation qui peut supporter une modélisation globale de type système, incluant la dynamique des équipements et leur contrôle. L'objectif de cet article est de comparer différents environnements de modélisation tel que TRNSYS et Dymola afin d'identifier celui qui sera le plus à même de répondre à cette problématique. La confrontation portera sur les capacités intrinsèques des environnements tel que les bibliothèques dédiées, les performances de calcul et leur compatibilité d'interfaçage avec d'autres logiciels dédiés à l'optimisation.

MOTS-CLÉS : Simulation thermique dynamique, contrôle-commande, systèmes énergétiques

ABSTRACT. Indoor swimming pools (ISPs) account for a significant proportion of a municipality's energy consumption. ISPs contain a large number of HVAC systems to ensure that air and water circuits function properly. The overall management of this equipment is complex because it acts simultaneously on phenomena that are coupled, but the control of each piece of equipment is segregated. Carrying out an analysis at this level, which is lacking in the scientific literature, requires a simulation environment that can support global system-level modelling, including the dynamics of the equipment and their control. The aim of this article is to compare different modelling environments, such as TRNSYS and Dymola, to identify the one best suited to this problem. The comparison will focus on the intrinsic capabilities of the environments, such as the dedicated libraries, the calculation performance and their interface compatibility with other software dedicated to optimization.

KEYWORD: Dynamic thermal simulation, control, energy systems

1 INTRODUCTION

Environ 8 % de l'énergie consommée par les bâtiments en Europe est utilisée par des complexes sportifs (Yuce et al. 2014). Les piscines couvertes (PCs), aux côtés des patinoires, figurent en tête des complexes sportifs les plus énergivores. Les PCs consomment en moyenne $5200 \text{ kWh}/\text{m}_{\text{surf eau}}^2/\text{an}$ pour des conditions climatiques continentales (Trianti-Stourna et al. 1998). Le parc d'équipements dans une piscine peut inclure des chaudières à gaz/bois, des systèmes solaires hybrides ou des pompes à chaleur pour chauffer l'eau et des centrales de traitement de l'air pour ventiler, déshumidifier et chauffer l'air à l'intérieur de la piscine. Les parties air et eau sont couplées par des interactions multiphysiques telles que l'évaporation. Généralement, on retrouve plusieurs boucles d'asservissement indépendantes (température air, humidité air, température eau, etc.) pour contrôler les équipements CVC. Chaque boucle de régulation impose sa consigne, et de ce fait agit comme une perturbation pour les autres boucles. Le fonctionnement individuel de ces boucles sans aucune coordination efficace peut entraîner un gaspillage d'énergie. Un potentiel d'économies pourrait donc être réalisé par le biais d'un pilotage bien orchestré de tous ces équipements notamment si leurs différentes commandes sont optimisées et

adaptées dans le temps aux changements des facteurs exogènes (nombre d'utilisateurs, météo, etc.). Pour développer de telles solutions, qui peuvent être chronophages, il est nécessaire dans un premier temps, de disposer d'un environnement numérique performant de type système qui supporte la complexité de modélisation des piscines couvertes, intégrant la dynamique des équipements ainsi que leur régulation. De nombreux outils de simulation ont été développés pour calculer la consommation énergétique des bâtiments. Sur le site Web du ministère de l'Énergie (DOE, USA) (http://apps1.eere.energy.gov/buildings/tools_directory/), environ 400 logiciels liés au bâtiment sont recensés (Kim et al. 2013). Ces outils sont de plus en plus utilisés dans la recherche et dans les entreprises. De nouveaux outils, des mises à jour et des améliorations sont continuellement proposées (Magni et al. 2021). Cela rend le choix du logiciel difficile et les travaux de comparaison dans la littérature sont souvent restreints pour des cas d'études spécifiques dans le domaine du bâtiment. Pour le cas des piscines, il est donc nécessaire d'effectuer une analyse comparative approfondie. Ainsi, une sélection préliminaire de plusieurs logiciels (voir Tableau 1) a été réalisée dans le cadre de ce travail, en fonction des besoins spécifiques de la modélisation des piscines. Cette démarche a permis de restreindre la comparaison à seulement deux logiciels : TRNSYS et Dymola. Pour trancher sur l'outil le plus adapté à cette étude, il a été nécessaire de développer le modèle complet de la piscine dans les deux logiciels. Cette approche a permis d'effectuer une comparaison directe entre les deux logiciels, en évaluant notamment leurs bibliothèques et leurs temps de calcul. Cette dernière mesure est un critère primordial dans l'optimisation de la consommation énergétique, ce qui s'inscrit dans les perspectives de ce travail.

2 METHODE

2.1 SELECTION PRELIMINAIRE DES LOGICIELS

De nombreux outils de simulation ont été développés pour calculer la consommation énergétique des bâtiments. Le site Internet de l'IBPSA USA (<https://www.ibpsa.us/best-directory-list/>) répertorie un grand nombre d'outils dans le domaine de l'énergétique du bâtiment et propose quelques options de sélection en fonction du besoin du modélisateur. Cet outil a été utilisé pour réaliser une première présélection de 6 logiciels de Simulation Thermique Dynamique (STD) a priori capables de modéliser une piscine couverte et ses systèmes thermiques. Quelques résultats sont présentés dans le Tableau 1.

Tableau 1: Sélection des logiciels selon leur capacité à remplir les exigences de l'étude (selon le site IBPSA)

Capacités	Outil	ESP-r	EnergyPlus	TRNSYS	Dymola (Modelica Buildings library)	SimulationX Green Building	Pleiades
Simulation bâtiment entier		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Simulation sous-systèmes		X	X	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	X	X
Paramétrage et optimisation		X	X	<input checked="" type="checkbox"/>	X	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

Il ressort que TRNSYS et Dymola (ses bibliothèques bâtiments sont développés sous Modelica) peuvent répondre à une grande partie des exigences de la modélisation des piscines. Il est sujet à débat de savoir si TRNSYS intègre véritablement un processus d'optimisation en se fondant sur les résultats du Tableau 1. À la connaissance des auteurs, ce logiciel peut faire des améliorations, mais une vraie optimisation nécessite l'interfaçage avec d'autres logiciels ou un langage de programmation tel que Matlab. De même, il n'est pas tout à fait exact de dire que Dymola ne traite pas l'optimisation (résultat du Tableau 1). En effet, il existe une bibliothèque "Optimization" sous licence payante qui permet d'appliquer des algorithmes d'optimisation (de types génétiques, par exemple) aux modèles. Dymola peut également interagir avec Python, par exemple, pour faire de l'optimisation. TRNSYS est un logiciel de STD multizones. Ce logiciel est payant et il possède son propre environnement graphique. Cet outil fait appel à un langage procédural pour la définition de ses modèles de simulation. Ces derniers peuvent

être encapsulés dans des routines développées sous FORTRAN appelées TYPES. Dymola utilise des bibliothèques développées sous Modelica qui est un langage open source de modélisation acausal, orienté objet basé sur des équations pour décrire la physique dans plusieurs domaines (Wetter et Haugstetter 2006). Ce langage peut avoir plusieurs environnements graphiques, parmi lesquels Dymola (interface payante) est le plus connu. Modelica est connu pour ses capacités multiphysiques, mais récemment, l'outil a vu un développement rapide de nouvelles bibliothèques intéressantes et gratuites dans le domaine du bâtiment. Cela est dû à la facilité de développement rendue possible par la nature de programmation acausale de Modelica.

Malgré les différences dans le niveau de détail requis à l'entrée de chaque outil, Magni et al. 2021 affirment que si les modélisateurs possèdent une expertise approfondie dans l'utilisation des logiciels STD tels que TRNSYS et Dymola, entre autres, des résultats similaires peuvent être obtenus avec ces outils grâce à un bon paramétrage et à plusieurs itérations dans le processus de comparaison-croisée.

Après avoir réduit la sélection préliminaire à seulement ces deux logiciels, la prochaine étape consiste à déterminer lequel des deux permettra de répondre au mieux au besoin de l'étude. Il s'agit d'une problématique assez courante en modélisation, qui peut être tranchée en partie à travers des exercices de type benchmark. Il existe d'ailleurs des normes pour effectuer une comparaison rigoureuse entre différents logiciels, comme par exemple la norme ANSI/ASHRAE 140-2001 ((Wetter et Haugstetter 2006), (ASHRAE 2001)). Cependant, ces tests permettent surtout de vérifier si les modèles permettent d'obtenir des résultats similaires dans un cas précis, que ce soit par comparaison entre logiciels ou avec une solution analytique. Si une bonne précision est une condition nécessaire, elle n'est pas suffisante pour déterminer quel logiciel est le plus adapté pour modéliser un problème différent de celui défini dans la norme. Aussi, plusieurs auteurs ont poursuivi la comparaison entre ces deux logiciels pour des cas spécifiques, tels que : (1) les besoins énergétiques de chauffage/climatisation d'un restaurant (Wetter et Haugstetter 2006) ; (2) le chauffage urbain solaire (Giraud, Paulus, et Baviere 2015) ; (3) la dynamique à court terme des besoins d'un bâtiment multizone, modélisation des équipements CVC contrôleurs inclus (Kim et al. 2013). Il ressort de ces différentes études plusieurs conclusions :

(a) Les deux outils sont ouverts et contiennent des bibliothèques dédiées aux systèmes CVC, et la majorité de celles de TRNSYS sont validées expérimentalement. De par la nature multiphysique de Dymola, cependant, les bibliothèques sont plus fournies que celles de TRNSYS et certaines proposent une modélisation plus fine des phénomènes, par exemple en introduisant les équations de la mécanique des fluides ou en utilisant des tables fines de thermodynamique pour une grande variété de fluides. Cela n'est pas le cas dans TRNSYS qui se limite le plus souvent à réaliser des bilans énergétiques.

(b) En ce qui concerne le temps de développement du modèle en lui-même, il s'agit d'une caractéristique subjective mais plusieurs auteurs estiment que la nature acausale et orientée objet de Modelica joue en faveur de Dymola. De même, l'écriture du code serait plus intuitive qu'en Fortran (langage utilisé par TRNSYS). A contrario, un calibrage plus important a été nécessaire avec Dymola pour répondre à une description simple d'un bâtiment et des ses systèmes CVC dans (Magni et al. 2021).

(c) Concernant les méthodes numériques, Dymola utilise des solveurs à pas de temps variable et TRNSYS un solveur à pas de temps fixe. De manière générale, il en résulte un temps de calcul plus court avec TRNSYS qu'avec Dymola, bien que différentes techniques permettent de le réduire. Cependant, le temps de calcul varie dans des proportions plus importantes avec TRNSYS selon le nombre de données qui sont extraites de la simulation à des fins de post-traitement. Enfin, aucun des deux logiciels ne permet de réaliser l'optimisation intrinsèquement (sauf en faisant appel à des

bibliothèques externes payantes). Pour cela, il est nécessaire de recourir à des logiciels d'optimisation externes. Il est donc difficile de trancher sur le choix du modèle en se basant uniquement sur la littérature scientifique. Il semblerait que Dymola offre davantage de souplesse que TRNSYS, ce qui lui permettrait de s'adapter plus facilement à un plus grand nombre de situations. Cependant, cela peut se traduire par un temps de calcul plus long, et dans le cas où les bibliothèques TRNSYS seraient déjà adaptées au problème, par un temps de développement qui pourrait être plus important. Comme aucun des articles ne porte sur un cas d'étude similaire à celui des piscines couvertes, il a été décidé de réaliser la comparaison entre ces deux logiciels dans le présent article.

2.2 CAS D'ETUDE

Dans cette section, une comparaison approfondie entre TRNSYS et Dymola est abordée en étudiant le couplage des circuits eau-air d'une piscine. La comparaison est effectuée selon trois critères : richesse des bibliothèques, temps de calcul, et compatibilité d'interfaçage avec d'autres logiciels dédiés à l'optimisation. La piscine étudiée s'inspire de celle du campus de l'ISAE SUPAERO à Toulouse. Son volume intérieur est de 3430 m^3 et la surface du plan d'eau est 375 m^2 ($15\text{m} \times 25\text{m}$), pour un volume de 581 m^3 . Bien qu'une campagne de mesure ait été initiée, les données recueillies ne sont pas encore suffisantes pour effectuer une confrontation annuelle avec les données numériques. Dans ce contexte, la configuration globale du bâtiment et des équipements a été retenue afin de réaliser la comparaison entre logiciels et mesures pour une période de 3 mois. Un schéma de principe est donné dans la Figure 1.

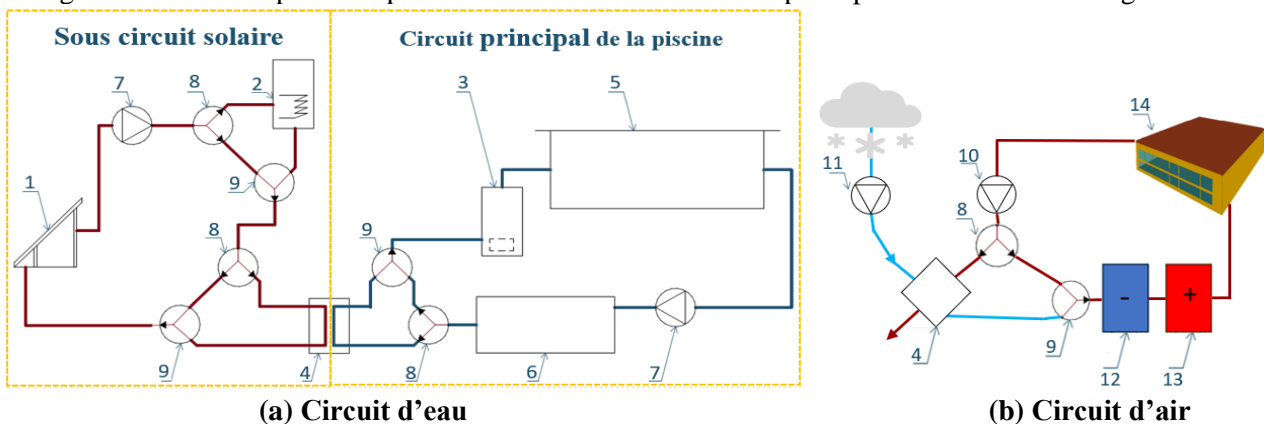


Figure 1: Schéma des circuits d'eau et d'air ; 1- collecteur solaires ; 2- ballon de stockage ECS ; 3- chaudière ; 4- échangeur de chaleur ; 5- piscine, 6- réservoir tampon ; 7- pompe de circulation ; 8- vanne de répartition ; 9- vanne de mélange ; 10-ventilateur de retour ; 11-ventilateur d'air frais ; 12-batterie froide ; 13- batterie chaude ; 14-Enveloppe de la piscine.

Le circuit d'air comprend la centrale de traitement d'air, composée de plusieurs éléments tels que le caisson de mélange, l'échangeur de chaleur, la batterie froide, la batterie chaude, l'enveloppe de la piscine, les ventilateurs de l'air frais et de l'air vicié (voir Figure 1). Ces derniers consomment une puissance de 2.97 kW chacun et fonctionnent avec un débit fixe de $13000 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$. Les batteries froide et chaude sont régulées par des contrôleurs PID pour répondre aux besoins de déshumidification et de chauffage de l'air de la piscine tout au long de l'année. L'objectif est d'assurer une température d'air de minimum de 30°C , une humidité absolue d'environ $13.7 \text{ g} \cdot \text{kg}_{\text{AS}}^{-1}$ et une humidité relative de 50%. Quant au circuit d'eau, il est constitué de deux circuits séparés par un échangeur de chaleur. Le premier circuit comporte des collecteurs solaires thermiques d'une surface totale de 528 m^2 , une pompe d'une puissance de 632 W pour un débit $18 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ et un ballon d'eau chaude sanitaire. Il est relié à la boucle d'eau de la piscine par un échangeur de chaleur. Le complément d'énergie est fourni par une chaudière auxiliaire d'une puissance maximale de 100 kW afin de maintenir en permanence l'eau à une température

de consigne de 28 °C. La pompe du circuit principal de la piscine nécessite une puissance de 31.5 kW pour assurer un débit de filtrage de 290 m³.h⁻¹. Les différentes pompes et vannes de dérivation sont contrôlées localement à l'aide de logiques TOR avec hystérésis en fonction de la température de l'eau de la piscine et de la température du fluide à la sortie des collecteurs solaires. Si la production solaire est importante et que la température de l'eau de la piscine dépasse la consigne, l'eau du circuit solaire est déviée pour chauffer un ballon d'eau chaude sanitaire. Les bilans énergétiques des gains/perdes dans l'air et dans l'eau d'une piscine peuvent s'écrire respectivement comme suit :

$$\rho_a V_a \frac{dh_a}{dt} = \dot{Q}_{souff_CTA} + \dot{Q}_{soleil_fenêtre} + \dot{Q}_{evap} - (\dot{Q}_{envlopppe} + \dot{Q}_{conv_a}) \quad (1)$$

$$\rho_e C_{pe} V_e \frac{dT_e}{dt} = \dot{Q}_{aux} + \dot{Q}_{conv_e} + \dot{Q}_{rad_e} - (\dot{Q}_{evap} + \dot{Q}_{cond} + \dot{Q}_{ef}) \quad (2)$$

Avec : "a" air ; "e" eau ; ρ [kg.m⁻³] masse volumique ; C_p [J.kg⁻¹.°C⁻¹] chaleur spécifique ; h [J.kg⁻¹] enthalpie ; V [m³] volume ; T [°C] température ; \dot{Q}_{souff_CTA} [W] chaleur soufflée dans la pièce par la centrale de traitement de l'air ; $\dot{Q}_{soleil_fenêtre}$: puissance solaire traversant les fenêtres ; $\dot{Q}_{envlopppe}, \dot{Q}_{conv_a}$ [W] pertes de chaleur dans l'air à travers l'enveloppe et la convection ; \dot{Q}_{evap} [W] perte de chaleur dans (l'eau)/gain (dans l'air) par évaporation ; \dot{Q}_{aux} [W] apport de chaleur pour l'eau de la piscine fourni par un équipement de chauffage auxiliaire (chaudière, collecteur solaire, etc.) ; $\dot{Q}_{conv_e}, \dot{Q}_{rad_e}$ [W] gain de chaleur dans l'eau de la piscine par convection et radiation ; \dot{Q}_{cond} [W] perte de chaleur dans l'eau par conduction ; \dot{Q}_{ef} [W] perte de chaleur due au renouvellement d'eau fraîche de la piscine. Les termes \dot{Q}_{conv} , et \dot{Q}_{rad} sont des gains dans l'eau, tandis que \dot{Q}_{conv} est une perte dans l'air, car la température de l'air est censée être toujours supérieure à celle de l'eau.

3 RESULTATS

3.1 RICHESSE DES BIBLIOTHEQUES CVC

Le concept de modélisation dans TRNSYS et Dymola est le même : il s'agit d'un assemblage de plusieurs composants physiques pour simuler le comportement dynamique d'une installation énergétique. Les bibliothèques de TRNSYS offrent un éventail de choix plus large pour les systèmes CVC. En ce qui concerne Dymola, le choix pour des composants spécifiques CVC est plus restreint, notamment pour les collecteurs solaires. Des composants tels que les pompes ou les vannes de déviation nécessitent un paramétrage plus détaillé, ce qui peut augmenter le temps de construction du modèle. Dans ce travail, il a été nécessaire de développer des versions simplifiées de ces composants pour une comparaison équitable et pour alléger le modèle Dymola. La nature de son langage (Modelica) a certes facilité le développement de nouveaux modèles, néanmoins il requiert une certaine familiarité, une expertise en modélisation et une solide compréhension des phénomènes physiques. Par exemple, TRNSYS permet la réalisation des bilans internes pour traduire le débit de vapeur d'eau (lié à l'évaporation) en une augmentation de l'humidité absolue dans l'air, ce qui n'est pas automatique dans Dymola. L'implémentation de l'évaporation nécessite la manipulation du diagramme de l'air humide pour obtenir différentes grandeurs physiques à partir d'autres entrées. Cette opération se fait naturellement dans TRNSYS, contrairement à Dymola où il faut programmer un composant qui modélise le diagramme psychrométrique. Il a été nécessaire de choisir l'eau comme fluide du circuit solaire dans les deux logiciels pour assurer une comparaison équitable, car l'eau glycolée est incompatible avec le modèle du collecteur solaire choisi dans Dymola. Contrairement à TRNSYS, Dymola arrête le calcul si la température de l'eau sort de la plage « liquide ». Pour contourner ce problème, si la température de l'eau dans le collecteur dépasse 90°C, elle est dirigée vers un très grand

réservoir d'ECS, provoquant une décharge (refroidissement). Le contournement des problèmes dans Dymola peut devenir chronophage, surtout avec l'agrandissement du modèle. Le choix des fichiers météorologiques dans Dymola est limité à quelques villes. Il est nécessaire de convertir le fichier météo de la ville choisie dans TRNSYS en un format compatible avec Dymola, ce qui entraîne un temps supplémentaire de développement. Ainsi, pour le cas spécifique de la piscine, TRNSYS répond mieux au critère de richesse des bibliothèques, notamment grâce à sa bibliothèque TESS, bien que l'accès à celle-ci soit payant. Enfin, le calcul de l'impact solaire sur les parois du bâtiment, y compris les fenêtres n'est pas traité de la même manière dans les deux logiciels, d'après Magni et al. 2021. Pour rendre la comparaison plus équitable, ce phénomène a été négligé dans les deux logiciels, en raison également du temps de simulation prohibitif dans Dymola.

3.2 TEMPS DE CALCUL (COMPILATION+SIMULATION) ET PRECISION DES RESULTATS.

Une réduction de la consommation d'énergie nécessite une optimisation dynamique dans le temps des différentes consignes de température et d'humidité. Les routines d'optimisation sont susceptibles de faire des milliers d'appels à la simulation. Ainsi, le temps de calcul du logiciel revêt une grande importance. Pour comparer les performances de calcul entre TRNSYS et Dymola, plusieurs simulations ont été effectuées sur le même ordinateur en faisant varier les durées de simulation et le pas de temps à une tolérance de 10^{-3} . Les résultats sont résumés dans le Tableau 2. Ces résultats montrent que Dymola est de 2 à 9 fois plus lent que TRNSYS.

Tableau 2: Temps de calcul dans TRNSYS et Dymola pour différentes périodes de simulation et pas de temps

Période de simulation	TRNSYS Solveur : Substitution successive	Dymola Solveur : Cvode	Ration : Dymola/TRNSYS
Pas de temps de 3 min			
2 jours	6.06 s	13.91 s	2.3
1 mois	29.94 s	209.83 s	7.0
1 an	331.11 s	3091.52 s	9.3
Pas de temps de 1 min			
2 jours	8.16 s	27.93 s	3.4
1 mois	70 s	576.70 s	8.2
1 an	844.06 s	7628.04 s	9.0

La Figure 2 compare la consommation de la piscine de l'ISAE, obtenue expérimentalement, à celles obtenues dans TRNSYS et Dymola. Il s'agit des consommations électriques et thermiques de plusieurs composants constituant les circuits d'air et d'eau de la piscine. La consommation totale selon les mesures expérimentales est de 0.250 GWh, selon TRNSYS est de 0.224 GWh et selon Dymola est de 0.229 GWh. Cet ordre de grandeur correspond également à celui mesuré par Nikolic et al. 2021 : 2.69 GWh pour une piscine deux fois plus grande et pour une période d'une année. L'écart entre les mesures expérimentales et les résultats numériques (TRNSYS ou Dymola) est de presque 10%. Cela est principalement attribuable à la différence entre les données météorologiques de 2023 et celles moyennées sur plusieurs années utilisées dans les deux logiciels, ainsi qu'à la difficulté d'estimer le nombre réel d'occupants et leurs habitudes dans la vraie piscine. L'occupation peut avoir un impact sur divers aspects, notamment l'évaporation, qui influence à son tour la consommation d'énergie. L'écart entre les résultats de Dymola et TRNSYS est de 2.43 %.

Il faut noter que cet écart augmente jusqu'à 17.83% lorsque la période de simulation s'étale sur une année. Cette différence est attribuable au cumul de plusieurs facteurs : les différents composants des deux circuits (air-eau) et les données d'entrée qui ne sont pas totalement similaires, la différence des

solveurs et la description non identique du bâtiment dans les deux logiciels (ce qui est parfois inévitable). Ces facteurs sont similaires à ceux mentionnés dans (Magni et al. 2021) ajoutant à cela le traitement différencié des données météorologiques utilisées par les deux outils. Enfin, il y a des écarts dans les deux logiciels au niveau de la consommation thermique du circuit d'eau (voir Figure 2). Cette consommation est associée à la chaudière qui modélise le complément d'énergie fourni par le réseau de chaleur. Cet écart est dû à la différence de régulation de la chaudière dans les deux logiciels.

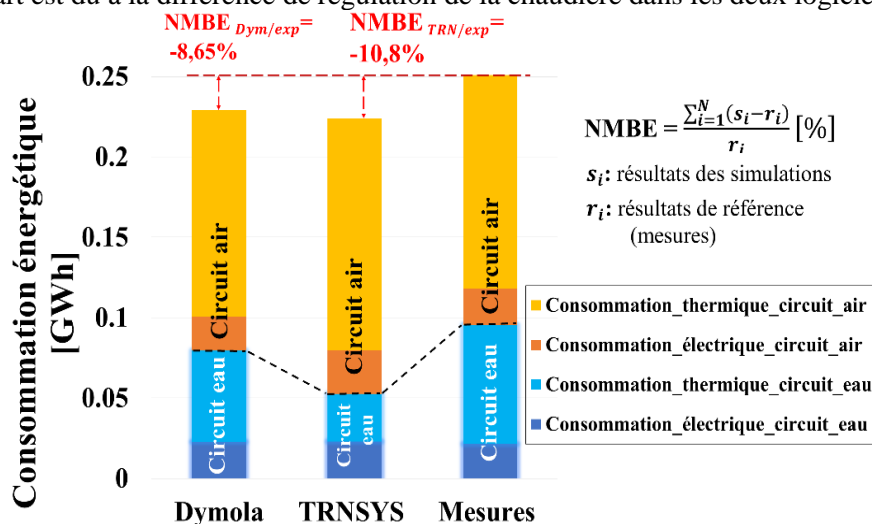


Figure 2: Consommation énergétique de la piscine (numérique et expérimentale) du 02/10/2023 au 31/12/2023

Dans Dymola, la chaudière est régulée par un correcteur PID, tandis que la chaudière dans TRNSYS est un composant idéal avec sa propre régulation interne. Il est à noter que les mêmes résultats ont été obtenus pour deux pas de temps différents 5 et 3 minutes (comparaison non présentée ici) avec Dymola. Ce dernier peut également prendre en charge le changement de tolérance du solveur, contrairement à TRNSYS, qui n'a pas supporté un pas de temps plus grand ni une tolérance plus fine.

3.3 VERS L'APPLICATION DE METHODES D'OPTIMISATION

Ce travail s'inscrit dans un contexte plus large, celui de l'optimisation de la consommation énergétique de l'ensemble des équipements. Des méthodes d'optimisation par algorithme évolutionnaires sont envisagées, ce qui nécessite d'effectuer un grand nombre de simulations. Ces méthodes s'appuient sur l'évaluation des performances d'une population, constitué de plusieurs individus similaires mais dont certains paramètres, ici les consignes de température au cours du temps par exemple, varient d'un individu à l'autre. De fait, plusieurs individus sont définis a priori et doivent être évalués afin de ne retenir que ceux qui poursuivront le processus d'optimisation. Cette méthode est donc compatible avec une parallélisation des calculs, qui permettrait de réduire le temps de calcul global. La parallélisation des calculs n'est pas une méthode spécifique à un environnement, TRNSYS ou Dymola, et il existe des outils ouverts qui permettent de l'appliquer directement. C'est le cas du logiciel ouvert JEPlus, qui permet de lancer facilement plusieurs simulations TRNSYS en fonction du nombre de cœurs disponibles. Des solutions similaires existent pour Dymola, comme par exemple le module multiprocessing dans Python, mais elles n'ont pas été testées dans cette étude. Pour déterminer le gain apporté par une parallélisation, 15 simulations sur 1 an avec un pas de temps de 3 minutes ont été lancées sur 4 cœurs en parallèle. Le temps total de simulation obtenu avec JE+ est 1116 secondes, contre un temps pour une simulation en environnement TRNSYS de 331s par simulation. Ainsi, il est notable qu'il y a une réduction du temps de calcul de plus d'un facteur 4 entre les deux méthodes, ce qui confirme l'intérêt de la parallélisation.

4 CONCLUSION

Après une sélection préliminaire des logiciels suivie d'une comparaison approfondie entre TRNSYS et Dymola, il est apparu que ces deux environnements numériques peuvent soutenir une modélisation complète d'une piscine, que ce soit en termes de simulation du comportement thermique dynamique des équipements CVC de la piscine ou bien la capacité de leur pilotage. L'écart entre les résultats (bilan énergétique global des principaux composants de la piscine) de l'expérience et ceux du numérique est d'environ 10%, ce qui est acceptable pour une première confrontation. Cela est principalement lié à la différence des facteurs exogènes (occupants, météo...) dans les deux approches. Le bilan global est presque similaire dans les deux logiciels. Ce bilan inclut les consommations électriques (pompes, ventilateurs et déshumidification dans la CTA) et thermiques (chauffage de l'air et de l'eau). Les résultats de ce travail en termes de temps de calcul confirment les affirmations de la littérature scientifique. Dymola (langage Modelica) est trois fois plus lent que TRNSYS, comme indiqué dans (Wetter et Haugstetter 2006), et peut être jusqu'à neuf fois plus lent à mesure que le modèle s'élargit et se complexifie, comme c'est le cas présent avec la piscine. Cela a été constaté surtout lors de la prise en compte de l'impact du flux solaire sur les surfaces verticales (parois et fenêtres). Dymola a montré une flexibilité dans le changement de la tolérance du solveur et dans le pas de temps, ce qui n'est pas le cas dans TRNSYS. Même avec un pas de temps plus grand, Dymola effectue parfois des pas de temps intermédiaires lorsqu'il y a des dynamiques rapides ce qui peut augmenter le temps de calcul. En conclusion, TRNSYS reste plus avantageux en termes de temps de calcul, et richesse des bibliothèques CVC ce qui nous guide à choisir ce logiciel pour la suite de notre travail d'optimisation.

5 REFERENCE

- « ANSI/ASHRAE Addendum a to ANSI/ASHRAE Standard 140-2001 ». 2001.
- Giraud, Loic, Cedric Paulus, et Roland Baviere. 2015. « Modeling of Solar District Heating: A Comparison Between TRNSYS and MODELICA ». In *Proceedings of the EuroSun 2014 Conference*, 1-11. Aix-les-Bains, France: International Solar Energy Society. <https://doi.org/10.18086/eurosun.2014.19.06>.
- Kim, Donghun, Wangda Zuo, James.e Braun, et Michael Wetter. 2013. « Comparisons Of Building System Modeling Approaches For Control System Design ». In . <https://doi.org/10.26868/25222708.2013.1409>.
- Magni, Mara, Fabian Ochs, Samuel de Vries, Alessandro Maccarini, et Ferdinand Sigg. 2021. « Detailed Cross Comparison of Building Energy Simulation Tools Results Using a Reference Office Building as a Case Study ». *Energy and Buildings* 250 (novembre): 111260. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111260>.
- Nikolic, Jelena, Dusan Gordic, Nebojsa Jurisevic, Vladimir Vukasinovic, et Dobrica Milovanović. 2021. « Energy Auditing of Indoor Swimming Facility with Multi-Criteria Decision Analysis for Ranking the Proposed Energy Savings Measures ». *Energy Efficiency* 14 (4): 36. <https://doi.org/10.1007/s12053-021-09949-w>.
- Trianti-Stourna, E., K. Spyropoulou, C. Theofylaktos, K. Droutsas, C.A. Balaras, M. Santamouris, D.N. Asimakopoulos, G. Lazaropoulou, et N. Papanikolaou. 1998. « Energy Conservation Strategies for Sports Centers: Part B. Swimming Pools ». *Energy and Buildings* 27 (2): 123-35. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(97\)00041-8](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(97)00041-8).
- Wetter, Michael, et Christoph Haugstetter. 2006. « MODELICA VERSUS TRNSYS: A COMPARISON BETWEEN AN EQUATION-BASED AND A PROCEDURAL MODELING LANGUAGE FOR BUILDING ENERGY SIMULATION ».
- Yuce, Baris, Haijiang Li, Yacine Rezgui, Ioan Petri, Bejay Jayan, et Chunfeng Yang. 2014. « Utilizing Artificial Neural Network to Predict Energy Consumption and Thermal Comfort Level: An Indoor Swimming Pool Case Study ». *Energy and Buildings* 80 (septembre): 45-56. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.04.052>.

Pilotage optimal des usages électriques flexibles d'un bâtiment tertiaire avec une production photovoltaïque locale utilisant l'outil OMEGAlpes

Fatima Zohra Benali^{*1,2}, Maxime Robillart^{1,2}, Laurent Mora^{1,2}, Thomas Recht^{1,2}, Mustapha Jamma^{1,2}, Zakaria Aketouane³, Pascale Brassier³, Frédéric Wurtz⁴

¹ Univ. Bordeaux, CNRS, Bordeaux INP, I2M, UMR 5295, F-33400, Talence, France

² Arts et Metiers Institute of Technology, CNRS, Bordeaux INP, Hesam Université, I2M, UMR 5295, F-33400 Talence, France

³ NOBATEK/INEF4, 67 rue de Mirambeau, F-64600 Anglet, France

⁴ Univ. Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP, G2Elab, F-38000 Grenoble, France

[*fatima-zohra.benali@u-bordeaux.fr](mailto:fatima-zohra.benali@u-bordeaux.fr)

RESUME. La gestion de l'énergie nécessite aujourd'hui de considérer la synergie entre l'offre et la demande. La gestion de la demande se positionne au centre de ce travail. En particulier, cette communication se concentre sur la flexibilité de la demande d'électricité à l'échelle d'un bâtiment tertiaire. Le cas d'étude proposé considère plusieurs sources d'énergie (réseau et production photovoltaïque locale) ainsi que différents postes de consommation et de stockage (véhicules électriques, ordinateurs portables, et autres équipements). Une logique de contrôle prédictif a été adoptée afin de minimiser le coût ainsi que les impacts environnementaux en calculant les commandes optimales de charge et décharge des véhicules électriques et la déconnexion des ordinateurs. Pour cela, un environnement de simulation a été mis en place incluant un module de prédiction des conditions aux limites, un module d'optimisation faisant appel à l'outil OMEGAlpes, et un module de simulation sous OpenModelica.

MOTS-CLÉS : Flexibilité, Gestion de la demande électrique, Contrôle prédictif (MPC)

Abstract. Energy management today requires considering the synergy between supply and demand. Demand side management is at the center of this work. In particular, this communication focuses on the flexibility of electricity demand at the scale of a tertiary building. The proposed study case considers several energy resources (electrical grid and local photovoltaic production) as well as different consumption and storage (electric vehicles, laptops, and other equipment). A model predictive control (MPC) logic was adopted to minimize the cost of consumption as well as environmental impacts by calculating the optimal commands for charging and discharging electric vehicles as well as disconnection of laptops. For this matter, a simulation environment was developed which includes prediction module, an optimization module using OMEGAlpes tool and a simulation module using OpenModelica.

MOTS-CLÉS : Flexibility, Electric demand management, Model Predictive Control

1. INTRODUCTION

Le modèle classique de gestion du réseau électrique, qui repose sur une production alignée sur la demande, se trouve actuellement confronté à des défis croissants. L'intégration des énergies renouvelables, avec leur caractère intermittent, ajoute une complexité supplémentaire à un réseau électrique déjà sous pression en raison de sa thermosensibilité et de la nécessité de gérer les périodes de

pointe. Pour relever ces défis, des moyens de flexibilité sont mis en place, avec un accent sur le pilotage à l'échelle de réseau (export/import à l'échelle du réseau européen, centrales de production de pointe, stockage, et effacement de la consommation) (ADEME 2017). Or, la flexibilité peut être exploitée à d'autres échelles, notamment à celle des bâtiments, en adoptant un modèle de gestion de la demande alignée sur la production (Bai et al. 2023), comme le contrôle prédictif.

Le contrôle prédictif, ou MPC (*Model Predictive Control*), est une méthode de contrôle avancée basée sur l'utilisation d'un modèle dynamique qui anticipe le comportement d'un système en fonction de son état et des sollicitations et contraintes auxquelles il est soumis. Cette approche permet de calculer des séquences de commandes optimales visant à atteindre un critère d'optimisation donné (Drgoňa et al. 2020). Historiquement, le MPC est la première technique de contrôle utilisée dans la littérature pour établir des stratégies de gestion optimale, que ce soit pour minimiser les consommations énergétiques, la facture, l'impact environnemental, ou pour maximiser le confort et l'autoconsommation (Sevilla et al. 2015; Strauch, Wang, et Langner 2024). Les stratégies s'appliquent à différents systèmes et peuvent opérer un contrôle de différents postes de consommation au sein du bâtiment. Dans le contexte des bâtiments tertiaires, le potentiel de gestion est important pour les équipements à vecteurs électriques qui contribuent à la demande de pointe, tels que ceux liés à l'ECS (eau chaude sanitaire), le CVC (chauffage, ventilation et climatisation), et l'électricité spécifique (ordinateurs, éclairage...). Il est également possible d'intégrer le pilotage de la production locale ainsi que le stockage dans la stratégie. Cette communication se focalise sur l'optimisation de la gestion des flux électriques d'un bâtiment tertiaire, avec pour but d'améliorer l'efficacité énergétique en utilisant judicieusement les ressources locales telles que les charges pilotables, la production et le stockage d'énergie. L'objectif principal est de développer une plateforme de simulation permettant d'identifier et d'évaluer différentes stratégies de pilotage, en prenant en compte plusieurs objectifs et les incertitudes liées aux variations météorologiques et aux usages des équipements électriques.

2. METHODOLOGIE

L'environnement de simulation développé repose sur une approche multi-outils et une logique prédictive pour modéliser et optimiser les différents systèmes énergétiques. Cet environnement se compose de 3 entités communicantes : un émulateur, un contrôleur et un orchestrateur.

2.1. L'EMULATEUR

L'émulateur a pour objectif d'évaluer virtuellement l'efficacité des stratégies de contrôle identifiées. En particulier, en appliquant les commandes optimales calculées par le contrôleur, il permet de simuler le comportement « réel » des systèmes énergétiques visant à être optimisés. Cet émulateur repose sur l'utilisation du logiciel [OpenModelica](#), permettant la modélisation et la simulation de modèles physiques complexes.

2.2. LE CONTROLEUR

Le contrôleur, développé sous *Python*, génère les commandes optimales répondant au problème d'optimisation basé sur le modèle énergétique émulé précédemment. Ce contrôleur est lui-même composé

d'un module de prédiction des conditions aux limites et d'un module d'optimisation faisant appel à [OMEGAlpes](#) (Hodencq et al. 2021) qui résout le problème d'optimisation.

2.2.1. Module de prédiction

Dans une approche de contrôle prédictif, deux logiques de prédiction des conditions aux limites (conditions météorologiques, usages des charges pilotables) ont été développées : un prédicteur parfait et un prédicteur naïf. Dans le cas du prédicteur parfait, l'optimiseur dispose des prédictions exactes des conditions aux limites sur l'horizon d'optimisation. Dans le cas du prédicteur naïf, les conditions aux limites sur l'horizon d'optimisation correspondent à celles sur la période précédente (en prenant en compte la différence entre le weekend et les jours ouvrés).

2.2.2. Optimiseur OMEGAlpes

Le problème d'optimisation est formulé et résolu dans *OMEGAlpes (Optimization ModEls Generation for Energy Systems)*, un outil d'aide à la décision pour le dimensionnement et le pilotage de systèmes multi-énergies. Développé par le laboratoire G2Elab de l'Université de Grenoble, il est utilisé pour calculer des stratégies de planification énergétique optimale. Dans cet outil, les systèmes énergétiques sont décrits grâce à des modèles génériques et paramétrables permettant une formulation MILP (*Mixed-Integer Linear Programming*) du problème d'optimisation. *OMEGAlpes* est développé sous *Python* et mis à disposition sous la licence *Apache 2.0*.

2.3. L'ORCHESTRATEUR

L'orchestrateur, développé en python, gère à chaque instant simulé l'échange de données entre l'émulateur et le contrôleur, notamment les conditions aux limites et l'état du système, indispensables à l'optimisation, ainsi que les commandes optimales calculées requises pour émuler le modèle.

3. CAS D'ETUDE

3.1. PRESENTATION

Le bâtiment considéré est inspiré d'un bâtiment tertiaire, siège social de NOBATEK/INEF4, situé à Anglet en Nouvelle-Aquitaine. Une production locale et du stockage ont été rajoutés aux systèmes existants du bâtiment. Dans le cadre de cette étude, seule la partie électrique a été considérée et modélisée sous *OpenModelica*. Elle comprend les éléments suivants :

- Une installation de panneaux photovoltaïques installés en toiture de 8 kWc. Les panneaux sont répartis sur 72 m² avec une inclinaison de 44 °. Un onduleur avec un rendement de 98 % est couplé à l'installation.
- 20 ordinateurs portables disposant d'une capacité de stockage de 50 Wh par PC. La puissance de charge sans batterie est de 400 W, et s'élève à 900 W avec chargement de la batterie.
- Deux véhicules électriques de type Renault ZOE sont considérés, avec une capacité de stockage de 52 kWh. Le rendement de charge et décharge est de 95 % avec une puissance maximale de charge et décharge de 22 kW.

- Une consommation statique (non pilotable) représentant la consommation du reste des équipements du bâtiment (éclairage, systèmes de chauffage, ventilation, climatisation et eau chaude sanitaire).

Le raccordement au réseau est considéré par le biais d'une puissance souscrite de 60 kW.

3.2. MODELISATIONS

3.2.1. OpenModelica

Le modèle sous *OpenModelica* est constitué de plusieurs briques modélisant le comportement des systèmes énergétiques : le système photovoltaïque, les ordinateurs portables, les deux véhicules électriques, la consommation statique du bâtiment et enfin le raccordement au réseau électrique.

3.2.2. OMEGAAlpes

La Figure 1 présente le cas d'étude modélisé sous *OMEGAAlpes*. Un nœud électrique relie les différentes unités énergétiques et symbolise les flux correspondants (production/consommation). Les panneaux photovoltaïques sont ainsi représentés comme une unité de production, alors que les consommations fixes et les ordinateurs sont considérés comme des unités de consommation. Les véhicules électriques, grâce à leurs batteries, sont quant à eux modélisés comme des unités de stockage, capables de fournir ou de consommer de l'électricité. Enfin, le réseau électrique est relié au nœud électrique permettant d'importer (ou d'exporter) de l'électricité depuis (ou vers) le réseau.

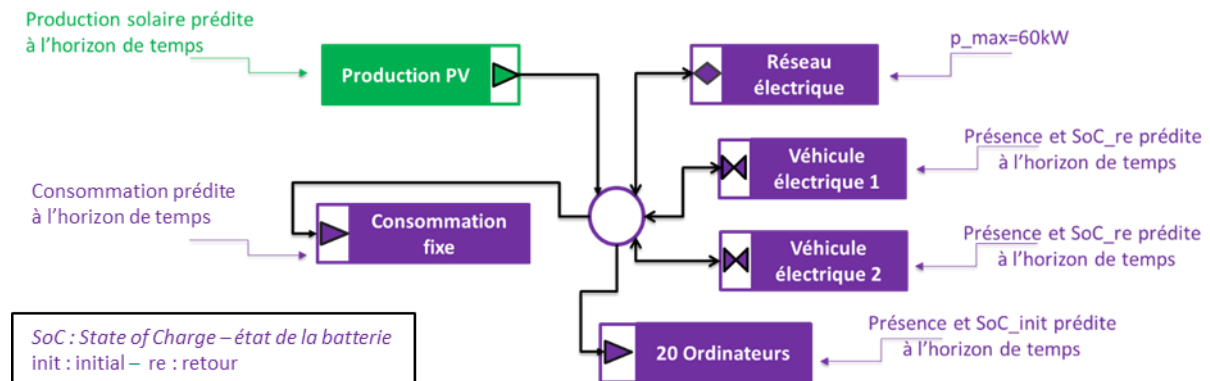


Figure 1 : Représentation graphique du système énergétique sous *OMEGAAlpes*

3.3. FORMALISATION DU PROBLEME D'OPTIMISATION

3.3.1. Fonction objectif

Le problème d'optimisation à résoudre consiste à minimiser le coût opérationnel et maximiser l'autoconsommation en agissant sur la charge et décharge des véhicules électriques et la charge des ordinateurs portables. Une combinaison linéaire à part égale est appliquée entre les deux objectifs. Des horizons de prédiction et de contrôle identiques de 24h sont considérés pour le MPC.

3.3.2. Conditions aux limites

Les véhicules électriques

Un tirage aléatoire pour génère les profils de présence des véhicules électriques (VE) sur site. Ce tirage est réalisé une seule fois pour l'ensemble de l'année pour le cas d'étude. La présence aléatoire des

deux véhicules est différée : le VE1 entre 09h00 et 18h00 (loi normale avec un écart-type de $\sigma = 1$), et le VE2 entre 10h00 et 16h00 (loi normale avec un écart-type de $\sigma = 0,2$). Les véhicules sont toujours présents en dehors des heures de travail. Les états de charge au retour (SoC_re) des véhicules sont également générés par un tirage unique. Un état de charge minimal de 10 % est imposé.

Les ordinateurs

De même que pour les véhicules électriques la présence des ordinateurs (PC) est scénarisée pour le cas d'étude. La présence est tirée de manière aléatoire entre 09h00 et 18h00 selon une loi normale avec un écart-type $\sigma = 0,25$. Concernant les états de charge initiaux des ordinateurs à l'arrivée (SoC_init), ils sont également fournis par un tirage unique.

Données météorologiques et production photovoltaïque

La modélisation sur *OpenModelica* de l'installation photovoltaïque permet de prédire la production photovoltaïque en fonction des données météorologiques d'Anglet pour l'année 2018.

Consommation fixe et réseau électrique

La consommation mesurée de l'année 2018 sert de référence pour la prise en compte de la part des équipements non pilotables du cas d'usage. Une tarification électrique journalière est appliquée avec des coûts en heures creuses et en heures pleines (Tableau 1). Les impacts environnementaux sont également considérés en tant que caractéristique du réseau avec des émissions de CO₂ décrivant le mix électrique dynamique de l'année de référence 2018.

	Heures creuses	Heures pleines
Horaires	21 h à 6 h	6 h à 21 h
Coût (€/kWh)	0,11364	0,13512

Tableau 1 : Tarification électrique

4. RESULTATS ET DISCUSSIONS

La simulation est appliquée avec un pas de temps de 10 min et un horizon de prédiction de 24 h. Le contrôle prédictif est appliqué pour les deux types de prédicteur des conditions aux limites : naïf et parfait. Une stratégie de référence est calculée avec une régulation réactive qui recharge systématiquement les VE et les PC lorsqu'ils sont présents.

Les résultats des stratégies annuelles sont récapitulés dans le Tableau 2. L'import du réseau pour les stratégies optimales est diminué par rapport à la stratégie réactive. Cela est dû à l'impact du stockage des VE, où les commandes optimales indiquent un état de charge moyen plus bas, et dans une moindre mesure, à la contribution de la production PV. En considérant l'export vers le réseau, avec l'hypothèse d'un prix de revente de l'électricité identique à son prix d'achat, la réduction du coût des charges pilotables dépasse les 70 %. Le coût export réseau reflète le gain financier lié à l'injection du surplus d'énergie dans le réseau électrique. On peut constater que la stratégie optimale utilisant le prédicteur parfait présente de meilleures performances par rapport au prédicteur naïf, notamment en matière de coût d'importation depuis le réseau et de taux d'autoconsommation. Cependant, cette différence peut être faible, par exemple en ce qui concerne le coût de l'import/export des charges pilotables (2 %). Les résultats obtenus sur ce cas d'étude suggèrent que les performances prédictives peuvent ne pas être

primordiales pour obtenir des stratégies de pilotage efficaces. Ces résultats devront être confirmés par une analyse d'incertitude plus approfondie sur les prédicteurs.

Par ailleurs, le taux d'autoconsommation imposé par les stratégies n'atteint jamais 100 %, même en réactif : ceci peut indiquer que l'autoconsommation totale pourrait ne pas refléter l'optimum.

	Réactif	Naïf	Écart	Parfait	Écart
Production PV (kWh)	10 203	10 203		10 203	
Import réseau (kWh)	69 077	60 404		56 067	
Export réseau (kWh)	941	4 117		555	
Coût import réseau (€)	8 995	7 397	-18%	6 871	-24%
CO ₂ import réseau (kg CO ₂)	3 719	3 217	-13%	3 006	-19%
Coût import des charges pilotables (€)	2 832	2 973	-71 %	2 724	-73 %
Coût export des charges pilotables (€)	0	2 160		1 973	
Taux d'autoconsommation (%)	90,8	85,3		97,9	
État de charge moyen des VE (%)	97,6	70,7		73,3	

Tableau 2 : Résultats des stratégies étudiées sur une année

Il est également intéressant d'analyser sur une semaine les profils de commande calculés. Les figures Figure 2 et Figure 3 illustrent les résultats des stratégies optimales employant respectivement le prédicteur naïf et parfait pendant la semaine de janvier 2018. Les flux énergétiques du bâtiment sont représentés avec la tarification électrique (sous-figure (a)). La production PV (en bleu) est assez faible et contribue de manière limitée aux besoins énergétiques du bâtiment. L'export vers le réseau (en vert) englobe à la fois la production PV non consommée localement et la décharge des batteries des VE. Les profils de charge (en orange) et décharge (en vert) des VE sont ensuite illustrés (sous-figure (b)). L'optimisation impose la charge au début des périodes creuses. Cette charge est responsable des pics de puissance observés dans l'import réseau (en rouge, sous-figure (a)). Une seconde charge plus restreinte est observée à la fin des périodes creuses. La décharge des batteries survient lorsque les tarifs électriques sont en heures pleines et que la demande des charges non pilotables du bâtiment est élevée. Cette décharge prend fin au départ des VE pendant la journée. Enfin, les évolutions temporelles des états de charge de chaque véhicule sont exposées (sous-figure (c)). Il peut être constaté que les VE sont chargés pratiquement simultanément, avec une différence d'environ une heure en raison du scénario de présence de chacun. Les pointillés décrivent les périodes où les véhicules ne sont pas présents. La dynamique suit le profil de commande appliqué : la première charge permet d'augmenter l'état de la batterie qui est au plus faible au retour des véhicules. La seconde charge permet d'anticiper la décharge qui se produit au début des heures pleines. Les profils des deux véhicules résultants de la stratégie employant le prédicteur parfait sont assez similaires. En revanche, avec le prédicteur naïf, la distinction entre les deux véhicules est plus marquée. On observe ainsi un profil différent pendant le weekend. En effet, le samedi 20/01/2018, l'évolution de l'état de la batterie est semblable au comportement pendant un jour ouvré. Ceci démontre un problème d'effet de bord avec la prédiction naïve, qui utilise les conditions aux limites du vendredi, expliquant l'export réseau plus important ce jour-là.

Sur ce cas d'étude, la production PV est assez faible, ne représentant que 15 % des charges. Il serait intéressant d'augmenter la production photovoltaïque afin d'évaluer son influence sur la stratégie optimale. De même, le pilotage de la charge des ordinateurs n'a pas été présenté, car la consommation

associée est négligeable par rapport aux VE. Par ailleurs, le prédicteur naïf n'est pas sans limitations, en particulier si l'horizon de prédiction est étendu. Un problème d'effet de bord a été constaté qui modifie sa capacité d'export et nécessite d'être traité. Enfin, les aspects de robustesse doivent être davantage étudiés, le cas d'étude ne considérant ni contrainte d'usage (par exemple état de charge minimal au départ des VE) ni variabilité des conditions aux limites modélisées avec des scénarios de tirage unique.

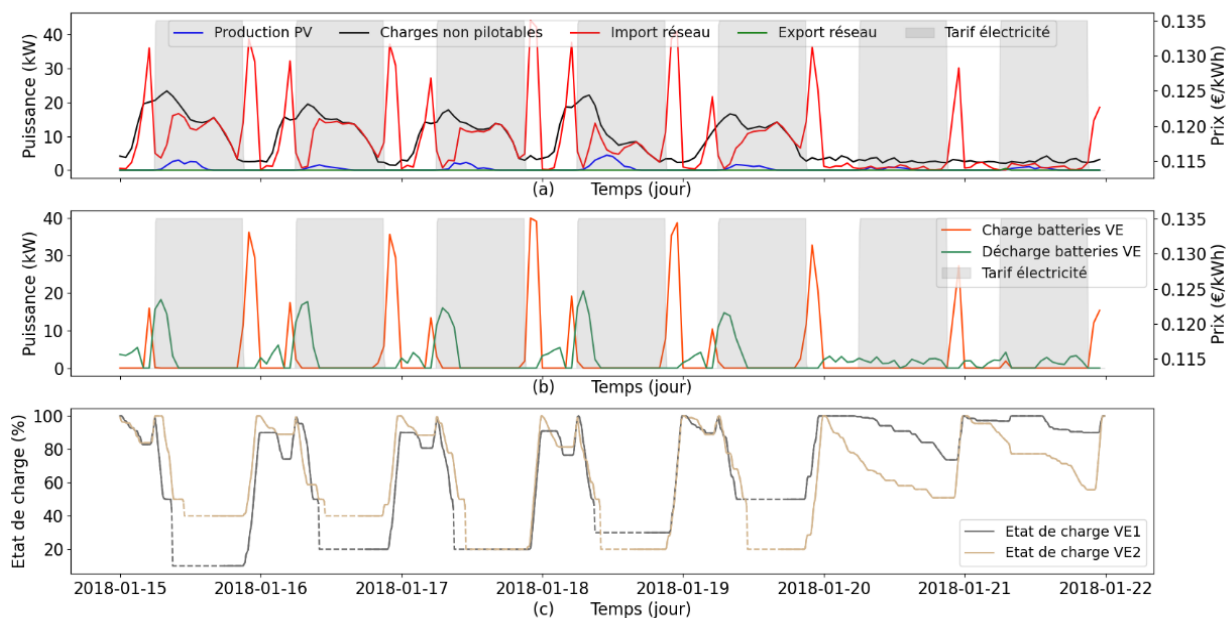


Figure 2 : Stratégie optimale avec le prédicteur parfait : (a) Profils de charge des flux énergétiques du bâtiment. (b) Trajectoire de charge et décharge des VE. (c) Évolution de l'état de charge des VE

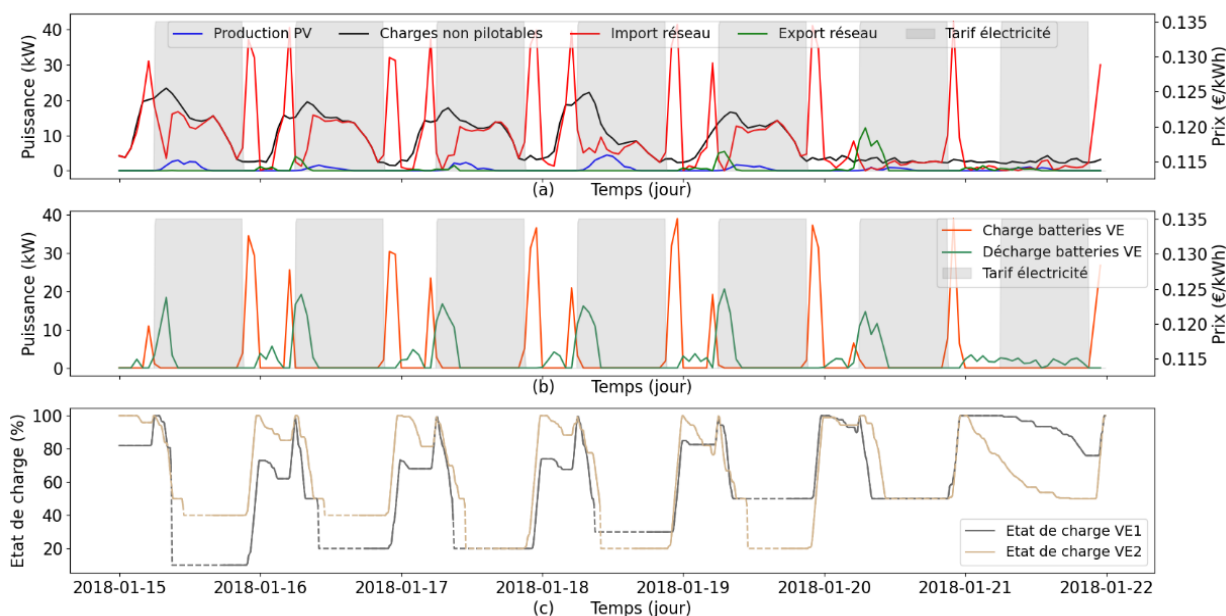


Figure 3 : Stratégie optimale avec le prédicteur naïf : (a) Profils de charge des flux énergétique du bâtiment. (b) Trajectoire de charge et décharge des VE. (c) Évolution de l'état de charge des VE

5. CONCLUSION

Dans cet article, un nouvel outil a été présenté pour identifier des stratégies optimales de pilotage des usages électriques flexibles d'un bâtiment. L'application à un bâtiment tertiaire avec une production photovoltaïque locale et des véhicules électriques a démontré sa capacité à coordonner différentes ressources énergétiques pour réduire à la fois les coûts et les émissions CO₂. Les résultats présentés sont spécifiques au cas étudié. L'objectif par la suite sera d'étendre les applications à l'échelle du parc afin de traiter les enjeux locaux des territoires d'énergie, tels que la souveraineté et le déploiement de moyens de production et de stockage locaux.

6. REMERCIEMENTS

Cette étude repose sur les développements menés dans le cadre du projet PISE (Pilotage Intelligent des Systèmes énergétiques à vecteur Électrique dans le bâtiment) au sein de l'équipe de recherche commune [GP2E](#) (Garantie des Performances Énergétique et Environnementale des bâtiments), entre le laboratoire I2M Bordeaux et l'Institut pour la Transition Énergétique NOBATEK/INEF4, avec un financement du Comité régional de Nouvelle Aquitaine (CRNA).

7. REFERENCES

- ADEME. 2017. « L'effacement de consommation électrique en France ».
- Bai, Yifei, Weirong Zhang, Tingjia Yu, Jingjing Wang, Gaofeng Deng, Jinguang Yan, et Jiajia Liu. 2023. « Flexibility quantification and enhancement of flexible electric energy systems in buildings ». *Journal of Building Engineering* 68 : 106114. <https://doi.org/10.1016/j.jobee.2023.106114>.
- Drgoňa, Ján, Javier Arroyo, Iago Cupeiro Figueroa, David Blum, Krzysztof Arendt, Donghun Kim, Enric Perarnau Ollé, et al. 2020. « All you need to know about model predictive control for buildings ». *Annual Reviews in Control* 50 : 190-232. <https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2020.09.001>.
- Hodencq, Sacha, Mathieu Brugeron, Jaume Fitó, Lou Morriet, Benoit Delinchant, et Frédéric Wurtz. 2021. « OMEGAAlpes, an Open-Source Optimisation Model Generation Tool to Support Energy Stakeholders at District Scale ». *Energies* 14 (18): 5928. <https://doi.org/10.3390/en14185928>.
- Segundo Sevilla, Felix R., Valerijs Knazkins, Chan Park, et Petr Korba. 2015. « Advanced Control of Energy Storage Systems for PV Installation Maximizing Self-Consumption* ». *IFAC-PapersOnLine*, 9th IFAC Symposium on Control of Power and Energy Systems CPES 2015, 48 (30): 524-28. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.12.433>.
- Strauch, Pascal, Weimin Wang, et Felix Langner. 2024. « Model Predictive Control for Demand Flexibility of a Residential Building with Multiple Distributed Energy Resources ». *Energy and Buildings* 305. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113884>.

Caractérisation des propriétés thermiques de granulats de miscanthus pour la construction

Mohammed Yacine BENARIBA*¹, Anh Dung TRAN LE¹, Dang Mao NGUYEN², Omar DOUZANE¹, Geoffrey PROMIS¹

¹ *Laboratory of Technologies Innovative (LTI), University of Picardie Jules Verne, Avenue des facultés, Le Bailly, 80025 Amiens Cedex, France*

² *LERMAB, University of Lorraine, 186 Rue de Lorraine, 54400 Cosnes-et-Romain, France*

*mohammed.yacine.benariba@u-picardie.fr

RESUME. Au regard des enjeux environnementaux actuels, les produits et technologies soutenables sont largement exploré par les acteurs de la Recherche et du Développement. Ainsi, la valorisation des matériaux biosourcés représente une alternative efficiente aux matériaux de construction traditionnels, impactant durablement notre environnement tant du point de vue de leur fabrication que lors de leur cycle d'exploitation et de recyclage et leur réemploi. Des études antérieures démontrent qu'une large utilisation de ces matériaux permettrait de réduire les impacts environnementaux de l'acte de bâtir et d'exploiter les bâtiments, tout en garantissant le confort hygrothermique des occupants.

De nombreuses sources végétales peuvent être valorisées pour la production de matériaux de construction. Dans le domaine de l'écoconstruction, une préférence est accordée à l'utilisation de flux locaux, voire ultra-locaux dans l'industrie de la construction. Ainsi, l'objectif de cette étude est de caractériser les propriétés physiques, thermiques de particules de miscanthus. Abondamment, disponibles dans certains territoires mais peu exploitées, ces ressources sont examinées pour leur potentiel dans différentes applications dans le secteur du bâtiment. L'identification des propriétés thermiques (conductivité thermique et chaleur spécifique) des granulats de miscanthus en vrac, de différentes longueurs (14 mm, 20 mm et 50 à 70 mm), sera menée expérimentalement pour analyser l'influence de la température et de l'humidité relative sur leur performance thermique, in fine, leur compatibilité à intégrer la composition d'un matériau de construction biosourcés.

MOTS-CLÉS : Matériau biosourcé ; Miscanthus ; Propriétés thermiques ; Isolation thermique

ABSTRACT. Given current environmental challenges, sustainable products and technologies are widely explored by research and development actors. In this context, the valorization of biobased materials represents an efficient alternative to traditional construction materials, on our environment and sustainability. The studies in the literature have demonstrated that the use of biobased materials would help reduce the environmental impacts while ensuring the hygrothermal comfort in building.

The objective of this study is to characterize the physical and thermal properties of miscanthus which are highly available in certain regions in France and little investigated in the literature, for various applications in building. In addition to the physical properties of a miscanthus particle, the determination of thermal properties (thermal conductivity and specific heat capacity) of miscanthus in bulk with different particle lengths (14 mm, 20 mm, and mixture between 50 and 70 mm), will be experimentally conducted. Finally, this article will also analyze the influence of temperature and relative humidity on the thermal performance of miscanthus for its application in building.

KEYWORDS : Miscanthus ; Thermal properties ; Thermal insulation

1. INTRODUCTION

L'impact du secteur de la construction sur l'environnement, incluant la consommation énergétique et les émissions de CO₂, est devenu une préoccupation majeure ces dernières années. Ce secteur est le plus

grand consommateur d'énergie, représentant 43 % de la consommation totale, dont plus de la moitié est utilisée pour le chauffage (MTECT 2022). En réponse à cette problématique, des réglementations ont été mises en place pour limiter la consommation énergétique à moins de 50 kWh ep/(m².an). Il est donc essentiel de mettre en œuvre un système d'isolation efficace afin de réduire les pertes de chaleur, en utilisant par exemple des matériaux biosourcés pour l'isolation en vrac. L'usage de ces matériaux semble prometteur, surtout dans le cadre de la rénovation, en raison de leurs bonnes propriétés hygrothermiques, acoustiques et thermiques. Cette approche permet d'améliorer le confort thermique des habitations, tout en réduisant les déperditions de chaleur.

Dans le marché actuel, différents matériaux biosourcés peuvent être employés comme isolants en vrac, tel que la chènevotte, la paille de colza, les anas de lin, etc. Cependant, le miscanthus, bien que faisant partie de ces matériaux biosourcés, reste relativement peu connu en tant qu'isolant en vrac, principalement en raison de son stade de développement actuel. Cette étude se concentre sur la caractérisation des propriétés thermiques des granulats de miscanthus en fonction de l'humidité relative afin, d'évaluer leur potentiel en tant que matériau isolant. Trois longueurs différentes de granulats de miscanthus ont été examinées au moyen d'un dispositif de mesure utilisant la méthode fluxmétrique, permettant de déterminer la conductivité thermique et la chaleur massique des granulats. Les mesures ont été réalisées à trois niveaux d'humidité relative : état sec, 50 % et 95 % d'humidité relative.

2. CAMPAGNE EXPERIMENTALE

2.1. MATERIAU

Le miscanthus étudié dans ce travail a été fourni par la société LAMONT-COLIN ENERGIES, située dans la région Hauts-de-France. Le miscanthus est récolté, puis dépoussiéré. Les granulats de miscanthus sont obtenus par séchage, broyage et tamisage des tiges après la récolte (Ratsimbazafy 2022). La figure 1 illustre la morphologie et la taille des granulats bruts de miscanthus. Trois longueurs différentes de ces granulats ont été utilisées dans cette étude : 14 mm, 20 mm et un mélange de 50 à 70 mm. Étant donné que les sacs de miscanthus contiennent à la fois des fibres et de la poudre, et que la taille et la forme des granulats de miscanthus sont variées, un processus de tamisage est nécessaire pour éliminer la poudre et les fibres afin d'obtenir une taille régulière des granulats.

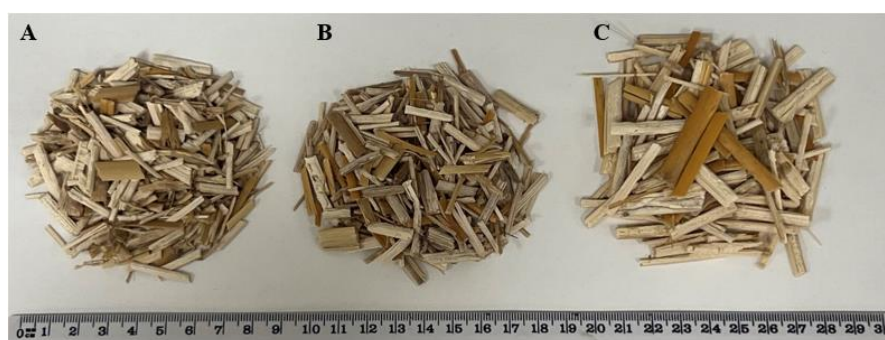


Figure 1 : Morphologie et la taille des granulats de miscanthus de (A) : 14 mm, (B) : 20 mm, (C) : 50 à 70 mm

Les granulats de miscanthus présentent des largeurs et des épaisseurs différentes, avec les dimensions moyennes résumées dans le tableau 1.

	Longueur (mm)	Largeur (mm)	Épaisseur (mm)
Miscanthus (A)	14	4,2	2,1
Miscanthus (B)	20	5,3	1,8
Miscanthus (C)	50 à 70	6	1,8

Tableau 1 : Dimension des granulats de miscanthus

2.2. CARACTERISATION DES PROPRIETES THERMIQUES DE MISCANTHUS EN VRAC

La caractérisation des propriétés thermiques du miscanthus en vrac, notamment la conductivité thermique et la chaleur massique, a été étudiée en utilisant la méthode fluxmétrique. Les tests ont été menés conformément aux recommandations de RILEM, en utilisant un dispositif expérimental de fluxmètre dans des conditions de laboratoire standard (23 °C et 50 % d'humidité relative).

2.2.1. Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental utilisé pour la mesure simultanée de la conductivité thermique et de la chaleur massique comprend deux plaques échangeuses, l'une chaude et l'autre froide. La plaque inférieure est fixe, tandis que la plaque supérieure peut se déplacer verticalement (figure 2). Les deux plaques échangeuses sont alimentées par la circulation d'eau glycolée provenant de deux bains thermostatés réglables manuellement.

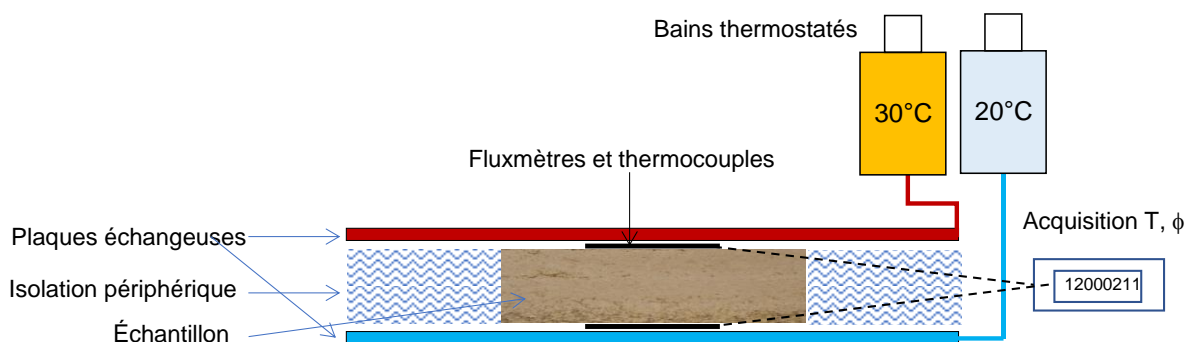


Figure 2 : Vue schématique de dispositif expérimental

Le dispositif est équipé de deux thermocouples de type T d'une précision de $\pm 0,1$ °C et de deux fluxmètres thermique « Captec » de dimensions 10×10 cm², ayant une sensibilité de 75 mV/(W.cm²), qui sont connectés à une centrale d'acquisition automatique.

2.2.2. Préparation des échantillons

La préparation des échantillons a été effectuée selon les recommandations de la RILEM concernant les dimensions des échantillons et le processus de séchage. Les granulats de miscanthus ont été placés dans un cadre isolant en polystyrène extrudé pour assurer une isolation latérale et favoriser le transfert de chaleur unidirectionnel. Ces cadres ont une forme parallélépipédique, avec des côtés de 25 cm et une épaisseur de 6 cm. Il est à noter que la RILEM recommande une épaisseur minimale de 4,5 cm et une longueur minimale équivalente à deux fois l'épaisseur (Amziane et al. 2017).

Les essais ont été réalisés à sec et à des humidités relatives de 50 % et 95 %. Pour l'état sec, les granulats ont été séchés à une température de 60 °C jusqu'à ce que leur masse devienne constante (variation inférieure à 0,1 % entre deux pesées effectuées à 24 heures d'intervalle). Avant de commencer

les mesures, les granulats ont été recouverts d'un sac et laissés dans la salle de mesure conditionnée à 23 °C jusqu'à ce que les échantillons atteignent la température ambiante. Les échantillons ont été pesés avant et après les mesures afin de s'assurer qu'il n'y avait pas de perte de masse pendant l'essai. Il convient de noter qu'à l'état sec, la différence de masse observée était négligeable, de l'ordre de 0,1 %, ce qui est considéré comme insignifiant.

Pour étudier l'impact de l'humidité relative sur les propriétés thermiques, les granulats ont été placés dans une enceinte climatique régulée à 50 % et 95 % d'humidité relative et à une température de 23 °C, jusqu'à ce que leur masse devienne stable avant de procéder aux mesures.

2.2.3. Protocole d'essai

Le protocole de mesure commence par la stabilisation de la température de l'échantillon à $T_0 = 20$ °C grâce aux deux plaques échangeuses entre lesquelles d'échantillons est pris en sandwich, pendant environ 9 heures. Les températures des faces inférieure et supérieure de l'échantillon sont mesurées continuellement à l'aide de thermocouples.

Après stabilisation de la température à 20 °C, la face supérieure de l'échantillon est soumise à une élévation brusque de la température ($T_{sup} = 30$ °C) afin de créer un gradient de température ($\Delta T = T_{sup} - T_{inf} = 10$ °C). L'échantillon est ensuite laissé pendant une durée suffisante pour atteindre le régime permanent.

Les données récupérées sont ensuite analysées afin de déterminer les propriétés thermiques (λ , C_p , D_{th} et E_{ff}) de l'échantillon. La conductivité thermique est calculée à partir de la densité de flux équilibré atteinte une fois le régime permanent établi, selon l'expression suivante :

$$\lambda = \phi \frac{e}{(T_{sup} - T_{inf})} \quad (1)$$

Avec : λ : conductivité thermique du matériau [W/(m.K)] ; T_{sup} et T_{inf} : températures des faces supérieure et inférieure de l'échantillon [K] ; e : épaisseur de l'échantillon [m] ; ϕ : densité de flux traversant l'échantillon à l'équilibre [W/m²].

La chaleur massique est déterminée en calculant la quantité de chaleur stockée par mètre carré d'échantillon pendant la phase transitoire de l'essai, correspondant à l'aire entre les courbes des densités de flux mesurées sur les faces supérieure et inférieure. La formule utilisée pour calculer la chaleur massique est la suivante :

$$C_{p0} = \frac{\int_0^{t_f} \Delta\phi \cdot dt}{e\rho_0(T_m - T_0)} \quad (2)$$

Avec :

T_0 : Température initiale de la face inférieure de l'échantillon [K] ; T_m : température moyenne [K] ; $\Delta\phi$: différence de densité de flux thermique entre les deux faces de l'échantillons [W/m²].

La diffusivité et l'effusivité thermiques sont calculées à partir de la chaleur massique, de la masse volumique et de la conductivité thermique.

3. RESULTAT ET DISCUSSION

3.1. ETAT SEC

Les données obtenues du dispositif fluxmétrique représentent l'évolution des densités de flux de chaleur de la partie supérieure et inférieure de l'échantillon en fonction du temps.

Les résultats des propriétés thermiques, calculés à l'état sec pour les trois longueurs de miscanthus, sont synthétisés dans le Tableau 2.

Matériaux	ρ_0 [kg/m ³]	λ_0 [mW/(m.K)]	C_{p0} [J/(kg.K)]	D_{th} $\times 10^{-7}$ [m ² /s]	E_{ff} [J/(m ² .K.s ^{1/2})]
Miscanthus (A)	184,3	51	1166	2,4	104,4
Miscanthus (B)	180,1	51	1067	2,7	99,3
Miscanthus (C)	142,4	51	959	3,7	83,5
Miscanthus (Dahir igue 2023)	138	55	1215	3,0	95,3
Paille de colza (Brouard et al. 2018)	64,9	43	-	-	-
Chènevotte (Viel et al. 2018)	87,9	53	-	-	-
Granulat de Chanvribat (Zaknoute 2011)	-	-	1350	-	-

Tableau 2 : Propriétés thermiques des granulats du miscanthus à l'état sec

La première observation révèle une différence de masses volumiques entre les trois granulats de miscanthus, ce qui est cohérent compte tenu de leurs dimensions variables.

Les résultats de conductivité thermique obtenus sont cohérents avec ceux trouvés dans la littérature. Par exemple, dans l'étude de (Dahir igue 2023), la conductivité thermique des granulats de miscanthus est de 55 mW/(m.K), valeur proche de nos mesures (51 mW/(m.K)). La conductivité thermique du miscanthus est acceptable pour une utilisation en isolation en vrac, bien que cette valeur demeure supérieure à celle de la paille de colza, qui est d'environ 43 mW/(m.K) selon (Brouard et al. 2018) et inférieure à celle de la chènevotte (53 mW/(m.K)) (Viel et al. 2018). Cette différence peut être expliquée par le fait que la masse volumique des granulats de miscanthus étudiés dans ce projet (142,4 kg/m³) est plus élevée que celle de la paille de colza (64,9 kg/m³) selon (Brouard et al. 2018), et aussi par leurs propriétés microstructurales. Les granulats végétaux présentent des porosités importantes, comme l'ont montré des études antérieures. Par exemple, les granulats de miscanthus et de paille de colza ont des porosités élevées, de l'ordre de 90,5 % (Chen et al. 2020) et 94 % (Viel et al. 2018) respectivement.

Les résultats de la diffusivité thermique du miscanthus révèlent une faible valeur, permettant d'atténuer la diffusion de chaleur provenant de l'extérieur.

Les valeurs de conductivité thermique des trois différentes longueurs différentes de granulats sont identiques montrant que la longueur des granulats n'a pas d'impact sur la conductivité thermique à l'état sec. Ce résultats suggère une faible conductivité thermique des granulats, en comparaison avec celle de l'air, établie à environ 25 mW/(m.K).

Une autre étude portant sur l'effet de la variation de la masse volumique sur les propriétés thermiques a été réalisée sur des granulats de 20 mm. Un compactage maximal a été appliqué à ces granulats, entraînant une augmentation de la masse volumique de 180 kg/m³ (sans compactage) à 205 kg/m³. La conductivité thermique mesurée est de 50,4 mW/(m.K). Ce résultat démontre une influence très limitée du compactage sur la conductivité thermique des granulats. De plus, étant donné que les valeurs de conductivité thermique du miscanthus de 14 mm (A) et de 20 mm (B) sont presque identiques, dans la section suivante nous aborderons l'influence de l'humidité sur la performance thermique des miscanthus A et C.

3.2. IMPACT DE L'HUMIDITE SUR LA PERFORMANCE THERMIQUE DE MISCANTHUS

Les mesures des propriétés thermiques des granulats de miscanthus A et C à 50 % et 95 % d'humidité relative ont été réalisées selon la même procédure utilisant la méthode fluxmétrique. Les résultats sont résumés dans le tableau 3.

Propriétés thermiques	ρ_0 [kg/m ³]	λ_0 [mW/(m.K)]	C_{p0} [J/(kg.K)]	$D_{th} 10^{-7}$ [m ² /s]	E_{ff} [J/(m ² .K.s ^{1/2})]
Miscanthus A (50 % HR)	194,4	52	1262	2,1	113,2
Miscanthus A (95 % HR)	221,2	65	1616	1,8	152,6
Miscanthus C (50 % HR)	151	54	1214	3	99,8
Miscanthus C (95 % HR)	174,2	71	1674	2,5	144,3

Tableau 3 : Propriétés thermiques des granulats de miscanthus à 50 % et 95 % HR

Les résultats de la variation de la conductivité thermique en fonction d'humidité relative de miscanthus sont présentés dans la figure 3.

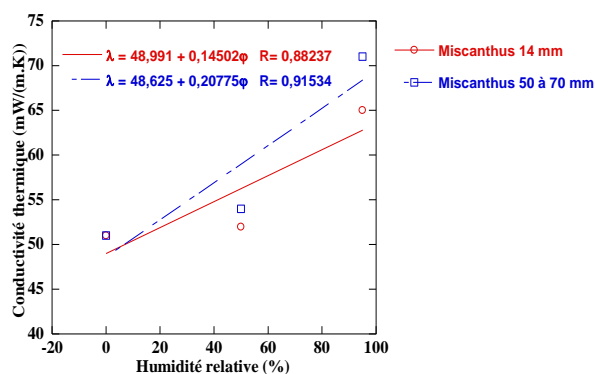


Figure 3 : Conductivité thermique de miscanthus en fonction de l'humidité relative

Les résultats indiquent que l'influence de l'humidité relative sur les propriétés thermiques de miscanthus est significative, comme le montrent la figure 3 et le tableau 3. Concernant la conductivité thermique, à un taux d'humidité relative de 50 %, une légère augmentation de 1,96 % a été observée pour le miscanthus de 14 mm (A), et de 5,88 % pour le miscanthus de 50 à 70 mm (C), passant respectivement à 52 mW/(m.K) et à 54 mW/(m.K). Cette augmentation reste modérée, indiquant un impact limité de cet état d'humidité relative sur la conductivité thermique des granulats.

À un taux d'humidité relative très élevées, de 95 % une augmentation significative de la conductivité thermique a été observée, soit une augmentation de 25 % pour les granulats A de 14 mm (65 mW/(m.K)) et de 31,48 % pour les granulats C de 50 à 70 mm (71 mW/(m.K)). À cet état d'humidité relative, une différence de 9,23 % de la conductivité thermique est observée entre les granulats de 14 mm et ceux de 50 mm, indiquant que la dimension des granulats influence les propriétés thermiques à 95 % d'humidité relative. Cette différence est plus prononcée par rapport à l'état à 50 % d'humidité relative, où elle est d'environ 3,84 %.

Cette augmentation de la conductivité thermique est logique étant donné que les granulats de miscanthus sont classés comme des granulats légers en raison de leur forte porosité intra-particulaire dont la dimension varie de 30 à 50 μm (Chen et al., 2017). Cette caractéristique poreuse favorise l'absorption élevée d'humidité, attribuable à la présence de pores plus nombreux et plus larges offrant une plus grande surface d'absorption. Par conséquent, cela peut entraîner une augmentation de la quantité d'eau dans les pores, provoquant un gonflement des granulats et une réduction de la porosité inter-particulaire.

Comme la conductivité thermique de l'eau est plus élevée que celle de l'air, l'augmentation de la conductivité thermique des granulats en vrac en fonction de l'humidité peut être expliquée clairement par la courbe d'isotherme de sorption qui sera confirmée dans une prochaine étude portant sur les propriétés hydriques des granulats de miscanthus.

Afin de fournir une base de données du miscanthus pour les simulations thermiques, les deux équations linéaires, basées sur les valeurs de la conductivité thermique mesurées à différentes humidités relatives, sont établies et proposées pour les granulats de 14 et 50 à 70 mm, respectivement :

$$\lambda = 48,991 + 0,14502 \varphi \quad (5)$$

$$\lambda = 48,625 + 0,20775 \varphi \quad (6)$$

4. CONCLUSION

Dans cette étude, les propriétés thermiques des granulats de miscanthus en vrac ont été déterminées à l'aide d'un dispositif utilisant la méthode fluxmétrique, avec une préparation des échantillons conforme aux recommandations de la RILEM. Les propriétés thermiques de miscanthus de trois longueurs différentes (14, 20 et 50 à 70 mm) sous trois niveaux d'humidité relative (sec, 50 % et 95 %) ont été caractérisées. De plus, l'effet du compactage sur les propriétés thermiques a également été étudié pour les granulats de 20 mm de longueur. Les principales conclusions de cette étude sont résumées comme suit :

- Les granulats de miscanthus en vrac présentent une faible conductivité thermique (de l'ordre de 50 mW/(m.K)), ce qui les rend appropriés pour une utilisation comme isolant en vrac.
- Les mesures effectuées ont démontré qu'il n'y a pas d'influence de la dimension des granulats sur la conductivité thermique à l'état sec.
- L'augmentation de l'humidité relative a un impact sur la conductivité thermique. Cependant, cet effet demeure limité à une humidité relative de 50 % avec une augmentation ne dépassant pas 6 %. En revanche, cette augmentation devient significative à l'humidité relative élevée de 95 %, pouvant

dépasser les 32 %. Cette évolution est simplement due à l'augmentation de la présence d'humidité dans les pores des granulats, liée à la courbe isotherme de sorption.

En résumé, l'étude présentée dans cet article permet de fournir des données essentielles sur les propriétés thermiques du miscanthus en vrac, permettant ainsi des simulations thermiques à l'échelle de la paroi et du bâtiment.

5. REMERCIEMENT

Ce travail est réalisé dans le cadre du projet HygroPo-BBM (ANR-21-CE22-0026). Les auteurs tiennent à remercier l'ANR pour ce financement.

6. BIBLIOGRAPHIE

- Amziane, Sofiane, Florence Collet, Mike Lawrence, Camille Magniont, Vincent Picandet, et Mohammed Sonebi. 2017. « Recommendation of the RILEM TC 236-BBM: Characterisation Testing of Hemp Shiv to Determine the Initial Water Content, Water Absorption, Dry Density, Particle Size Distribution and Thermal Conductivity ». *Materials and Structures* 50 (3): 167. <https://doi.org/10.1617/s11527-017-1029-3>.
- Brouard, Yoann, Naima Belayachi, Dashnor Hoxha, Narayanaswami Ranganathan, et Stéphane Méo. 2018. « Mechanical and Hygrothermal Behavior of Clay – Sunflower (*Helianthus Annuus*) and Rape Straw (*Brassica Napus*) Plaster Bio-Composites for Building Insulation ». *Construction and Building Materials* 161 (février): 196-207. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.140>.
- Chen, Y.X., F. Wu, Qingliang Yu, et H.J.H. Brouwers. 2020. « Bio-Based Ultra-Lightweight Concrete Applying Miscanthus Fibers: Acoustic Absorption and Thermal Insulation ». *Cement and Concrete Composites* 114 (novembre): 103829. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103829>.
- Dahir igue, Fathia. 2023. « Optimisation des performances hygrothermiques de parois en bétons biosourcés : Approche expérimentale et numérique ». Thèse de doctorat, Université de Picardie Jules Verne,.
- Ministère de la transition écologique et de la cohésion des territoires. 2022. « Construction et performances environnementale du bâtiment ». Consulté le 23 février 2024. <https://www.scribbr.fr/citation-des-sources/exemples-citations-chicago/>
- Ratsimbazafy, Herinjaka haga. 2022. « Evaluation du potentiel de co-produits agricoles locaux valorisables dans le domaine des matériaux de construction (palomac) ». Thèse de doctorat, Université de Toulouse,.
- Viel, Marie, Florence Collet, et Christophe Lanos. 2018. « Chemical and Multi-Physical Characterization of Agro-Resources' by-Product as a Possible Raw Building Material ». *Industrial Crops and Products* 120 (septembre): 214-37. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.04.025>.
- Zaknoue, Atika. 2011. « Etude du comportement thermohydrigue de matériaux " chanvre-chaux " lors de la phase de séchage – Estimation par technique inverse des propriétés hydriques ». Thèse de doctorat, Université de Bretagne Sud,.

Revue analytique de l'influence de la microstructure sur les propriétés chimiques, physiques et thermiques de granulats végétaux

Mohammed Yacine BENARIBA*¹, Anh Dung TRAN LE¹, Dang Mao NGUYEN²,
Geoffrey PROMIS¹

¹ *Laboratory of Technologies Innovative (LTI), University of Picardie Jules Verne, Avenue des facultés, Le Bailly, 80025 Amiens Cedex, France*

² *LERMAB, University of Lorraine, 186 Rue de Lorraine, 54400 Cosnes-et-Romain, France*

*mohammed.yacine.benariba@u-picardie.fr

RESUME. L'acte de bâtir et d'exploiter les constructions impacte significativement notre environnement au regard de la forte demande sectorielle en ressources naturelles et en énergie. Par conséquent, les enjeux stratégiques et sociétaux, tant nationaux qu'internationaux, encouragent le développement de solutions à la fois efficaces et respectueuses de l'environnement pour la construction des bâtiments. Les matériaux biosourcés, champs de recherche investi depuis plusieurs années, offrent des perspectives efficaces et de rupture en raison de leurs performances d'isolations thermiques et excellentes capacités de régulation hygrique.

De nouvelles techniques de caractérisation, notamment la nano-tomographie, permettent de mieux appréhender les phénomènes complexes interagissant au niveau de la microstructure et gouvernant le comportement mésoscopique de ces matériaux. Ainsi, l'objectif de cette revue de la littérature est de fournir une synthèse approfondie et analytique de l'état de l'art sur les études expérimentales sur des propriétés chimiques, physiques et thermique de granulats biosourcés soulignant les interactions avec la microstructure et la porosité. Pour ce faire, chènevotte, anas de lin, paille de colza et miscanthus sont préférentiellement ciblés afin de mettre également en exergue l'effet de la composition chimique des granulats végétaux.

MOTS-CLÉS : Granulats de construction biosourcés ; Propriétés microstructurales ; Propriétés multi-physiques ; Porosité

ABSTRACT. The building sector significantly impacts our environment due to high demand for natural resources and energy. Consequently, strategic and societal challenges, both nationally and internationally, encourage the development of solutions that are both efficient and environmentally friendly for building construction. Biobased materials, a research field that has been grown for several years, offer efficient perspectives due to their high thermal and hygric performances.

New characterization techniques such as nano-tomography, allow for a better understanding of the complex phenomena interacting at the microstructure level and governing the mesoscopic behavior of these materials. Thus, the objective of this literature review is to provide an analytical synthesis of the state of the art in the experimental studies on the chemical, physical, and thermal properties of biobased aggregates, emphasizing interactions with microstructure and porosity. In this study, hemp shives, flax shives, rape straws, and miscanthus are targeted to highlight the effect of chemical composition of biobased aggregates.

KEYWORDS : Biobased aggregates ; Microstructural properties ; Multi-physical properties ; Porosity ; Thermal properties

1. INTRODUCTION

Ces dernières années, le secteur de la construction a suscité une attention croissante en raison de son impact environnemental, principalement attribuable à l'augmentation de la consommation d'énergie et des émissions de CO₂. En effet, ce secteur représente plus de 43 % de la consommation énergétique

annuelle en France et génère environ 23 % des émissions de gaz à effet de serre (GES), selon les données statistiques de 2022 (MTECT 2022).

Cette augmentation a rendu impérative la mise en place de réglementations environnementale (RE 2020). Afin de répondre à ces exigences, l'utilisation de matériaux d'origine végétale émerge comme une solution viable. Ces matériaux présentent de nombreux avantages écologiques, notamment leur capacité à réguler l'humidité et la concentration des polluants, ce qui contribue à améliorer la qualité de l'air intérieur des bâtiments, le confort des occupants, et la durabilité des matériaux biosourcés (Plathner et Woloszyn 2002 ; Woloszyn et al. 2009 ; Viitanen et al. 2010 ; Rahim et al. 2015 ; Tran Le et al. 2021). En outre, ces matériaux offrent une bonne isolation thermique et acoustique, ainsi qu'une durabilité accrue. Leur utilisation permet également de réduire la consommation de ressources non renouvelables et de diminuer la demande en énergie.

Pour améliorer les performances des bétons biosourcés, tel que le béton de miscanthus, ainsi que leurs caractéristiques à l'échelle composite, il est nécessaire d'optimiser la performance des granulats végétaux qui les composent. Ceci nécessite une revue analytique de l'influence de la microstructure sur les propriétés chimiques, physiques et thermiques de granulats végétaux. Notre travail vise à approfondir cette compréhension en étudiant des granulats végétaux tels que la chènevotte, les anas de lin, la paille de colza et le miscanthus. En analysant en profondeur les études expérimentales utilisées pour caractériser les propriétés chimiques, microstructurales, physiques et hygrothermiques de ces granulats dans la première partie de notre étude, nous cherchons à identifier les corrélations entre ces propriétés afin de comprendre les paramètres clés associés aux agrégats. Cette analyse permettra d'évaluer leur potentiel et les solutions pour optimiser les propriétés de la performance de ces matériaux.

2. PROPRIETES DES AGRO-RESSOURCES

2.1. PROPRIETES CHIMIQUES

La revue de la littérature sur les propriétés chimiques des granulats végétaux tels que la chènevotte, la paille de colza, les anas de lin et le miscanthus montre des variations dans les teneurs des composants chimiques, attribuables à divers facteurs tels que la méthode de caractérisation chimique utilisée, etc. Le tableau 1 (Annexe) synthétise les valeurs trouvées dans la littérature.

La teneur en cellulose, en hémicellulose, en lignine, en soluble et en minéraux présents dans les agro-ressources (chènevotte, anas de lin, paille de colza) a été évalué par la méthode Van Soest (Viel et al. 2018). Les résultats montrent que ces ressources contiennent 55 à 95 % de polysaccharides, à savoir de la cellulose, de l'hémicellulose et de la pectine, la cellulose étant le constituant prédominant dans les cellules végétales. Cette méthode a également été utilisée dans un autre projet portant sur l'évaluation des caractéristiques hygrothermiques des matériaux de construction en terre légère (Colinart et al. 2020).

Il est à noter que la composition chimique varie en fonction de plusieurs facteurs tels que la région de culture, les conditions météorologiques (ensoleillement, humidité relative, température, précipitations et vent) et le stade de maturité de la plante (Vignon et al. 1995) (Kymäläinen et Sjöberg 2008). Les agro-ressources présentent une capacité d'adaptation à leur environnement de croissance.

Cette méthode d'analyse de la composition chimique a été employée afin de déterminer la composition chimique et la quantité des différents composants moléculaires présents dans la paille de

colza (Hajj Obeid et al. 2022). L'analyse comparative des compositions chimiques des tiges de colza provenant de trois régions distinctes, révèle des ratios quasi identiques des valeurs de cellulose, d'hémicellulose et de lignine (Hajj Obeid et al. 2022). La confrontation de ces résultats avec ceux présents dans la littérature indique une proportion plus élevée de fraction soluble et une réduction d'hémicellulose, phénomène qui peut être attribué à la présence de croissance fongique dans ce lot particulier. Cette augmentation de la matière soluble s'accompagne d'une diminution de la quantité d'hémicellulose, probablement due à sa détérioration.

L'évaluation de la composition du miscanthus a été effectuée dans le cadre dans la thèse (El hage 2010), en utilisant une méthode normalisée décrite par l'Association Technique de l'Industrie de la Pâte et du Papier (Tappi-249), conformément à la procédure analytique de laboratoire (LAP) établie par le National Renewable Energy Laboratory (NREL). Cette méthode implique une hydrolyse complète des sucres, comprenant la cellulose et les hémicelluloses, au moyen d'une solution d'acide sulfurique à 72 %, suivie par des dosages pondéraux de la lignine et de l'analyse des sucres en phase aqueuse. Cette méthode a également été utilisée dans une autre étude pour analyser la composition chimique du miscanthus (De vrije et al. 2002).

Les pourcentages massiques des composants chimiques du miscanthus trouvés par (El hage 2010) et (De vrije et al. 2002) sont presque identiques, avec une légère variation dans les pourcentages des composants attribuable à l'origine différente du miscanthus. Le miscanthus utilisé dans l'étude de (De vrije et al. 2002), provenant de Groningue, aux Pays-Bas, récolté au printemps, présente une teneur en cellulose plus élevée par rapport au miscanthus utilisé dans l'étude de (El hage 2010), qui provient du lycée agricole à Coucelles-Chaussy, Metz, France.

Le miscanthus récolté sur un site local au Danemark (Skovlunde) (Sorensen et al. 2008) à l'automne présente une teneur en cellulose significativement plus élevée d'environ 40 % par rapport à d'autres sources. Les analyses des matières solides totales (TS), des matières solides volatiles (VS) et de la teneur en cendres du ce miscanthus ont été réalisées conformément aux procédures du NREL, telles que décrites dans les documents "Détermination des matières solides totales dans la biomasse, version 2005" et "Détermination des cendres dans la biomasse, version 2005".

En revanche, la composition chimique du miscanthus étudié par (Ligero et al. 2005) provient d'une plantation expérimentale établie pendant 8 ans dans le cadre du projet de réseau de productivité de miscanthus AIR de l'UE, située près de Santiago de Compostela en Galice, Espagne. Ce dernier miscanthus présente une teneur en lignine plus basse par rapport à d'autres sources.

2.2. PROPRIETES MICROSTRUCTURALES

L'analyse des différentes microstructures des agro-ressources, notamment la chènevotte, les anas de lin et la paille de colza, a été réalisée grâce à des observations microscopiques (optique et MEB) (Viel et al. 2018). La figure ci-après présente des coupes longitudinales et transversales des agrégats à différents niveaux de grossissement, mettant en évidence une structure profondément poreuse.

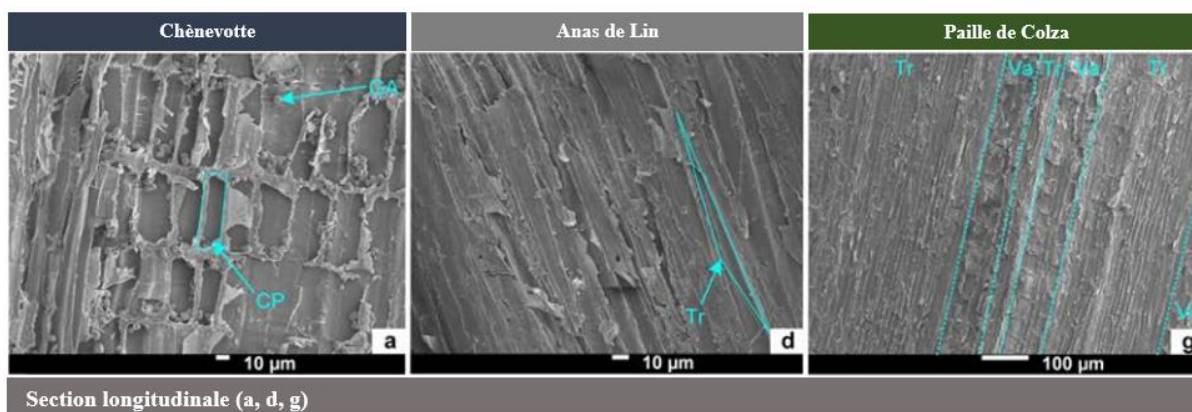


Figure 1 : Sections longitudinales des agro-ressources (chênevotte, anas de lin, paille de colza) (Viel et al. 2018)

GA	: Granule d'Amidon	Tr	: Trachéide	CP	: Cellule de Parenchyme
Va	: Vaisseau				
Trachéides :	Cellules creuses de grande longueur, facilitent la circulation de l'eau et sont observables sur toutes les agro-ressources dans les figures (d, g).				
Vaisseaux :	Cellules plus larges et plus courtes que les trachéides, présentent des extrémités dépourvues de parois, formant ainsi une série continue de tubes qui favorise l'écoulement de l'eau. La figure 1 (g) illustre la présence de vaisseaux dans la paille de colza.				

Tableau 1 : Description de la microstructure des agro-ressources (chênevotte, anas de lin, paille de colza)

L'analyse microstructurale effectuée à l'aide d'un microscope électronique sur la chènevotte et l'anas de lin révèle que la chènevotte présente une structure mousse caractérisée par des cellules fermées de manière continue, appelées trachéides (voir figure 2c) (Jiang et al. 2019), similaire à ce qui a été observé pour l'anas de lin dans le travail de (Viel et al. 2018) portant sur les agro-ressources. La structure de l'anas de lin (voir figure 2d) est relativement simple en comparaison avec celle de la chènevotte. La majeure partie de l'anas de lin est composée de trachéides longues et minces, avec un diamètre situé dans la plage de 20 à 80 µm (Jiang et al. 2019). En ce qui concerne la porosité des fibres de l'anas de lin, celles-ci présentent une porosité plus fine et plus homogène par rapport à la chènevotte. Le tableau suivant résume le diamètre des pores intra-particulaires à l'échelle microstructurale des granulats végétaux (chènevotte, anas de lin, paille de colza, miscanthus).

Granulats	Diamètre des pores (µm)	Références
Chênevotte	10 à 40	(Rahim et al. 2016)
	70	(Glé et al. 2011)
Anas de lin	15	(Rahim et al. 2015)
Paille de colza	10 à 30	(Rahim et al. 2016)
Miscanthus	30 à 50	(Chen et al. 2017)

Tableau 2 : Diamètre des pores intra-particulaires des granulats végétaux

L'anas de lin présente des pores de diamètre plus petit que les autres granulats, tandis que le miscanthus possède des pores de diamètre moyen, mais demeure plus petit que celui de la chènevotte (70 μm).

La microstructure des agrégats influe sur les isothermes d'adsorption. Il est noté que la teneur en humidité du béton de colza augmente plus rapidement et est plus élevée que celle du béton de chanvre. À une humidité relative de 95 %, la teneur en humidité du béton de colza est de 160 kg/m^3 , comparativement à environ 95 kg/m^3 pour le béton de chanvre. Cette disparité a été associée à la microstructure des agrégats (chènevotte, paille de colza), qui a été vérifiée par microscopie électronique à balayage (MEB) et a montré que la paille de colza présente une porosité plus fine et plus homogène (voir figure 2b) que la chènevotte (voir figure 2a) (voir tableau 2). Une structure similaire avec des dimensions de pores de chènevotte (de 5 à 40 μm) et des parois cellulaires régulières d'une épaisseur moyenne de 4 μm a été constatée dans une autre étude (Laborel-Préneron et al. 2018).

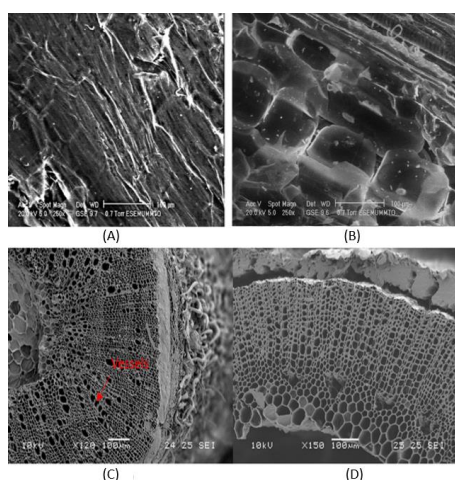


Figure 2 : Images de microscopie électronique à balayage de (a) chènevotte, (b) paille de colza, (c) chènevotte, (d) anas de lin (Rahim et al. 2016)

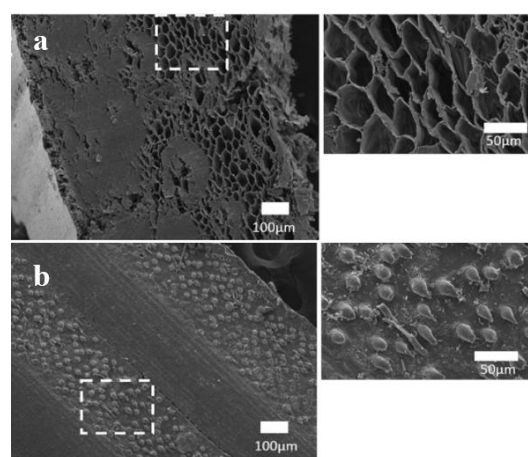


Figure 3 : Images MEB du miscanthus : (a) section transversale, (b) surface (Chen et al. 2017)

Le miscanthus, tout comme les autres granulats, présente une structure extrêmement poreuse, comme observé à l'aide du microscope électronique à balayage (MEB) (Chen et al. 2017). Les images de la section transversale du granulat de miscanthus révèlent un grand nombre de pores à l'intérieur de la tige, tandis que la partie extérieure de la tige présente une structure plus dense. Cette observation suggère que les fibres deviennent plus poreuses de l'extérieur vers l'intérieur, ce qui est bénéfique pour leur utilisation en tant qu'agrégats légers (figure 3). De plus, cette étude a permis de constater que la surface de la tige présente deux structures linéaires parallèles : l'une relativement lisse, tandis que l'autre comporte des nœuds réguliers.

2.3. PROPRIÉTÉS PHYSIQUES

Dans la littérature scientifique, plusieurs types de granulats végétaux ont fait l'objet d'études approfondies. Dans le cadre de cette revue, notre attention se porte principalement sur la chènevotte, l'anas de lin, la paille de colza et le miscanthus. Les chercheurs ont employé diverses méthodes de caractérisation des propriétés physiques de ces matériaux. Parmi celles-ci, les recommandations du Comité technique 236 de la RILEM ont été largement utilisées, fournissant des protocoles détaillés pour

la détermination de la masse volumique des granulats en vrac. Les propriétés physiques, telles que les masses volumiques et la porosité totale, des granulats végétaux sont résumées dans le tableau 2 (Annexe).

D'après les données du tableau 02 (Annexe), tous les granulats se caractérisent par une porosité élevée et une faible masse volumique. En particulier, la paille de colza présente une masse volumique apparente à l'état sec très basse (64,9 kg/m³), nettement inférieure à celle des autres granulats. Cette valeur est 136 % plus faible que la masse volumique apparente de la chènevotte (153 kg/m³) (Laborel-Préneron et al. 2018). Les résultats des propriétés physiques obtenus dans différentes études présentent une cohérence remarquable. Par exemple, la masse volumique apparente du miscanthus relevé dans les études (Dias et Waldmann 2020) et (Chen et al. 2017) est quasiment similaire.

Les valeurs de masse volumique du squelette de miscanthus (Chen et al. 2017), et de chènevotte, de paille de colza et d'anas de lin (Viel et al. 2018) sont proches, avec des valeurs respectives de 1400, 1401, 1430 et 1367 kg/m³. En outre, pour la chènevotte, la masse volumique du squelette rapportée dans l'étude (Viel et al. 2018) est supérieure de 11 % et 22 % aux valeurs données par (Rahim et al. 2016) et (Philippe Glé et al. 2021) respectivement, et s'écarte davantage de la valeur trouvée par (Chabriac et al. 2016) de 37 %. De manière similaire, pour la paille de colza, les valeurs rapportées par (Viel et al. 2018) sont supérieures de 23 % et 24 % aux valeurs données par (Rahim et al. 2016) et (Chabriac et al. 2016), respectivement. De même, pour l'anas de lin, les résultats de (Viel et al. 2018) sont supérieurs de 8 % et 22 % aux valeurs trouvées par (Rahim et al. 2016) et (Chabriac et al. 2016). Il est à noter que les valeurs de masse volumique du squelette données par (Viel et al. 2018) pour les trois granulats végétaux sont toutes supérieures aux valeurs rapportées dans la littérature. Cette observation pourrait être attribuée à la diversité des sources des granulats, lesquels proviennent de Vendée (CAVAC, France) selon (Viel et al. 2018) et d'entreprises autour d'Amiens, en France, selon (Rahim et al. 2016).

2.4. PROPRIÉTÉS THERMIQUES

Les granulats végétaux se distinguent par leurs performances en matière d'isolation thermique, grâce à leurs structures très poreuses qui explique leur capacité isolante. Cette caractéristique a été étudiée dans plusieurs recherches sur les granulats végétaux, mettant en évidence l'influence de la masse volumique apparente sur la conductivité thermique. Les résultats de ces études pour les quatre granulats chènevotte, paille de colza et anas de lin et miscanthus, sont résumés dans le graphe suivant.

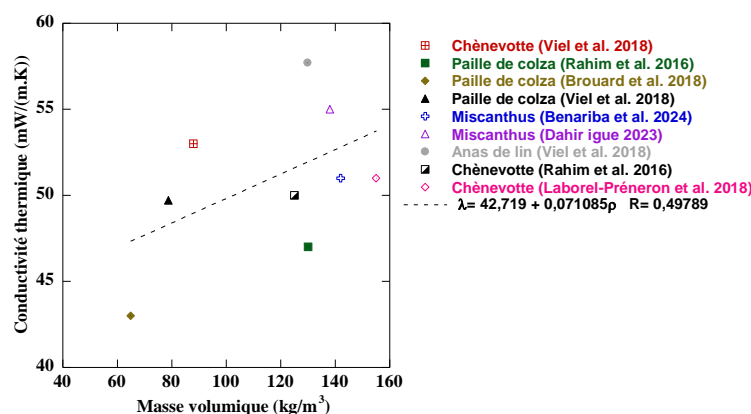


Figure 4 : Variation de la conductivité thermique en fonction de la masse volumique des granulats végétaux

Les résultats démontrent que la conductivité thermique et la masse volumique apparente, avec une variation de 43 à 57,7 mW/(m.K) pour des masses volumiques apparentes comprises entre 64,9 et 155 kg/m³.

À titre d'exemple, la paille de colza présente une faible conductivité thermique de 49,7 mW/(m.K), comparée à l'anas de lin (57,7 mW/(m.K)) et à la chènevotte (53,0 mW/(m.K)) (Viel et al. 2018), attribuable aux différences de masse volumique apparente (78,71 kg/m³ pour la paille de colza, 129,91 kg/m³ pour l'anas de lin, et 87,89 kg/m³ pour la chènevotte).

De plus, dans les travaux de (Brouard et al. 2018), la valeur de la conductivité thermique trouvée est très faible (43 mW/(m.K)), ce qui peut également être validé par les résultats des travaux de (Rahim et al. 2016), où les résultats trouvés de la conductivité thermique de la paille de colza sont de l'ordre de 47 mW/(m.K), en comparaison avec la chènevotte qui est de l'ordre de 50 mW/(m.K).

Il est important de noter que la masse volumique apparente est directement influencée par le pourcentage de porosité total, constatant ainsi que la paille de colza présente un pourcentage de porosité total plus élevé (94,32%) que les autres granulats (90,17% pour l'anas de lin et 93,72% pour la chènevotte), comme indiqué dans le tableau 2 (Annexe). Cette observation confirme que la porosité, englobant la porosité inter-particulaire et intra-particulaire (Delannoy et al. 2018), influe sur les propriétés macroscopiques, notamment les propriétés physiques et thermiques telles que la conductivité thermique.

Examinant la porosité inter-particulaire, les résultats des propriétés physiques suggèrent que les dimensions (longueur et largeur) des granulats jouent un rôle, la paille de colza présentant des dimensions plus grandes que l'anas de lin et la chènevotte (Viel et al. 2018). Cela implique une plus grande dimension et un pourcentage de porosité inter-particulaire, contribuant ainsi à accroître la porosité totale des granulats en vrac (Ratsimbazafy et al. 2021).

3. CONCLUSION

Dans le cadre de cette étude bibliographique, une analyse approfondie a été menée sur les granulats végétaux légers utilisés dans le secteur de la construction, avec une attention particulière portée sur quatre types de granulats spécifiques : la chènevotte, la paille de colza, les anas de lin et le miscanthus. Cette synthèse examine les caractéristiques chimiques, microstructurales, physiques et thermiques de ces granulats végétaux, en mettant en lumière les liens entre ces propriétés et les méthodes expérimentales employées dans les études pertinentes trouvées dans la littérature. Les conclusions de cette analyse sont présentées de manière succincte dans les points suivants :

- ❖ Plusieurs méthodes ont été mentionnées dans la littérature pour évaluer la teneur en composants chimiques des granulats végétaux, la méthode de Van Soest figure parmi celles les plus fréquemment utilisées ces dernières années dans de nombreux travaux. Le pourcentage massique des composants chimiques des granulats varie en fonction du type de granulats, de la région de culture et des conditions météorologiques. Toutefois, un pourcentage élevé de certains composants, tels que les solubles, peut avoir un impact négatif sur les performances du composite.
- ❖ La microstructure des granulats végétaux a été largement évaluée à l'aide de la microscopie électronique à balayage (MEB) et de la tomographie aux rayons X, cette dernière étant une

technique très utile en raison de ses avantages. Elle nous permet d'obtenir une compréhension détaillée de la morphologie interne du matériau ainsi que de la forme de la porosité. Les images obtenues par MEB ont montré que les agrégats végétaux présentent des structures extrêmement poreuses. Cependant, les échelles de pores (10 à 70 μm) ainsi que leurs formes (tubes, etc.) varient considérablement d'un type de granulats à un autre, ce qui peut influencer d'autres propriétés telles que les propriétés hydriques et thermiques.

- ❖ Diverses méthodes sont connues pour caractériser la masse volumique des granulats végétaux en vrac, en plus les recommandations de la RILEM. Les résultats obtenus indiquent que les granulats végétaux présentent une faible masse volumique en raison du pourcentage élevé de porosité. Par exemple, la paille de colza affiche une masse volumique plus faible par rapport aux autres granulats. Les quatre types de granulats végétaux étudiés présentent des masses volumiques de squelette très similaires.
- ❖ Les études ont démontré l'existence d'une corrélation entre la conductivité thermique et la masse volumique. Il convient également de noter que la masse volumique est directement influencée par le pourcentage de porosité.

Ce travail sera enrichi en examinant d'autres caractéristiques physiques et hydriques des granulats végétaux. Cela nous aidera à mieux évaluer leur potentiel pour la fabrication de matériaux de construction écologiques.

4. REMERCIEMENT

Cette étude a été réalisée dans le cadre du projet **ANR-21-CE22-0026** financé par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR) française. Les auteurs tiennent à les remercier.

5. BIBLIOGRAPHIE

- Brouard, Yoann, Naima Belayachi, Dashnor Hoxha, Narayanaswami Ranganathan, et Stéphane Méo. 2018. « Mechanical and Hygrothermal Behavior of Clay – Sunflower (*Helianthus Annuus*) and Rape Straw (*Brassica Napus*) Plaster Bio-Composites for Building Insulation ». *Construction and Building Materials* 161 (février): 196-207. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.140>.
- Chabriac, P.A., E. Gourdon, P. Gle, A. Fabbri, et H. Lenormand. 2016. « Agricultural By-Products for Building Insulation: Acoustical Characterization and Modeling to Predict Micro-Structural Parameters ». *Construction and Building Materials* 112 (juin): 158-67. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.162>.
- Chen, Y.X., F. Wu, Qingliang Yu, et H.J.H. Brouwers. 2020. « Bio-Based Ultra-Lightweight Concrete Applying Miscanthus Fibers: Acoustic Absorption and Thermal Insulation ». *Cement and Concrete Composites* 114 (novembre): 103829. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103829>.
- Chen, Yuxuan, Q.L. Yu, et H.J.H. Brouwers. 2017. « Acoustic Performance and Microstructural Analysis of Bio-Based Lightweight Concrete Containing Miscanthus ». *Construction and Building Materials* 157 (décembre): 839-51. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.161>.
- Colinart, T., T. Vincelas, H. Lenormand, A. Hellouin De Menibus, E. Hamard, et T. Lecompte. 2020. « Hygrothermal Properties of Light-Earth Building Materials ». *Journal of Building Engineering* 29 (mai): 101134. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2019.101134>.

- Dahir igue, Fathia. 2023. « Optimisation des performances hygrothermiques de parois en bétons biosourcés : Approche expérimentale et numérique ». Thèse de doctorat, Université de Picardie Jules Verne,.
- Delannoy, Guillaume, Sandrine Marceau, Philippe Glé, Etienne Gourlay, Marielle Guéguen-Minerbe, Dinarzed Diafi, Issam Nour, Sofiane Amziane, et Fabienne Farcas. 2018. « Aging of Hemp Shiv Used for Concrete ». *Materials & Design* 160 (décembre): 752-62. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.10.016>.
- Dias, Patrick Pereira, et Danièle Waldmann. 2020. « Optimisation of the Mechanical Properties of Miscanthus Lightweight Concrete ». *Construction and Building Materials* 258 (octobre): 119643. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119643>.
- Diquélou, Youen, Etienne Gourlay, Laurent Arnaud, et Bernard Kurek. 2015. « Impact of Hemp Shiv on Cement Setting and Hardening: Influence of the Extracted Components from the Aggregates and Study of the Interfaces with the Inorganic Matrix ». *Cement and Concrete Composites* 55 (janvier): 112-21. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.09.004>.
- El hage, Roland. 2010. « Prétraitement du Miscanthus x giganteus. Vers une valorisation optimale de la biomasse lignocellulosique ». Thèse de doctorat, Université de Nancy,.
- Glé, P., E. Gourdon, et L. Arnaud. 2011. « Acoustical Properties of Materials Made of Vegetable Particles with Several Scales of Porosity ». *Applied Acoustics* 72 (5): 249-59. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2010.11.003>.
- Glé, Philippe, Thibaut Lecompte, Arthur Hellouin De Ménibus, Hélène Lenormand, Santiago Arufe, Camille Chateau, Vanessa Fierro, et Alain Celzard. 2021. « Densities of Hemp Shiv for Building: From Multiscale Characterisation to Application ». *Industrial Crops and Products* 164 (juin): 113390. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.113390>.
- Greenhalf, C.E., D.J. Nowakowski, A.V. Bridgwater, J. Titiloye, N. Yates, A. Riche, et I. Shield. 2012. « Thermochemical Characterisation of Straws and High Yielding Perennial Grasses ». *Industrial Crops and Products* 36 (1): 449-59. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2011.10.025>.
- Hajj Obeid, Maya, Omar Douzane, Lorena Freitas Dutra, Geoffrey Promis, Boubker Laidoudi, Florent Bordet, et Thierry Langlet. 2022. « Physical and Mechanical Properties of Rapeseed Straw Concrete ». *Materials* 15 (23): 8611. <https://doi.org/10.3390/ma15238611>.
- Hustache, Yves. 2008. « Synthèse des connaissances sur les bétons et mortiers de chanvre ».
- Jiang, Yunhong, Michael Lawrence, Atif Hussain, Martin Ansell, et Pete Walker. 2019. « Comparative Moisture and Heat Sorption Properties of Fibre and Shiv Derived from Hemp and Flax ». *Cellulose* 26 (2): 823-43. <https://doi.org/10.1007/s10570-018-2145-0>.
- Khazma, Mahmoud, Adeline Goullieux, Rose-Marie Dheilily, et Michèle Quéneudec. 2012. « Coating of a Lignocellulosic Aggregate with Pectin/Polyethylenimin Mixtures: Effects on Flax Shive and Cement-Shive Composite Properties ». *Cement and Concrete Composites* 34 (2): 223-30. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.07.008>.
- Kymäläinen, Hanna-Riitta, et Anna-Maija Sjöberg. 2008. « Flax and Hemp Fibres as Raw Materials for Thermal Insulations ». *Building and Environment* 43 (7): 1261-69. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2007.03.006>.
- Laborel-Préneron, Aurélie, Camille Magniont, et Jean-Emmanuel Aubert. 2018. « Characterization of Barley Straw, Hemp Shiv and Corn Cob as Resources for Bioaggregate Based Building Materials ». *Waste and Biomass Valorization* 9 (7): 1095-1112. <https://doi.org/10.1007/s12649-017-9895-z>.
- Ligero, P, A Vega, et M Bao. 2005. « Acetosolv Delignification of Miscanthus Sinensis bark Influence of Process Variables ». *Industrial Crops and Products* 21 (2): 235-40. [https://doi.org/10.1016/S0926-6690\(04\)00054-8](https://doi.org/10.1016/S0926-6690(04)00054-8).
- Ministère de la transition écologique et de la cohésion des territoires. 2022. « Construction et performances environnementale du bâtiment ». Consulté le 23 février 2024. <https://www.scribbr.fr/citation-des-sources/exemples-citations-chicago/>
- Plathner, Philipp, et Monika Woloszyn. 2002. « Interzonal Air and Moisture Transport in a Test House: Experiment and Modelling ». *Building and Environment* 37 (2): 189-99. [https://doi.org/10.1016/S0360-1323\(00\)00096-2](https://doi.org/10.1016/S0360-1323(00)00096-2).

- Rahim, M., O. Douzane, A.D. Tran Le, et T. Langlet. 2016. « Effect of Moisture and Temperature on Thermal Properties of Three Bio-Based Materials ». *Construction and Building Materials* 111 (mai): 119-27. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.061>.
- Rahim, M., O. Douzane, A.D. Tran Le, G. Promis, B. Laidoudi, A. Crigny, B. Dupre, et T. Langlet. 2015. « Characterization of Flax Lime and Hemp Lime Concretes: Hygric Properties and Moisture Buffer Capacity ». *Energy and Buildings* 88 (février): 91-99. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.11.043>.
- Rahim, M., O. Douzane, A.D. Tran Le, G. Promis, et T. Langlet. 2016. « Characterization and Comparison of Hygric Properties of Rape Straw Concrete and Hemp Concrete ». *Construction and Building Materials* 102 (janvier): 679-87. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.11.021>.
- Ratsimbazafy, Herinjaka Haga, Aurélie Laborel-Préneron, Camille Magniont, et Philippe Evon. 2021. « A Review of the Multi-Physical Characteristics of Plant Aggregates and Their Effects on the Properties of Plant-Based Concrete ». *Recent Progress in Materials* 03 (02): 1-1. <https://doi.org/10.21926/rpm.2102026>.
- Sain, Mohini, et David Fortier. 2002. « Flax Shives Refining, Chemical Modification and Hydrophobisation for Paper Production ». *Industrial Crops and Products* 15 (1): 1-13. [https://doi.org/10.1016/S0926-6690\(01\)00090-5](https://doi.org/10.1016/S0926-6690(01)00090-5).
- Sorensen, A, P Teller, T Hilstrom, et B Ahring. 2008. « Hydrolysis of Miscanthus for Bioethanol Production Using Dilute Acid Presoaking Combined with Wet Explosion Pre-Treatment and Enzymatic Treatment ». *Bioresource Technology* 99 (14): 6602-7. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.09.091>.
- Tran Le, Anh Dung, Jianshun S. Zhang, Zhenlei Liu, Driss Samri, et Thierry Langlet. 2021. « Modeling the Similarity and the Potential of Toluene and Moisture Buffering Capacities of Hemp Concrete on IAQ and Thermal Comfort ». *Building and Environment* 188 (janvier): 107455. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107455>.
- Viel, Marie, Florence Collet, et Christophe Lanos. 2018. « Chemical and Multi-Physical Characterization of Agro-Resources' by-Product as a Possible Raw Building Material ». *Industrial Crops and Products* 120 (septembre): 214-37. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.04.025>.
- Vignon, M R, C Garcia-Jaldon, et D Dupeyre. 1995. « Steam Explosion of Woody Hemp Ch Nevotte ».
- Viitanen, Hannu, Juha Vinha, Kati Salminen, Tuomo Ojanen, Ruut Peuhkuri, Leena Paajanen, et Kimmo Lähdesmäki. 2010. « Moisture and Bio-Deterioration Risk of Building Materials and Structures ». *Journal of Building Physics* 33 (3): 201-24. <https://doi.org/10.1177/1744259109343511>.
- Vrije, T de, G G de Haas, G B Tan, E R P Keijsers, et P A M Claassen. 2002. « Pretreatment of Miscanthus for Hydrogen Production by Thermotoga Elji ». *International Journal of Hydrogen Energy*.
- Woloszyn, Monika, Targo Kalamees, Marc Olivier Abadie, Marijke Steeman, et Angela Sasic Kalagasidis. 2009. « The Effect of Combining a Relative-Humidity-Sensitive Ventilation System with the Moisture-Buffering Capacity of Materials on Indoor Climate and Energy Efficiency of Buildings ». *Building and Environment* 44 (3): 515-24. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2008.04.017>.
- Williams, Joseph, Mike Lawrence, et Pete Walker. 2017. « The Influence of the Casting Process on the Internal Structure and Physical Properties of Hemp-Lime ». *Materials and Structures* 50 (2): 108. <https://doi.org/10.1617/s11527-016-0976-4>.

6. ANNEXE

Agro-ressources	Cellulose (%)	Hémicellulose (%)	Lignine (%)	Solubles (%)	Minéraux (%)	Année de récolte	Région de récolte	Références
Chènevottes	49,97 ± 0,81	21,42 ± 0,71	9,52 ± 0,11	17,75 ± 0,51	0,67 ± 0,02	2015	Vendée (CAVAC, France)	(Viel et al. 2018)
	48	12	28	10	2	-	-	(Hustache 2008)
	50,3	17,9	17,2	5,9	2,1	-	Cazères (France)	(Laborel-Préneron et al. 2018)
	59,9-62,5	13,8-20,7	13,9-16,2	5,5-9,7	-	-	Normandie (France)	(Colinart et al. 2020)
	53	12,1	15	19,9	-	-	-	(Delannoy et al. 2018)
	45,6-49,2	17,8-21	21,8-23,3	1,6-8,1	2,6-3,7	-	France Allemagne ;Angleterre	(Diquélou et al. 2015)
	34,0-44,0	31,0-37,0	22,0-30,0	-	-	-	-	(Jiang et al. 2019)
	44	18	28	8	2	-	Bar-sur-Aube (Chanvrière, France)	(Vignon et al. 1995)
Anas de lin	44,63 ± 0,64	24,41 ± 0,64	20,98 ± 0,21	7,56 ± 0,66	1,48 ± 0,16	2015	Vendée (CAVAC, France)	(Viel et al. 2018)
	53	13	24	1,5	> 2 %	-	-	(Sain et Fortier 2002)
	39,9-41,0	25,2-26,8	23,0-30,0	-	-	-	-	(Jiang et al. 2019)
Paille de colza	53,06 ± 0,57	53,06 ± 0,57	9,63 ± 0,32	17,68 ± 0,81	0,79 ± 0,07	2015	Vendée (CAVAC, France)	(Viel et al. 2018)
	37,55	31,37	21,3	3,76	6,02	2008	Rothamsted (Angleterre)	(Greenhalf et al. 2012)
	51,40-55,20	9,30-15,00	8,40-10,90	20,90-29,90	0,40-0,90	2015, 2016	Somme, Marne (France)	(Hajj Obeid et al. 2022)
Miscanthus	38,2	24,3	25	-	2,0	2000, 2001	Groningue (Pays-Bas)	(de Vrije et al. 2002)
	40	18	25	-	5,9	-	Skovlunde (Danemark)	(Sorensen et al. 2008)
	36	26	26	1,02	2,8	-	Metz (France)	(El hage 2010)
		65,4	23,5	-	0,4	-	Galice (Espagne)	(Ligero et al. 2005)

Tableau 1 : Teneur des composants chimiques des agro-ressources (chènevotte, anas de lin, paille de colza, miscanthus)

Granulats végétaux	ρ_{0app} (kg/m ³)	ρ_s (kg/m ³)	n_T (%)	Référence
Chènevotte	104,01	1401	92,58	(Viel et al. 2018)
	133	1020	87	(Chabriac et al. 2016)
	125	1259	90,01	(Rahim et al. 2016)
	108	1150	-	(Philippe Glé et al. 2021)
	-	-	77,93	(Jiang et al. 2019)
	153	-	-	(Laborel-Préneron et al. 2018)
	122	-	-	(Williams et al. 2017)
Anas de lin	111,28	1367	91,86	(Viel et al.2018)
	90	1270	92,9	(Rahim et al. 2016)
	115	1120	90,5	(Chabriac et al. 2016)
	-	-	75,81	(Jiang et al. 2019)
	126	-	-	(Khazma et al. 2012)
Paille de colza	88,06	1430	93,84	(Viel et al.2018)
	130	1162	88,8	(Rahim et al. 2016)
	115	1150	90	(Chabriac et al. 2016)
	64,9	-	-	(Brouard et al. 2018)
	69,29	-	-	(Hajj Obeid et al. 2022)
Miscanthus	120	-	-	(Dias et Waldmann 2020)
	119,4	1400	-	(Chen et al. 2017)
	-	-	90,5	(Y. X. Chen et al. 2020)

Tableau 2 : Masse volumique et porosité des granulats végétaux

La distribution de Weibull, un outil utile ou dépassé ? Application au confort au vent

Mateusz Bogdan¹, Edouard Walther^{2,3,*}, Antoine Hubert¹

¹AREP L'hypercube, 16 avenue d'Ivry, Paris, France

²INSA Strasbourg, Département Génie Thermique Énergétique et Environnement
24 Boulevard de la Victoire - 67000 Strasbourg

³Université de Strasbourg, INSA Strasbourg, CNRS, ICube Laboratory UMR 7357, Strasbourg, France

*edouard.walther@insa-strasbourg.fr

RÉSUMÉ. Ce document présente une analyse critique de l'utilisation de la traditionnelle distribution de Weibull pour le calcul des probabilités de dépassement d'un seuil de vitesse de vent, en moyenne horaire. On présente deux densités de probabilités alternatives pour représenter les distributions de vitesses de vent, qui sont comparées à la distribution de Weibull sur des fichiers météorologiques réels. Ces distributions sont plus performantes que la loi de Weibull mais ne concordent pas pour autant avec les données réelles. En ouverture, l'utilisation des données réelles pour calculer un seuil de dépassement dans le cadre du calcul de confort au vent montre que la loi de Weibull donne des résultats qui sous-estiment largement l'inconfort.

MOTS-CLÉS. Weibull, distribution de fréquence, Confort au vent

ABSTRACT. The present work deals with the use of the Weibull distribution for the determination of the probability of exceeding of a given wind speed threshold. Two alternative probability distribution function are studied and compared with historical wind weather data. Those distributions perform better than Weibull's, however they do not represent conform with the actual wind distributions. The application to pedestrian wind comfort of the explicit determination of the probability of exceeding the wind annoyance threshold shows that Weibull's distribution exhibits large under-estimation of wind discomfort.

KEYWORDS. Weibull, frequency distribution, pedestrian wind comfort

1. CONFORT AU VENT

La quantification du confort au vent est fondée sur les vitesses de vents locales en présence d'un environnement bâti. Cette caractérisation se déroule en trois grandes étapes :

1. L'analyse des données météorologiques d'un site, avec l'estimation d'une densité de probabilité représentative des vents réelles, par direction de vent incident dans le but de pouvoir prédire la probabilité d'un dépassement. *Lorsque le vent souffle du Nord, il y a 12% de chances que ce dernier soit supérieur à 4 m/s.*
2. Un jeu de simulation CFD (*Computational Fluid Dynamics*), qui permet d'obtenir pour chaque incidence de vent la répartition des vitesses d'air locales dans la zone d'intérêt. *Lorsque le vent souffle du Nord à 4m/s, en ce point la vitesse d'air atteint 2,1 m/s.*
3. Enfin, de façon probabiliste, on reconstruit un indicateur annuel qui donne en tout point d'une zone d'intérêt la probabilité de dépasser un seuil de gêne fixé. *À cet endroit précis, il y a une probabilité annuelle de 14% que le vent dépasse 4 m/s.*

De nombreux points de la méthodologie d'étude du confort au vent ont déjà été étudiés : le choix de indicateurs (Delpech et al., 2005) et seuils de gênes associés (Janssen et al., 2013),

l'intégration des vents rafales explicites (Vita et al., 2020), le types de simulations CFD (Jacob and Sagaut, 2018), qualité et précision des simulations CFD (Tominaga et al., 2008), (Franke et al., 2007), nombre de directions de vents considérées (Hågbo and Giljarhus, 2024), etc., mais l'objet de cet article est de se concentrer sur la première étape de la méthodologie, fondement de la méthode : l'identification des paramètres climatiques liés au vent. Plus précisément la représentation statistique des occurrences de vents à l'aide d'une distribution probabiliste.

Ainsi, en utilisant la méthode la plus répandue en France, développée par le CSTB (présentée dans (Delpech et al., 2005)) on ne s'intéresse qu'à des données météorologiques en moyenne horaire, ce qui de fait exclut les vents dits de *rafale*. À date, ces derniers ne sont considérés que de façon indirecte par une modification des seuils de vitesses liée à l'intensité de la turbulence.

$$P_D(v > v^*) = \sum_{\theta} f_{\theta} P_{D,\theta}(v > v^*) \quad (1)$$

On s'intéresse ensuite à cartographier la probabilité de dépasser un seuil de gêne, fixé dans la méthode à 3 m/s. Pour obtenir cette cartographie sur une année, on réalise un ensemble de simulations CFD (*Computational Fluid Dynamics*), pour des directions de vents équiréparties, desquelles on tire des cartographies de facteur d'amplification $\Psi = v_{\text{local}}/v_{\text{meteo}}$. L'indicateur de confort au vent est finalement reconstruit en pondérant ces cartographies par les fréquences d'occurrences directionnelles des vents, puis localement en regardant la probabilité de dépasser une vitesse seuil : $v_{\text{local}} < \text{ou} > v_{\text{seuil}}/\Psi$, à l'aide de l'Équation (1). Le dépassement de ce seuil est ensuite analysé au regard de l'occupation de l'espace urbain.

1.1. PRINCIPE DU CALCUL

Le confort au vent se définit comme la probabilité de dépassement d'un seuil de gêne sur une période de l'ordre d'un an. On l'estime à l'aide de l'Équation (1), qui somme de façon pondérée la contribution de chaque direction de vent au dépassement d'un seuil de gêne v^* .

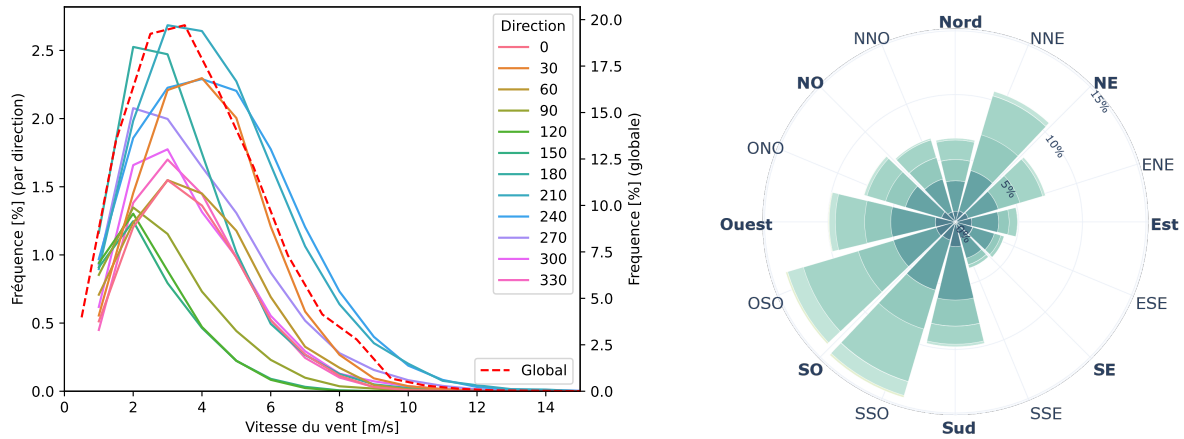
Pour une direction de vent incidente donnée, θ , f_{θ} représente sa fréquence d'occurrence et $P_{D,\theta}$ la fonction qui définit la probabilité de dépassement pour une vitesse v^* .

Traditionnellement, la fonction de distribution utilisée pour décrire façon continue l'occurrence des vitesses de vents est une fonction de Weibull. Cette distribution a été choisie pour deux raisons : d'une part sa capacité à décrire de nombreuses « formes » de distributions à l'aide de deux paramètres (k et λ dans l'Eq. 2) et d'autre part la forme analytique que prend sa fonction de distribution cumulée P_c (Eq. 3) ainsi que la « facilité » d'accès à la probabilité de dépassement d'une vitesse v^* nommée P_d (Eq. 4).

$$f(v, k, \lambda) = \frac{k}{\lambda} \left(\frac{v}{\lambda}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v}{\lambda}\right)^k} \quad (2)$$

$$P_c(v^*) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{v^*}{\lambda} \right)^k \right] \quad (3)$$

$$P_d(v > v^*) = 1 - P_c(v^*) = \exp \left[- \left(\frac{v^*}{\lambda} \right)^k \right] \quad (4)$$



(a) Distribution des fréquences d'occurrences des vitesses de vent

(b) Rose des vents

Figure 1 : Paris Orly, discrétisation des vents en 12 directions équiréparties - données Météo-France horaires - 2000 à 2020

Les paramètres k et λ peuvent être identifiés sur les données météorologiques sans distinction d'angle d'incidence des vents (utilisé dans l'estimation du potentiel éolien (Wais, 2017), ou dans le cas du confort au vent « par direction » de vent (indice θ dans l'Eq. 1).

1.2. MOTIVATION

Certaines distributions réelles de vitesses de vent par classe se prêtent mal à une identification par un modèle de Weibull, notamment pour des valeurs qui, ramenées à hauteur d'occupation, peuvent être pénalisantes pour le calcul du confort (vitesses élevées), ou pour des valeurs faibles avec une mauvaise estimation des périodes calmes. Ces éléments sont longuement discutés dans (Wais, 2017), notamment les méthodes d'identification, cependant on se focalise plutôt ici sur des méthodes standard d'identification, accessibles en ingénierie avec des outils de traitement de données simples, en allant chercher d'autres distributions probabilistes, ou en testant directement ce qu'on appelle un calcul « explicite » de fréquence, rendu accessible par la disponibilité des données. En effet, les outils et méthodes disponibles aujourd'hui permettent aisément de traiter 20 ou 30 années de données horaires pour déterminer la probabilité de dépasser X m/s dans la direction de vent Y° .

On se propose donc d'étudier trois types de fonctions de distributions puis de les comparer des calculs « explicites » basés sur 20 années de données horaires MétéoFrance, en différents lieux : la distribution de Weibull détaillée en préambule, la distribution *log-normale tronquée mixte* et la distribution *sigmoïde*, décrites dans la section qui suit.

1.3. DENSITÉS DE PROBABILITÉS ALTERNATIVES

1.3.1. Fonction sigmoïde

Les auteurs (Reiminger et al., 2020) proposent une variante de sigmoïde originale qui permet de mieux représenter certaines distributions singulières, notamment utiles sur des données

historiques avec « peu » de classes de vitesses de vents. Sa densité de probabilité prend la forme de l'équation 5. Elle contient cinq paramètres positifs à identifier $\eta, \xi_1, \xi_2, \gamma_1, \gamma_2$:

$$f(v) = \eta \left(-1 + \frac{1}{1 + \xi_1 e^{-\gamma_1 v}} + \frac{1}{1 + \xi_2 e^{\gamma_2 v}} \right) \quad (5)$$

Sa distribution cumulée prend la forme de l'intégrale (6), dont le calcul analytique s'avère délicat, car on ne dispose pas d'une primitive réelle pour ses fractions. On la calculera numériquement par la suite.

$$p = \int_0^{v^*} \eta \left(-1 + \frac{1}{1 + \xi_1 e^{-\gamma_1 v}} + \frac{1}{1 + \xi_2 e^{\gamma_2 v}} \right) \cdot dv \quad (6)$$

1.3.2. Fonction log-normale tronquée mixte

L'identification de lois log-normales permettrait de s'épargner une intégration numérique, du fait de leur formulation normée et analytique, ainsi que présenté dans (Carta and Ramirez, 2007). Les travaux de (Carta et al., 2009) montrent que ces fonctions auraient, au global, les meilleurs résultats d'identifications parmi une vingtaines de variantes, et sont les seules à adaptées à des distributions de vent multi-modales. On étudie ici la fonction suivante, paramétrée en $\alpha_1, \beta_1, \alpha_2, \beta_2, \omega$:

$$f(v, \alpha_1, \beta_1, \alpha_2, \beta_2, \omega) = \omega \frac{\alpha_1}{\beta_1 (v/\beta_1)^{\alpha_1-1}} \exp \left[\left(\frac{-v}{\beta_1} \right)^{\alpha_1} \right] + (1 - \omega) \frac{1}{I_0(\alpha_2, \beta_2) \sqrt{2\pi}} \exp \left[\left(\frac{-(v - \alpha_2)^2}{2\beta_2^2} \right) \right] \quad (7)$$

$$I_0(\alpha, \beta) = \frac{1}{\beta \sqrt{2\pi}} \int_0^{+\infty} \exp \left[\left(\frac{-(v - \alpha)^2}{2\beta^2} \right) \right] dv \quad (8)$$

2. COMPARAISON DES APPROCHES

Dans cette section, on présente une comparaison qualitative puis quantitative des écarts constatés entre modèles. À cette fin, quatre jeux de données météorologiques ont été utilisés : Dunkerque, Le Havre, Nice, Paris et Lyon, dont les caractéristiques principales sont présentées sur la Figure 2. Il s'agit de données MétéoFrance horaires, prises entre 2000 et 2020.

2.1. IDENTIFICATIONS DES LOIS DE PROBABILITÉS

Afin de comparer semi-qualitativement les fonctions utilisées dans l'estimation de la probabilité de dépassement, on présente Figure 3 un cas détaillé pour une localisation, Dunkerque.

- Sous forme de distribution, les allures des courbes sont les bonnes, mais seule la loi « log-normale mixte » tend à reproduire le second pic d'occurrence de vent, autour de 7 m/s. Ce site météorologique présente en effet une distribution bi-modale des vitesses de vent.
- Sur les trois identifications présentées, on constate en considérant les RMSE que le meilleur modèle semble être la loi sigmoïde, suivi de la loi log-normale tronquée, et enfin la distribution de Weibull.
- La loi de Weibull tend à sous-estimer systématiquement les vents forts, et seule la fonction sigmoïde semble les reproduire fidèlement.

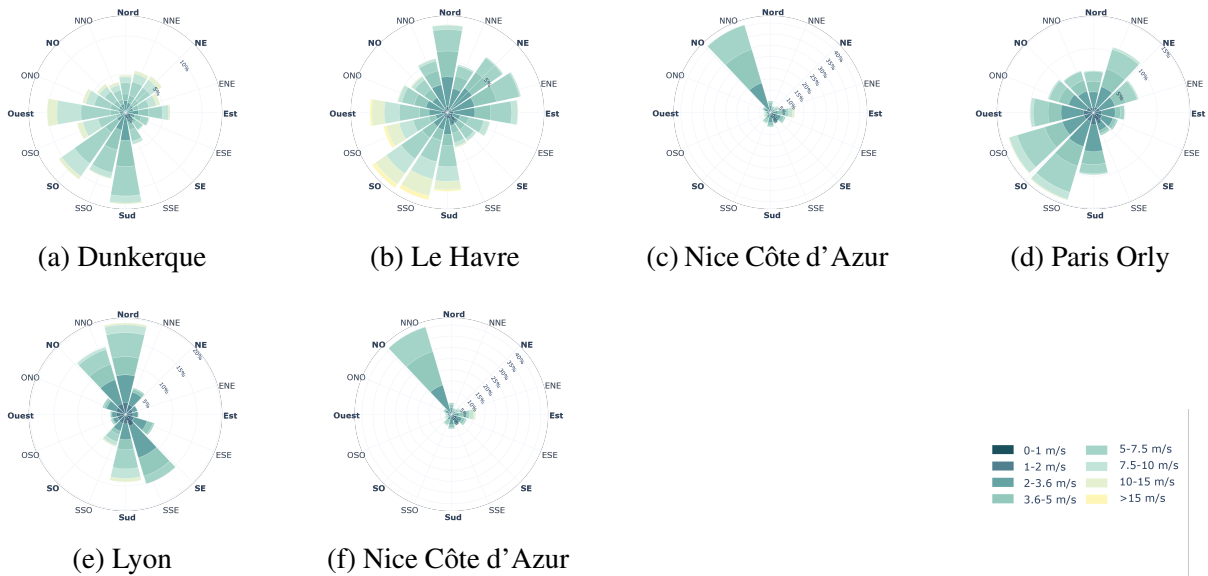


Figure 2 : Roses des vents - données MétéoFrance horaires - 2000 à 2020

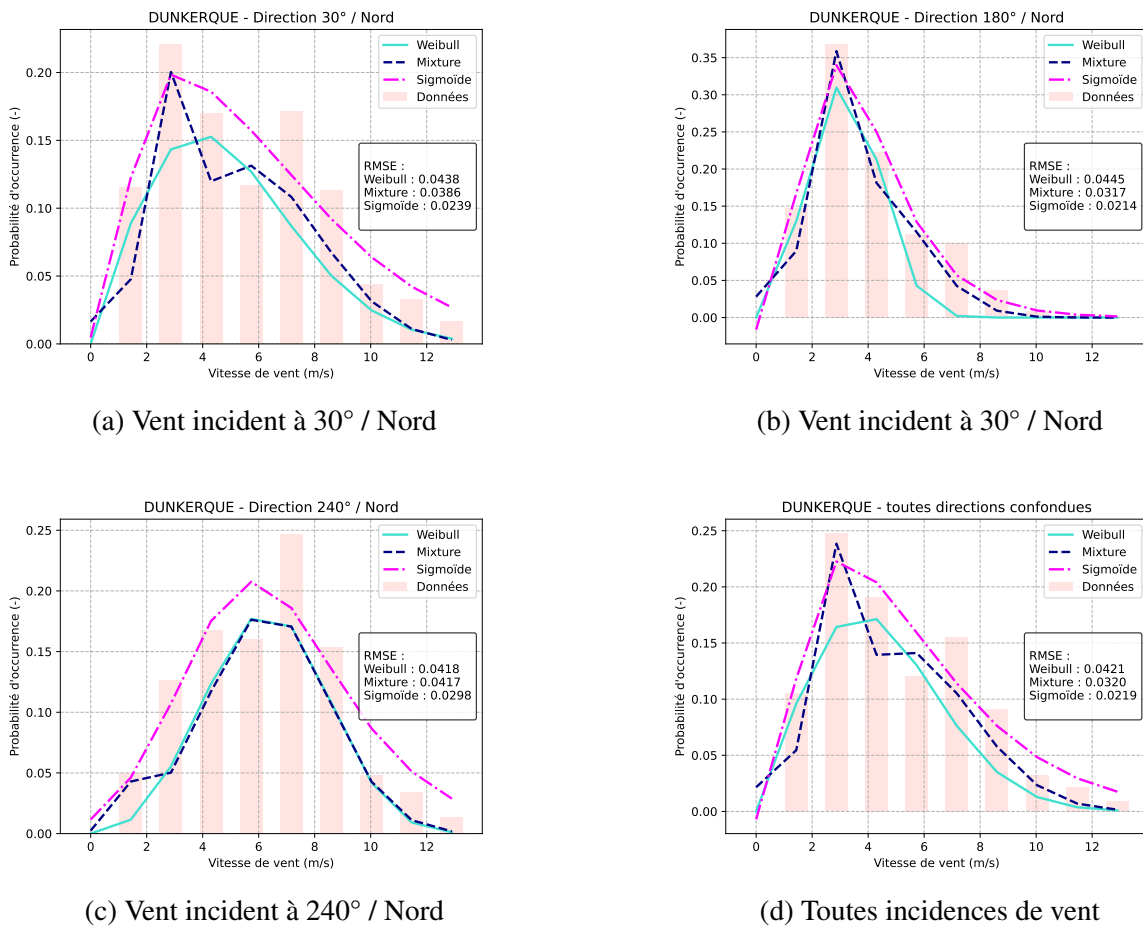


Figure 3 : Dunkerque : Distribution des fréquences d'occurrence de vent par classe de vitesses pour quelques directions de vent, et au global, avec comparaison aux différents modèles.

Villes	Fonctions	RMSE moyenne (12 directions)	RMSE Globale
Dunkerque	mixture	0.0029	0.0320
	weibull	0.0038	0.0421
	sigmoïde	0.0022	0.0219
Le Havre	mixture	0.0020	0.0437
	weibull	0.0055	0.0496
	sigmoïde	0.0014	0.0247
Nice	mixture	0.0015	0.0162
	weibull	0.0037	0.0401
	sigmoïde	0.0043	0.0353
Paris-Orly	mixture	0.0010	0.0123
	weibull	0.0011	0.0049
	sigmoïde	0.0005	0.0057
Lyon	mixture	0.0017	0.0071
	weibull	0.0025	0.0155
	sigmoïde	0.0013	0.0124

Tableau 1 : Erreurs d'identification (RMSE) moyennes sur les 12 directions de vents considérées, et globale (toutes incidences confondues)

On présente ensuite l'ensemble des résultats d'identification dans le Tableau 1, où l'erreur est calculée par rapport aux données réelles. On constate que pour un site donné, la RMSE moyenne de l'ensemble des directions est du même ordre de grandeur que la RMSE ($= \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (v_i - f_i)^2}$) obtenue sur l'ensemble des incidences de vents confondues (somme des fréquences de vent pour toutes les directions). La fonction sigmoïde semble se détacher comme la meilleure candidate à la représentation des vitesses réelles, suivie de la fonction log normale tronquée mixte.

2.2. DÉPASSEMENT DE DIFFÉRENTS SEUILS DE VITESSE

Dans le cas des études de confort au vent, les seuils de vitesses utilisés sont relativement faibles. Traditionnellement, en France, avec la méthode CSTB, on prend un seuil à 3 m/s, alors que d'autres critères européens ou américain (*Lawson, Davenport, NEN 8100*) utilisent plutôt 5 m/s. On se fixe comme référence le nombre d'heures de dépassement de plusieurs seuils de vitesses $v^* = [1..10]$ m/s sur les vingt dernières années des fichiers météorologiques, calculé comme suit :

$$P_{D_{\text{explicite}}}(v > v^*) = \frac{\sum_{i=1}^{\text{nb de données}} 1 \text{ si } v_i > v^*}{\text{nb de données}} \quad (9)$$

La comparaison se fait en reconstruisant la probabilité à partir des lois de distributions (Equation (1)), et en calculant l'erreur commise par rapport à l'Equation (9) pour les seuils de 3 et 5 m/s. Les résultats sont présentés dans le Tableau 2. On constate que les meilleures estimations sont données en majorité par les fonctions log-normale tronquée mixtes ou sigmoïde. Cependant aucune fonction analytique ne présente de concordance nette avec le pourcentage réel du temps de dépassement calculé à partir des données météorologiques, avec des erreurs de l'ordre de la dizaine de pourcents au minimum.

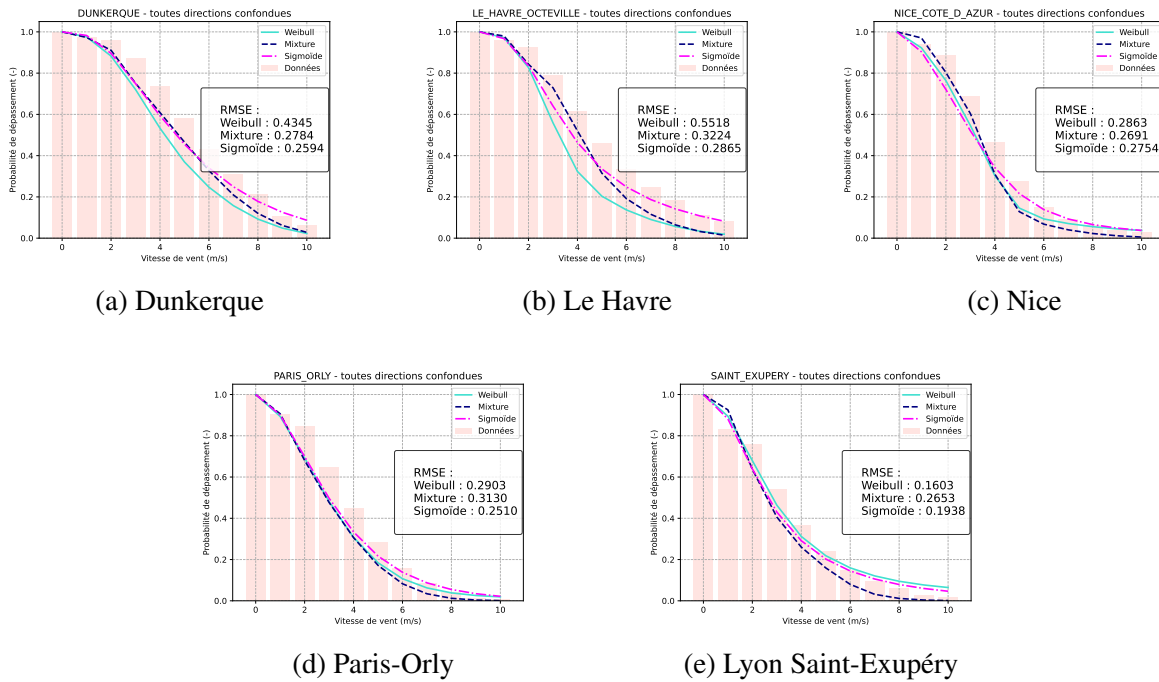


Figure 4 : Probabilités de dépassements de différentes vitesses seuils avec RMSE associées.

Villes	Fonctions	3 m/s	5m/s
Dunkerque	mixture	0.1367	0.1300
	weibull	0.1714	0.2406
	sigmoïde	0.1382	0.1420
Le Havre	mixture	0.0762	0.1843
	weibull	0.2912	0.3254
	sigmoïde	0.1883	0.1581
Nice	mixture	0.1228	0.2107
	weibull	0.2069	0.1854
	sigmoïde	0.2444	0.0834
Paris	mixture	0.2653	0.1697
	weibull	0.2583	0.1505
	sigmoïde	0.2338	0.1006
Lyon	mixture	0.2485	0.1455
	weibull	0.1418	0.3626
	sigmoïde	0.2037	0.0662

Tableau 2 : Erreurs sur les probabilités de dépassements de deux seuils de vitesse communs : 3 m/s et 5 m/s (toutes incidences confondues)

3. COMPARAISON DES MÉTHODES – APPLICATION AU CONFORT AU VENT

On propose ici de se passer des distribution de probabilité analytiques en calculant explicitement un seuil de dépassement sur N années de fichiers météorologiques, aujourd’hui largement disponibles en open-data. À partir des simulations par direction de vent incident réalisées en CFD, il est aisé de reconstruire les champ de confort au vent résultants, en analysant successivement toutes les heures d’un fichiers météo, et en sommant point par point les occurrences ou $v_{\text{local}} > v_{\text{seuil}}$. Ceci a été réalisé sur un projet en région parisienne, avec les données météorologiques de Paris-Orly. La Figure 5 présente les résultats obtenus avec la méthode explicite (à gauche), à savoir le pourcentage du temps où l’on dépasse un seuil de 3 m/s. On constate que les valeurs obtenues par la méthode de Weibull présentent jusqu’à 11% d’écart (Figure 5 droite). Ainsi l’utilisation de la loi de Weibull conduit à sous-estimer largement l’inconfort, avec des maxima autour de 5-6%, tandis que la méthode « explicite » atteint localement 16% d’inconfort sur une année type. Les seuils cibles de confort varient entre 2% pour une occupation immobile prolongée, 5% pour une situation immobile de courte durée et 10% pour une situation de promenade, ainsi la prédiction est entachée d’une erreur significative.

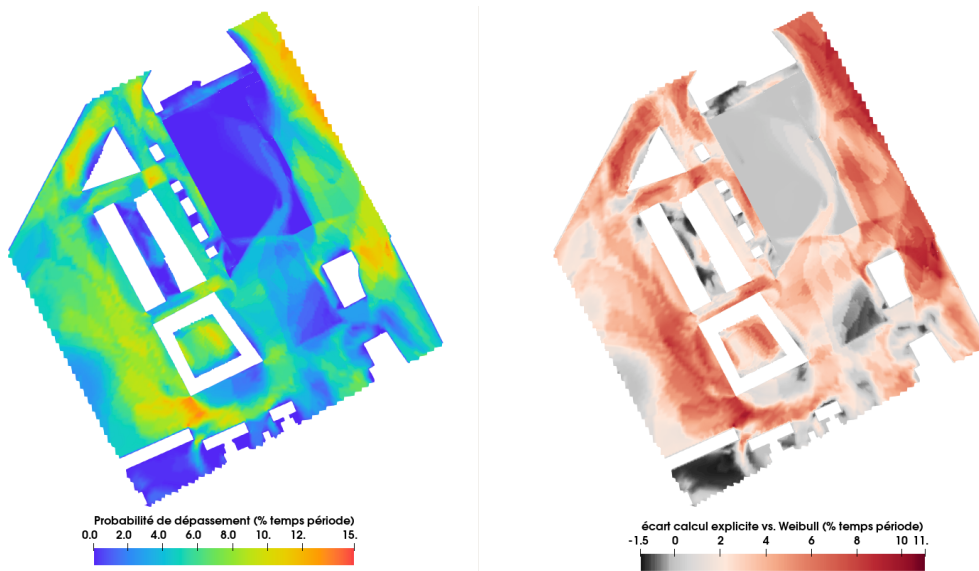


Figure 5 : Exemple de cartographie de confort au vent « explicite » (gauche), et carte des écarts par rapport à celle obtenue avec la « méthode de Weibull » (droite)

Note : Pour 10 ans de données, soit 87.600 données météorologiques horaires (direction et vitesse de vent), avec un une coupe à hauteur d’occupation d’environ 70.000 cellules, le temps de calcul explicite semble dérisoire par rapport aux temps d’étude en ingénierie, avec seulement 13 secondes de post-traitement (hors calcul CFD).

4. CONCLUSION

Dans ce travail, la loi de Weibull et deux autres distributions statistiques ont été étudiée sous l’angle de leur capacité à reproduire les mesures de vitesse de vent. L’étude a montré que les erreurs d’identification par direction de vent sont faibles pour chaque fonction considérée (de l’ordre de quelques pourcents), avec cependant de meilleures performances pour les lois log-normale mixte tronquée et sigmoïde par rapport à la loi de Weibull. Cependant, dans le cas du calcul de la probabilité cumulée, afin de déterminer un pourcentage de dépassement d’un

seuil de vitesse de vent, l'erreur commise par rapport aux données météorologiques réelles est considérable, de l'ordre de ~ 10 à 20% en fonction des stations météorologiques. Une application sur un cas de confort au vent montre qu'il n'est pas judicieux d'utiliser la loi de Weibull pour le calcul du seuil de dépassement d'une vitesse limite.

La conséquence pratique de cette étude est la suivante : eu égard à la disponibilité croissante de la donnée météorologique et à la rapidité de calcul du seuil explicite de dépassement, y compris sur de grands modèles géométriques, il est préférable de délaissier l'approche de Weibull (et plus généralement les approches d'identifications statistiques) pour le confort au vent. Des études complémentaires pourraient servir à déterminer les profondeurs historiques minimales nécessaires. Il en résulte également que pour une estimation du potentiel éolien d'un site, l'utilisation des probabilités analytiques de distribution de vent relève de l'application pédagogique plus que du calcul du productible.

BIBLIOGRAPHIE

- Carta, J. A. and Ramírez, P. (2007). Use of finite mixture distribution models in the analysis of wind energy in the canarian archipelago. *Energy Conversion and Management*, 48(1) :281–291.
- Carta, J. A., Ramirez, P., and Velazquez, S. (2009). A review of wind speed probability distributions used in wind energy analysis : Case studies in the canary islands. *Renewable and sustainable energy reviews*, 13(5) :933–955.
- Delpech, P., Baker, C., Blackmore, P., Koss, H., Sanz-Andres, A., Stathopoulos, T., and Willemsen, E. (2005). Pedestrian wind comfort assessment criteria : A comparative case study. *Proceedings of 4EACWE, Prague*, pages 82–83.
- Franke, J., Hellsten, A., Schlünzen, H., and Carissimo, B. (2007). Best practice guideline for the cfd simulation of flows in the urban environment.
- Hågbo, T.-O. and Giljarhus, K. E. T. (2024). Sensitivity of urban morphology and the number of cfd simulated wind directions on pedestrian wind comfort and safety assessments. *Building and Environment*, 253 :111310.
- Jacob, J. and Sagaut, P. (2018). Wind comfort assessment by means of large eddy simulation with lattice boltzmann method in full scale city area. *Building and Environment*, 139 :110–124.
- Janssen, W., Blocken, B., and van Hooff, T. (2013). Pedestrian wind comfort around buildings : Comparison of wind comfort criteria based on whole-flow field data for a complex case study. *Building and Environment*, 59 :547–562.
- Reiminger, N., Jurado, X., Vazquez, J., Wemmert, C., Blond, N., Wertel, J., and Dufresne, M. (2020). Methodologies to assess mean annual air pollution concentration combining numerical results and wind roses. *Sustainable Cities and Society*, 59 :102221.
- Tominaga, Y., Mochida, A., Yoshie, R., Kataoka, H., Nozu, T., Yoshikawa, M., and Shirasawa, T. (2008). AIJ guidelines for practical applications of CFD to pedestrian wind environment around buildings. *Journal of wind engineering and industrial aerodynamics*, 96(10-11) :1749–1761.
- Vita, G., Shu, Z., Jesson, M., Quinn, A., Hemida, H., Sterling, M., and Baker, C. (2020). On the assessment of pedestrian distress in urban winds. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 203 :104200.
- Wais, P. (2017). A review of weibull functions in wind sector. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 70 :1099–1107.

Parametric study regarding thermochemical heat storage for individual houses

Louison Boulrier*¹, Joël Wyttenbach¹,

¹ CEA-INES, LITEN, Laboratoire Energétique du Bâtiment,

Le Bourget Du Lac, France

*louison.boulrier@cea.fr

RESUME.

Dans un contexte de réchauffement climatique, les systèmes de stockage d'énergie semblent être un levier prometteur pour la flexibilisation de l'usage des énergies décarbonées. Le présent article étudie l'opportunité de l'usage d'un stockage thermochimique en couplage avec des installations solaires thermiques ou photovoltaïques, pour la fourniture de chauffage ou d'eau chaude sanitaire. Pour définir les meilleurs paramètres relatifs au stockage de chaleur et aux autres systèmes énergétiques du logement, une étude paramétrique est réalisée avec l'outil de simulation thermique TRNSys, et des indicateurs de performance sont calculés.

Suite à ces travaux, des choix techniques sont faits pour la conception du stockage de chaleur et pour les systèmes énergétiques employés dans différents bâtiments démonstrateurs habités en Europe. L'un des résultats majeurs de ce travail est la possibilité de limiter fortement la quantité de réactif utilisée tout en maintenant presque à l'identique les indicateurs de performance, permettant de réduire le prix et de limiter l'encombrement du système.

MOTS-CLÉS : Stockage thermochimique, Simulation thermique du bâtiment, Energie solaire

ABSTRACT.

In the context of climate change, energy storage systems appear to be a promising lever for increasing the flexibility of decarbonized energy systems. This article investigates the feasibility of employing thermochemical storage in conjunction with solar thermal or photovoltaic installations for providing heating or domestic hot water. To define optimal parameters related to heat storage and other energy systems within residential settings, a parametric study is conducted using the thermal simulation tool TRNSys, and performance indicators are computed.

Following this research, technical choices are made for heat storage design and for the energy systems employed in inhabited demonstration buildings across Europe. One of the major findings of this work is the possibility of significantly reducing the quantity of reactive material used while maintaining nearly identical performance indicators, thus reducing costs and minimizing system footprint.

KEYWORDS : Thermochemical heat storage, Building performance simulation, Solar energy

ABBREVIATIONS

DHW: Domestic Hot Water

HB: Heat Battery

KPI: Key Performance Indicator

PV: Photovoltaics

TCM: Thermochemical Material

GHG: Greenhouse Gas

HP: Heat Pump

PCM: Phase Change Material

SH: Space Heating

1. INTRODUCTION

In the context of climate change, energy storage systems appear to be a promising lever for the flexible utilization of decarbonized energy sources in buildings (Chen et al. 2022), while changing the energy role of buildings on the grid from consumers to “flexumers” (Cai et Gou 2024). Electrochemical batteries are already prevalent in the market but can only be used with electric production such as photovoltaics (Chreim, Esseghir, et Merghem-Boulahia 2024). Other solutions exist such as the use of the building thermal mass (Lind et al. 2023), water tanks as thermal energy storage (Xu et al. 2022) or phase change material (PCM) (Aziz et al. 2023). Thermochemical heat storage is also a relevant solution (Abdullah et al. 2024; Mazur et al. 2023), for instance when using local solar thermal energy for space heating and domestic hot water in individual houses (Teamah 2024). These thermal energy storage technologies may present a longer lifetime and a reduced capital cost compared to electrochemical batteries (Aziz et al. 2023).

The thermochemical storage concept considered in this study involves harvesting the exothermic nature of water chemisorption by solid potassium carbonate (K_2CO_3) to heat a fluid. The reciprocal dehydration reaction is endothermic and subsequently allows the reagent to be used for a new sequence of exothermic hydration. This K_2CO_3 material offers an attractive energy density (Sun et al. 2023), interesting temperature operating window, stability, and safety (Donkers et al. 2017) for a limited price and is already an industrial product used for example as an acidity regulator in the food industry.

Thermochemical heat storage technology is not widely deployed yet, and no legal standard is defined for its construction or installation. Evaluating the potential of this technology therefore requires defining and considering a precise embodiment of the technology: this work introduces an innovative concept of closed-loop heat battery and details its working principle. The associated energy systems also need to be thoroughly described. Indeed, the thermochemical reaction is highly dependent on the operating conditions, i.e. the temperature and humidity of air reacting with the thermochemical material. These conditions depend on the configuration of the installation, for instance, the type of renewable energy used: solar thermal panels or photovoltaics may provide heating of air at different temperature.

This article explores the opportunity of employing thermochemical storage in conjunction with thermal or photovoltaic solar panels for space heating and/or domestic hot water production. Selecting the right use-cases of this technology is essential to optimize its design (Wang et al. 2023; Wang 2022). To define the optimal parameters related to heat storage and other energy systems in housing, a parametric study is conducted using the thermal simulation tool TRNSys. Performance indicators are defined and calculated, such as the greenhouse gas (GHG) emissions reduction, grid electricity consumption, or the energy discharged from the heat battery to the building systems over a year.

Following these studies, technical choices are made for heat storage design and for the energy systems employed in three inhabited demonstration houses in Europe.

The outcome of this work are the system configurations and their respective performances. A major finding is the possibility to replace the external heat source and sink by relatively small water tanks heated by the solar energy and cooled by the domestic hot water pre-heating. Another major finding of this work is the possibility of significantly reducing the quantity of reagent used while maintaining nearly identical performance indicators, thereby reducing costs and limiting system footprint.

2. METHOD

The aim of this study is to select and optimize the different energy systems of an individual house in order to maximize the benefits of a thermochemical storage associated with renewable energy production means in terms of energy, economics and carbon footprint. The study's guidelines will enable the implementation of this storage in inhabited demonstrators.

To simulate the operation of the heat battery in the house, different model types were developed and associated into a single simulation environment.

- a classical dynamic thermal simulation for space heating and domestic hot water needs
- a model for the production of local solar energy, given the type of panels and the weather.
- a specific reaction model for K_2CO_3 adsorption or desorption which takes into account the humidity, temperature and pressure of the air reacting with the potassium carbonate. A metastable zone is considered, in which the reaction is considered too slow to be significant in our study.
- a detailed model for the innovative closed-loop itself, which principle is presented in Figure 3.

The joint simulation of these models is necessary as the thermochemical reaction is very sensitive to the operation conditions, which depend on the closed-loop management and hence to all energy systems associated to the heat battery, as well as the local power demand and solar production.

The diagram below provides an overview of the implemented method.

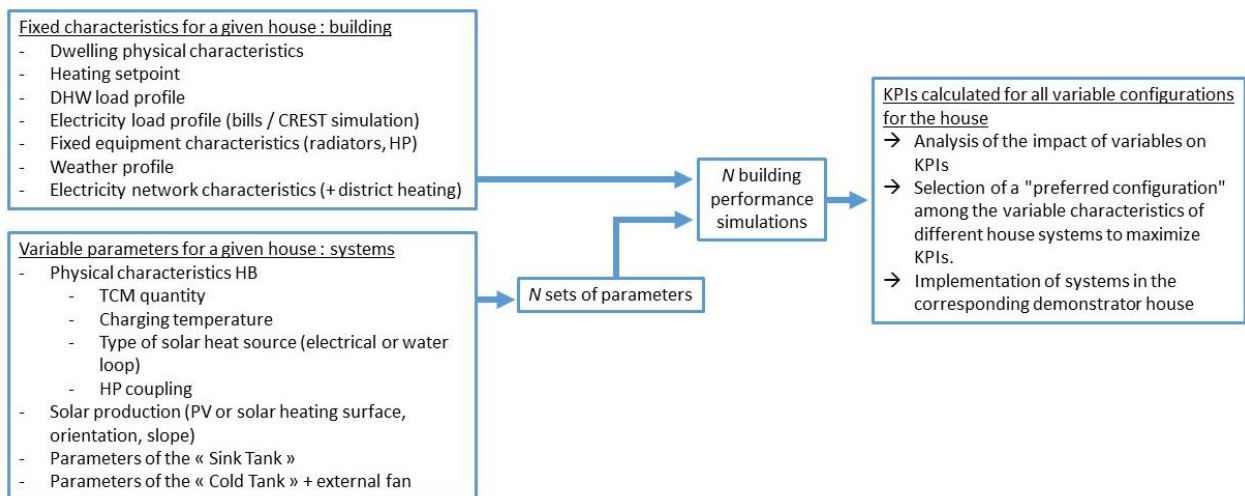


Figure 1 - Flowchart of the research method

The fixed input data for the model are the characteristics of the housing in which the storage is to be installed. The variable input parameters are technical choices to be made regarding energy production and emission systems and usage strategies of thermochemical storage. A parametric study is conducted on these input parameters, with KPIs as output. By examining all these KPIs and observing the influence of different parameters, a “preferred configuration” is established. It was decided not to aggregate all KPIs into a single “score” associated to a set of parameters, KPIs therefore remain multiple and potentially contradictory.

The application of this method for a specific heat battery embodiment installed in two houses under different climates is detailed in the following section. Following this study, the obtained results are translated into technical specifications, in order to develop the control strategy and the technical design of each demonstration site.

3. APPLICATION

3.1. CASE-STUDY HOUSES

The houses used as models in this study are located in Poland and France. A reason for the choice of these sites is the difference in heating needs and solar potential, as shown on the table below.

Site	Gdynia (PL)	Cadenet (FR)
Heating needs (Space heating)	9723 kWh	5863 kWh
Heating needs (Domestic Hot Water)	2192 kWh	2376 kWh
Heat Battery destination	SH and DHW	SH and DHW
Solar PV	167 kWh/m ² .y	299 kWh/m ² .y

Figure 2 - Houses characteristics

The Gdynia demonstration site is located in the north of Poland. This two-storey building includes two flats and was built in 1943 and renovated with a 14-cm insulation. The heated surface is 152 m². The Cadenet demonstration site is located in the south of France. It is a single-family single-storey house built in 1984, with a concrete structure and 10-cm insulation. The heated surface is 139 m².

3.2. PRINCIPLE OF CHARGING AND DISCHARGING A THERMOCHEMICAL BATTERY

The working principle of the heat battery in charging and discharging mode is presented in Figure 3. This innovative concept is based on a closed loop: the air is conditioned in a so-called “Component box” and then driven to the “Reactor” to react with potassium carbonate. The air is then transported back to the Component box for reconditioning and reused in a new reaction cycle.

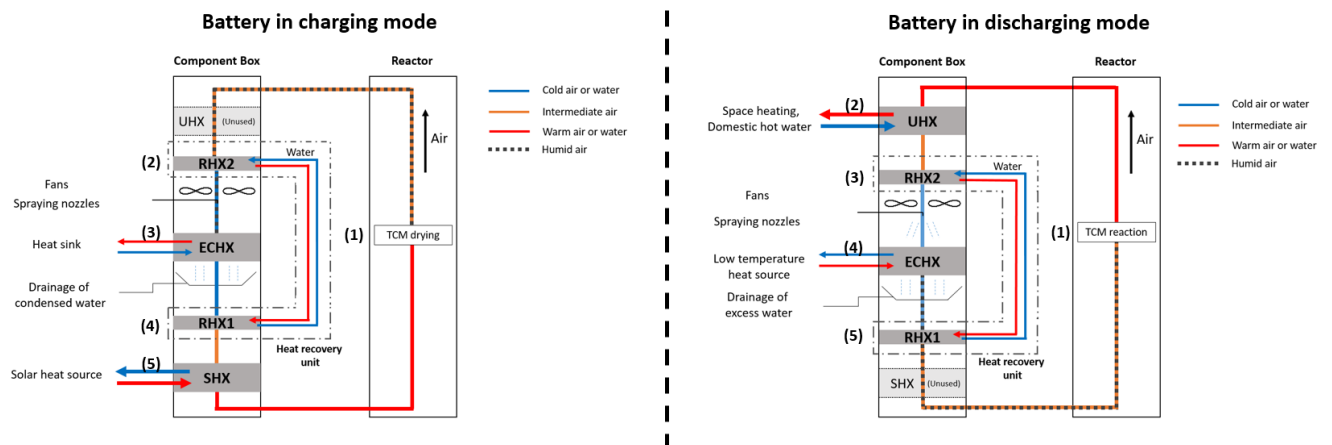


Figure 3 - Principle scheme of the heat battery in charging (left) and discharging mode (right)

Condensation mode (battery charging)	Evaporation phase (battery discharging)
<p>(1) Dry, warm air flows into the reactor cells and dries the thermochemical material, as shown on Figure 3. The air is therefore colder and more humid as it exits the reactor.</p> <p>(2) The air is cooled through the first unit of the recovery heat exchanger (RHX1).</p> <p>(3) The cooled air entering the condenser (ECHX) requires a limited heat dissipation to reach the dew point. Condensed water is drained.</p> <p>(4) The air flows through the second unit of the recovery heat exchanger (RHX2) and recovers an important part of the heat previously transmitted to the recovery water loop through the RHX1 unit.</p> <p>(5) This dry and preheated air flows through a heat exchanger heated by a solar source (SHX). The warm and dry air is then driven again through the reactor, and the cycle starts again.</p>	<p>(1) Cold, humid air flows into the reactor cells, as shown on Figure 3. The TCM adsorbs humidity and an exothermal reaction takes place. The air is therefore warmer and drier as it exits the reactor.</p> <p>(2) A “User heat exchanger” (UHX) transfers heat from the airflow to a water flow, to be used for space heating or domestic hot water.</p> <p>(3) The air is cooled through the first unit of the recovery heat exchanger (RHX1).</p> <p>(4) Nozzles spray a water mist in the airflow. The evaporator heat exchanger (ECHX) brings heat from the heat source to compensate the evaporation cooling effect and to maintain the air at a relatively constant temperature. This raises the dew point by allowing more evaporation. The excess of sprayed water is drained.</p> <p>(5) The air flows through the second unit of the recovery heat exchanger (RHX2). The air is therefore heated by the heat absorbed in (3), and the cycle starts again.</p>

The external elements interacting with the battery are described in 3.3, and the control algorithm follows a priority scheme described in 3.4.

3.3. EXTERNAL ELEMENTS INTERACTING WITH THE HEAT BATTERY

3.3.1. Solar heat source

The solar heat source can be either photovoltaic or solar thermal panels. If thermal solar panels are implemented, heat is transferred towards the heat battery through the Solar Heat Exchanger (SHX) as shown in Figure 3. In case of PV use, a Joule effect device is inserted in the air flow in place of the SHX.

3.3.2. Heat pump coupling

The heat pump is used as a backup to provide domestic hot water production and space heating. A « combination » mode is considered, where the heat battery uses the output of the heat pump as heat source, through ECHX.

3.3.3. Sink Tank

The sink tank is a water tank used to remove heat from the heat battery in charging mode (via the ECHX), allowing the condensation and evacuation of the water vapor extracted from the TCM. The heat hence stored is used as pre-heating for DHW.

3.3.4. Cold Tank

The cold tank is a water tank that provides heat at low temperature during the heat battery discharge. This heat compensates the temperature drop due to the evaporation of the sprayed water. This tank is also used to provide heat for space heating.

3.3.5. External Fan

The external fan represents an external heat source and/or sink transferring heat to or from the ambient air.

3.4. PRIORITY SCHEME FOR THE CONTROL ALGORITHM

The priority scheme given in Figure 4 is implemented in the simulation model, presented in 3.3.5.

Space heating comes from:	Domestic hot water heat comes from:	Solar energy goes to:	“Cold” Tank heat goes to:	Heat battery heat goes to:	Heat battery low temperature heat comes from:	Heat battery low temperature heat goes to:
<ol style="list-style-type: none"> 1. PV + heat pump or Solar thermal 2. “Cold” Tank 3. heat battery 4. Grid+heat pump 	<ol style="list-style-type: none"> 1. PV + heat pump or Solar thermal 2. “Sink” tank (if present) 3. heat battery 4. Grid+heat pump 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Space heating + domestic hot water 2. « Cold » Tank 3. Charge of heat battery 4. Export (if PV) 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Direct space heating 2. Low temperature heat source for the heat battery 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Space heating 2. Domestic hot water 	<ol style="list-style-type: none"> 1. “cold” tank 2. External Fan (if present) 	External Fan (if present) Or “Sink” tank (if present)

Figure 4 - Priority scheme for the energy sources and sinks

3.5. THERMAL SIMULATION: TRNSYS MODEL

The goal of the modelling and simulation activities presented here is to develop the system architecture and the control algorithm of the full energy system including the heat battery. Besides, simulations aim to predict performances on demonstration site, including notably the grid electricity consumption reduction due to the heat battery, the GHG emissions reduction and the amount of energy discharged from the heat battery. The simulation does not include fluid circulation between each components, only water tanks were modelled finely. The model focuses on thermal power transfers with temperature conditions. Models were implemented for the building, the heat battery, the heat pump, the low temperature network, the solar panels. The reactor model calculates air outlet temperature and humidity based on air inlet temperature, humidity and flowrate. Its heating power is also calculated, and therefore its state of charge is available with a simple integration. The simulation time step is 15 min. The simulation starts on March 1st and runs for a full year, with an initial state of charge of the heat battery at 0%. The considered KPIs for this study are presented in the table below:

KPI	Definition	Unit
GHG _{sav} : Greenhouse gas emissions reductions	Reports the total reduction in CO ₂ -eq emissions of greenhouse gases for all energy carriers associated with the primary energy use in the facility with the new heat battery system, referring to initial case.	T_CO2_eq/y
E _{grid,sys} : Grid electricity consumption	Amount of energy coming from the grid.	kWh/y
Q _{disch} : Energy discharged	Amount of energy discharged from the heat battery towards the user's systems	kWh/y

Figure 5 – Key Performance Indicators definition

4. RESULTS

The results presented in Figure 6 show that the total energy discharged by the heat battery increases significantly slower than its storage capacity. Similarly, the greenhouse gas emission reductions and energy grid consumption are better with the highest storage capacity, but this advantage is quite limited compared to the capacity variation.

Storage capacity [kWh]	GHG _{sav} [t_CO2]	E _{grid,sys} [kWh]	Q _{discharge} [kWh]
20	0.887	2593	484
40	0.89	2590	498
60	0.891	2588	510
80	0.894	2584	523
146	0.903	2573	566
278	0.916	2555	639

Figure 6- Performance of the system for several heat battery capacities. Location: Gdynia, Poland.

This result can be understood by observing Figure 7: due to the heat production and demand over the the year, the heat battery with 278 kWh capacity presents only one important charging period by the end of the heating season. Conversely, only one important discharging period can be observed by the beginning of the next heating season. During the rest of the year, only small oscillations of charge and discharge happen, which can be performed with smaller heat storage capacity in a very similar way.

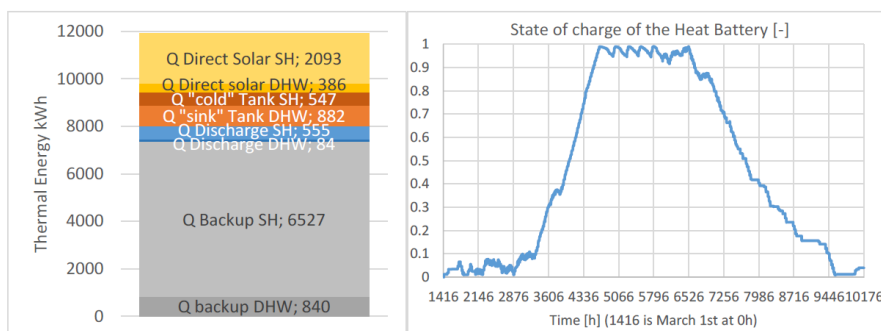


Figure 7 –Heating energy distribution and state of charge curve for a 278 kWh heat battery.
Location: Gdynia, Poland

Similar trends are observed at the French location, with only one main charge and discharge over the year. This result may change with very high solar production capacity, or very low demand. However, this study’s parameter settings reflect realistic energy systems for single family houses, which could not lead to scenarios with several full charging and discharging periods of a high capacity heat storage.

5. CONCLUSION

The presented method allowed identifying a preferred configuration for each site, presented below.

		Gdynia	Cadenet			Gdynia	Cadenet
Preferred new system: Configuration and settings							
Heat Battery production for SH and/or DHW		SH+DHW	SH+DHW	Non renewable primary energy savings	kWh	10424	11528
Charging temperature	°C	130	130	→ limited to the 2 "worst weeks"		→ 337	→ 308
Solar panel area	m²	19.5	16	Net energy consumption reduction	%	89.4%	128%
Solar type	-	PV	PV	Grid electricity consumption	kWh	2555	1512
Presence of an external heat sink	-	No	No	Maximum power reduction	W	-2527	0
Presence of a "Sink" tank	-	Yes	Yes	Greenhouse gases emissions reduction	t CO2	0.916	0.191
"Sink Tank" volume	L	150	150	Customer bill reduction	€/y	278 €	537 €
"Cold" tank volume	L	150	150	Heat Battery discharge energy [cycles]	kWh	639 [2.79]	842 [3.63]
Stacked heat pump and Heat Battery		No	No				

Figure 8 - Preferred configuration and performance for each site

The numerical simulations show that a drastic reduction of the heat battery’s capacity generates only a small decrease of system performance. In the case of the demonstration site in France for instance, reducing the battery capacity from 278 to 20 kWh results in a reduction in discharged energy of only 18% over the year. The solar resource allows only one full charge and discharge per year at nominal capacity, in addition to a number of much smaller amplitude state of charge oscillations. A battery with smaller capacity could perform these smaller oscillations as well, which reduces the advantages of a large storage capacity battery. The heat battery is able to increase significantly the solar fraction (i.e. the proportion of energy used in the house that comes from a local solar source) during springs and summers. During the coldest part of the year, increasing the renewable share with heat storage would imply storing this heat in summer and keeping it until the heating season. This seasonal storage requires a much greater heat battery capacity: an additional 1000 kWh for domestic hot water and 4000 kWh to more than 7000 kWh to include the space heating needs.

6. REFERENCES

- Abdullah, M. Koushaeian, N. A. Shah, et J. D. Chung. 2024. « A Review on Thermochemical Seasonal Solar Energy Storage Materials and Modeling Methods ». *International Journal of Air-Conditioning and Refrigeration* 32 (1): 1. <https://doi.org/10.1007/s44189-023-00044-6>.
- Aziz, Shahid, Tariq Talha, Abdur Rehman Mazhar, Junaid Ali, et Dong-Won Jung. 2023. « A Review of Solar-Coupled Phase Change Materials in Buildings ». *Materials* 16 (17): 5979. <https://doi.org/10.3390/ma16175979>.
- Cai, Senhong, et Zhonghua Gou. 2024. « Defining the Energy Role of Buildings as Flexumers: A Review of Definitions, Technologies, and Applications ». *Energy and Buildings* 303 (janvier): 113821. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113821>.
- Chen, Qi, Zhonghong Kuang, Xiaohua Liu, et Tao Zhang. 2022. « Energy Storage to Solve the Diurnal, Weekly, and Seasonal Mismatch and Achieve Zero-Carbon Electricity Consumption in Buildings ». *Applied Energy* 312 (avril): 118744. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.118744>.
- Chreim, Bashar, Moez Esseghir, et Leila Merghem-Boulahia. 2024. « Recent Sizing, Placement, and Management Techniques for Individual and Shared Battery Energy Storage Systems in Residential Areas: A Review ». *Energy Reports* 11 (juin): 250-60. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2023.11.053>.
- Donkers, P.A.J., L.C. Sögütöglü, H.P. Huinink, H.R. Fischer, et O.C.G. Adan. 2017. « A Review of Salt Hydrates for Seasonal Heat Storage in Domestic Applications ». *Applied Energy* 199 (août): 45-68. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.04.080>.
- Lind, Johan, Erik Möllerström, Helge Averbalk, et Fredric Ottermo. 2023. « Energy Flexibility Using the Thermal Mass of Residential Buildings ». *Energy and Buildings* 301 (décembre): 113698. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113698>.
- Mazur, Natalia, Melian A.R. Blijlevens, Rick Ruliaman, Hartmut Fischer, Pim Donkers, Hugo Meeke, Elias Vlieg, Olaf Adan, et Henk Huinink. 2023. « Revisiting Salt Hydrate Selection for Domestic Heat Storage Applications ». *Renewable Energy* 218 (décembre): 119331. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.119331>.
- Sun, Mingyang, Tianze Liu, Xinlei Wang, Tong Liu, Mulin Li, Guijun Chen, et Dongyue Jiang. 2023. « Roles of Thermal Energy Storage Technology for Carbon Neutrality ». *Carbon Neutrality* 2 (1): 12. <https://doi.org/10.1007/s43979-023-00052-w>.
- Teamah, H.M. 2024. « A Comprehensive Review of Single and Cascaded Phase Change Material Integrated Systems in Solar Domestic Hot Water Applications ». *Journal of Energy Storage* 81 (mars): 110493. <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.110493>.
- Tripathi, Bhartendu Mani, Shailendra Kumar Shukla, et Pushendra Kumar Singh Rathore. 2023. « A Comprehensive Review on Solar to Thermal Energy Conversion and Storage Using Phase Change Materials ». *Journal of Energy Storage* 72 (novembre): 108280. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.108280>.
- Wang, Shuwei. 2022. « Identifying promising use cases for a novel heat battery in Dutch residential buildings », mai. <https://doi.org/10.34641/clima.2022.165>.
- Wang, Shuwei, Pieter-Jan Hoes, Jan L.M. Hensen, Olaf C.G. Adan, et Pim A.J. Donkers. 2023. « A Design Optimization Method for Solar-Driven Thermochemical Storage Systems Based on Building Performance Simulation ». *Journal of Energy Storage* 72 (novembre): 108354. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.108354>.
- Xu, Guozhi, Lei Hu, Yongqiang Luo, Zhiyong Tian, Jie Deng, Guofeng Yuan, et Jianhua Fan. 2022. « Numerical Modeling and Parametric Analysis of Thermal Performance for the Large-Scale Seasonal Thermal Energy Storage ». *Energy and Buildings* 275 (novembre): 112459. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112459>.

Pilotage des systèmes en rafraîchissement mixte centré sur le confort: une étude de sensibilité du modèle de Gagge pour une application en climat tropical.

Maxime Boulinguez*^{1,2}, Jean Castaing-Lasvignottes¹, Aurélie Fouquier³

¹ *Laboratoire PIMENT Université de La Réunion, Sainte-Clotilde 97715, La Réunion, France*

**maxime.boulinguez@univ-reunion.fr*

² *Laboratoire d'Ecologie Urbaine Réunion 137 rue Isautier, 97410 Saint Pierre, La Réunion, France*

³ *Université Grenoble Alpes, CEA, Liten, Campus Ines, 73375 Le Bourget du Lac, France*

RESUME. Les bâtiments en rafraîchissement mixte (MM : Mixed-mode) offrent la flexibilité nécessaire pour assurer à la fois le confort et la réduction de la consommation d'énergie dans les climats tropicaux en combinant simultanément plusieurs dispositifs de refroidissement tels que la climatisation et les ventilateurs de plafond. Pour les concepteurs, il est nécessaire de contrôler simultanément ces derniers pour évaluer performance énergétique et de confort dans la simulation énergétique du bâtiment (BEM : Building Energy Model), et ainsi, dimensionner les systèmes couplés en conséquence. Non seulement la température doit être contrôlée, mais la vitesse et la vêtue s'ajoutent désormais à la liste. Après une revue des modèles de confort les plus courants, des techniques d'analyse de sensibilité sont utilisées pour évaluer l'avantage du contrôle des paramètres environnementaux sur la variabilité de sortie du modèle de confort du bilan thermique, en particulier la SET (Standard Effective Temperature) du modèle Gagge. Cela donne un premier aperçu des stratégies de contrôle des systèmes pour atteindre le confort dans différentes conditions intérieures chaudes d'été tropical.

MOTS-CLÉS : Confort thermique, sensibilité de modèles, stratégies de pilotage

ABSTRACT Mixed-mode (MM) buildings offer the flexibility to target both comfort and lower energy use in tropical climates by simultaneously combining several cooling devices, such as air conditioning and ceiling fans. For designers, a need arises to control simultaneously AC and fans to assess energy use, comfort performance in building energy models (BEM) and size coupled systems in accordance. Not only are temperature and relative humidity to be controlled but airspeed and clothing are now added to the list. Further a review of the common thermal comfort model, sensitivity analysis techniques are used to evaluate the benefit of controlling environment parameters on Thermal Heat Balance comfort model output variability, particularly Gagge's Standard Effective Temperature. This gives first insights into controlling systems strategies to target comfort in different tropical summer indoor conditions.

KEYWORDS : Thermal Comfort, Sensitivity of models, Control strategies

1. INTRODUCTION

Le climat tropical est caractérisé par des températures moyennes mensuelles du mois le plus froid supérieures à 18°C, et, en saison chaude, l'humidité relative est continuellement au-dessus de la fourchette optimale de 50%-60% (Belda et al. 2014). La moitié de la population mondiale sera amenée à vivre dans ce type de climat en 2050, l'augmentation conjoncturelle des revenus de ces populations s'accompagne naturellement d'un « droit au froid » (Rodriguez and D'Alessandro 2019). Il en résulte une augmentation de la demande en énergie liée au rafraîchissement des bâtiments. L'adoption de la climatisation comme unique moyen du maintien des conditions de confort en est la principale cause (Jim and Priyadarshi R Shukla 2022). Faire appel à la conception bioclimatique passive, basée sur la ventilation naturelle traversante est une alternative viable aux systèmes à compression mécanique mais atteint ses limites en conditions plus extrêmes. Qu'il s'agisse de bâtiments neufs ou réhabilités, il existe

une solution intermédiaire consistant à utiliser simultanément brasseurs d'air et climatiseurs afin de réduire la consommation d'électricité notamment par la remontée de la consigne de température. En effet cette dernière est rendue possible par le fait qu'une vitesse d'air accrue sur l'utilisateur conduit à une situation de confort même à température et/ou humidité élevée. Ce scénario est alors qualifié de couplé ou de rafraîchissement mixte. (MM : Mixed Mode, Buildings or Cooling)

Pour les concepteurs, dans un cas de scénario couplé, il devient donc nécessaire, à minima, de contrôler simultanément, dans les simulations énergétiques des bâtiments (STD : Simulation Thermique Dynamique), le thermostat des climatiseurs et une grande plage de vitesse d'air sur les usagers. Ceci permet d'évaluer la consommation d'énergie, les performances de confort et de dimensionner les systèmes couplés en conséquence. Au-delà de la simulation des systèmes, intégrer la flexibilité vestimentaire dans le pilotage apparaît alors comme un autre levier d'amélioration simultanée du confort et des consommations. Réduire de 0.1 clo la vêtue équivaut à diminuer de 0.6°C la température opérative (Schiavon and Lee 2013). Cependant, cette ambition interroge la capacité des modèles à la prendre en compte.

Se pose alors la question de la capacité des modèles de confort usuels à répondre à ce besoin de pilotage en température, vitesse d'air et vêtue. Pour atteindre cet objectif, cet article s'attache à (1) identifier les limites et potentiels d'utilisation des modèles de confort les plus utilisés pour le cas du rafraîchissement mixte, et, (2) à réaliser une étude de sensibilité d'un modèle de confort pour évaluer la contribution des paramètres de pilotage du rafraîchissement couplé.

2. MODELISATION DU CONFORT

Normes et littérature opposent la modélisation du confort dans les bâtiments ventilés naturellement (approche empirique, AM : Adaptive Model) à celles des bâtiments climatisés (approche analytique dite de bilan thermique, THM : Thermal Heat-balance Model). Leur sélection, dans le cas du rafraîchissement mixte n'est pas triviale (Boulinguez et al. 2022). On se pose dans un fonctionnement où la climatisation est disponible, mais l'occupant est actif de son propre confort pour en réduire l'usage, de par notamment la manipulation des protections solaires, des ouvrants de ventilation et ventilateurs ou encore d'un code vestimentaire modulable. Dans un objectif de pilotage des systèmes couplés de rafraîchissement dans ces conditions, il est nécessaire de pouvoir agir à la fois sur la vêtue, la vitesse d'air (ventilateurs de plafond, ouverture des menuiseries) et la température de consigne des climatiseurs. Ceci afin d'évaluer la réponse du modèle de prédiction du confort en conséquence.

Le modèle adaptatif, spécifique aux bâtiments ventilés naturellement (NV : Naturally Ventilated building) retranscrit le concept d'adaptabilité (physiologique, psychologique et comportementale) dans un modèle linéaire qui prend la forme $T_{confort} = a \cdot T_{rm} + b$, où T_{rm} est la température extérieure moyenne glissante des jours précédents. Sa simplicité permet son implémentation rapide dans un outil de STD pour le pilotage de la consigne de climatisation (Sánchez-García et al. 2023). Des travaux ont permis de mettre en évidence les fortes similitudes entre bâtiments ventilés naturellement et bâtiments en rafraîchissement mixte pour ce qui concerne l'adaptation des usagers et donc l'utilisation de ce modèle (Parkinson, de Dear, and Brager 2020). Par ailleurs, de nouvelles versions intégrant des paramètres environnementaux complémentaires pour la prise en compte de l'humidité relative (Vellei et al. 2017) sont développées. Malheureusement, aucun de ces modèles ne permet de considérer la vitesse d'air ou

la vêtue comme un paramètre pilotable à l'instar de la température de consigne. Ce qui les exclus de notre étude.

L'approche adaptative des équations du bilan thermique tente de rationaliser le concept d'adaptabilité par des équations de la physique en la combinant à une réponse physiologique incarnée par les modèles analytiques THM. Ils sont composés d'une part analytique et d'une part adaptative. Il existe trois types d'adaptation de ces modèles combinés. La première consiste à corriger les résultats des modèles THM au travers de l'ajout d'un coefficient multiplicateur. Il peut être constant dans le cas du ePMV de Fanger et Toftum ou calculé à partir d'une base de données d'enquêtes de confort, comme c'est le cas du modèle de Gao *et al.* (Yao et al. 2022). La seconde nommée ATHM (Adaptative Thermal Heat Balance Model), initié par Schweiker *et al.*, consiste à modifier les paramètres individuels (met, clo) en entrée des modèles THM. Enfin, Parkinson *et al.* proposent un nouveau modèle adaptatif cette fois-ci basée sur la SET de type $SET_{confort} = a \cdot Trm + b$, issue du THM à deux nœuds de Gagge (Parkinson, de Dear, and Brager 2020).

Aucun de ces modèles combinés ne fait consensus. Pour notre objectif de pilotage couplé de systèmes de rafraîchissement, il est crucial de se poser la question de la sensibilité de leur part analytique (savoir leur modèle THM, Fanger ou Gagge) aux paramètres de pilotage du mode mixte (température, vitesse, vêtue).

Les modèles THM effectuent le bilan thermique de l'occupant en établissant la différence entre la production de chaleur interne et les échanges par conduction, convection, rayonnement, respiration, avec l'ambiance afin d'évaluer l'écart à la neutralité thermique. Les principales différences entre les deux modèles THM précédemment cités se situent dans le fait que le modèle de Gagge prend à la fois en compte le stockage interne de chaleur et dispose d'un système de thermorégulation en régime transitoire. Le corps humain est représenté par un segment cylindrique. Les échanges prennent place entre l'ambiance et deux nœuds représentant la peau et le corps. A l'inverse, le modèle de Fanger plus simplifié ne considère les échanges entre le corps et l'ambiance qu'en régime permanent dans un unique segment et nœud.

En climat tropical, les conditions d'ambiance intérieures qui atteignent régulièrement $T > 30^{\circ}\text{C}$, $HR > 60\%$, $0.5 \text{ ms}^{-1} < V < 2.5 \text{ ms}^{-1}$ vont au-delà du domaine de validité du PMV ISO7730 de Fanger (max 30°C , 1.0 ms^{-1}). Ce domaine est étendu ($0.1 \text{ ms}^{-1} < V < 2 \text{ ms}^{-1}$) par l'ASHRAE 55:2017 avec l'introduction du *cooling effect* déterminé à partir de la SET du modèle à deux nœuds de Gagge. L'autre aspect qui interroge sur la pertinence du PMV dans ces conditions est la prise en compte sommaire du phénomène d'évapotranspiration. Le modèle n'intègre ce dernier que par la dépense à l'activité métabolique. Ainsi, à métabolisme fixé, l'évapotranspiration est constante quelles que soient les conditions d'ambiance. Dans des conditions chaudes et humides, cette hypothèse apparait comme contre intuitive, l'influence des pertes de chaleur par évapotranspiration dépend fortement de la température et d'humidité relative. Avec le modèle de Fanger, dans un cas d'activité de bureau de type dactylographie, relativement constante autour de 1.1 MET, les conditions d'ambiances, même extrêmes, n'auront aucune influence sur l'évapotranspiration moteur de la régulation du corps humain en condition chaudes.

Le modèle de Gagge intègre ce phénomène de manière plus complète. Il dépend à la fois de la mouillure de peau et de la différence de pression partielle de vapeur entre la peau et l'ambiance. Il démontre de plus que la mouillure de peau, définie comme le rapport de l'évaporation à la surface sur la capacité

maximale d'évaporation dans l'ambiance est un bon indicateur d'inconfort et de stress thermique, bien au-delà du taux de transpiration proposé par Fanger (Parsons 2020). De nombreux travaux mentionnent de plus la bonne performance du modèle, sur les conditions neutres ainsi que chaudes ou très chaudes avec un métabolisme faible (< 2 MET) (Vellei and Dréau 2020). Dans le cadre du pilotage couplé (température, vitesse d'air, vêture) d'un bâtiment de bureau en conditions chaudes, nous privilégierons donc l'étude de sensibilité du modèle à deux nœuds de Gagge, l'indice SET, apparaît dans un premier temps comme l'indice de confort le plus opportun pour cette étude.

3. METHODOLOGIE

L'objectif est d'identifier les paramètres d'entrée du modèle Gagge qui produisent un impact significatif sur l'indice de confort SET. Pour cela, nous réalisons une analyse de sensibilité (AS) qui a pour objectif d'étudier la contribution relative de la variabilité des entrées sur la sortie d'un modèle. De nombreuses méthodes d'AS sont disponibles en fonction des objectifs fixés et des contraintes liées aux modèles (Iooss 2010). Les plus rapides à mettre en œuvre et peu coûteuse en temps de calcul sont celles dites de criblage, basées sur des plans OAT (One-at-A-Time) qui apportent une réponse qualitative. On citera la méthode de Morris pour la plus connue. Généralement plus coûteuse en temps de calcul mais apportant une information quantitative et d'une grande richesse, les méthodes globales GSA (Global Sensitivity Analysis) basées sur la décomposition de la variance sont les plus populaires. On pourra citer les indices de Sobol de premier ordre S_i qui donnent la variabilité de la sortie d'une fonction $Y = f(X_i)$ sachant la variabilité sur les entrées X_i sur la variabilité de Y , selon l'équation (1).

$$S_i = \frac{\text{Var}[\mathbb{E}[Y | X_i]]}{\text{Var}[Y]} \quad (1)$$

L'AS est utilisée dans le domaine du bâtiment depuis plusieurs décennies (Machard et al. 2020). Néanmoins, peu d'études se sont attachées à étudier la sensibilité des modèles THM, encore moins en conditions chaudes et humides et avec pour objectifs le pilotage de systèmes de rafraîchissement. Moutela *et al.* montrent, avec une approche simplifiée de type OAT sur l'ensemble du domaine de validité du PMV, que le métabolisme et la température radiante sont les plus influents et que l'humidité relative et la vitesse d'air ne jouent qu'un rôle secondaire dans la déviation du PMV (Moutela, Carrilho, and Silva 2015). D'autres recherches se concentrent sur la sensibilité du PMV à la variation du métabolisme uniquement, sur un domaine identique à Moutela *et al.* (Hasan, Alsaleem, and Rafaie 2016). Enfin, Ji *et al.* étudient le modèle de Gagge et sa sensibilité à divers modèles de thermorégulation pour les comparer à la donnée mesurée afin de proposer une mise à jour du modèle à deux nœuds. En revanche, ils ne s'intéressent pas à la sensibilité aux entrées du modèle (Ji et al. 2021).

Afin de déterminer les indices de Sobol du premier ordre, nous utilisons la méthode GSA RBD-FAST (Random Balance Design Fourier Amplitude Sensitivity Test (Tarantola, Gatelli, and Mara 2006)) associée à la méthode de génération des tirages par permutation LHS (Latin Hypercube Sampling) qui est aussi économe en temps de calcul qu'une OAT et directement disponible dans la librairie python *SAlib*. (Herman and Usher 2017)

4. CAS D'ETUDE

Le domaine d'étude est contextualisé grâce aux mesures environnementales sur un bâtiment MM démonstrateur en climat tropical pour la période du 12/2/2023 au 31/03/2023. Les extremums sont déterminés à partir des données moyennées sur 5 minutes avec une confiance de 6 écart-types (99.7% des points de mesures). La campagne de mesure, réalisée dans un bâtiment démonstrateur MM à Saint-Pierre de La Réunion, est décrite par (Haese et al. 2023). Dans ce dernier, il est difficile d'agir de manière indépendante sur l'humidité relative sans déshumidifier, il est cependant aisé et peu coûteux de la mesurer. Les plages de variation des paramètres d'entrée sont mentionnées dans le *tableau 1*, selon une distribution uniforme. Cinq séries de tirages ⁽¹⁾ sont réalisées pour des plages de 10% HR pour balayer un domaine de 45% à 95%.

	Humidité relative (rh) ⁽¹⁾	Température d'air (tdb)	Température radiante moyenne (tr)	Vitesse d'air (v)	Métabolisme (met)	Vêtire (clo)
min	49 %	25.4°C	23.1°C	0.01 ms ⁻¹	Fixé à 1.1	0.29 CLO
max	88 %	32.1°C	31.2°C	2.2 ms ⁻¹	MET ⁽²⁾	0.79 CLO

⁽¹⁾ Mesures insitu ayant permis de déterminer les plages d'humidité relative pour les cinq séries de tirages [45 % : 55 %], [55 % : 65 %], [65 % : 75 %], [75 % : 85 %], [85 % : 95 %]

⁽²⁾ Valeur normative d'une activité dactylographique de bureau selon l'ISO7730

Tableau 1 : Domaine de variation des paramètres environnementaux et individuels pour l'étude de sensibilité.

5. RESULTATS ET DISCUSSIONS

Plusieurs analyses de sensibilité sont réalisées sur l'ensemble du domaine de variation avec un nombre de tirages variant de 50 à 20000. Cela nous permet de déterminer que 10000 tirages sont nécessaires à la convergence des indices de Sobol. La méthode LHS, recommandée pour RBD-FAST est utilisée pour réaliser les 10000 tirages par plages de HR. Le modèle à deux nœuds est exécuté pour calculer la SET via la librairie *Pythermalcomfort v2.7* (Tartarini and Schiavon 2020) pour chaque tirage des cinq plages d'HR. Le temps d'exécution est de l'ordre de la minute sur un ordinateur de bureau.

Pour chaque série, l'étendue verticale d'un diagramme en violon (*figure 1*) permet d'apprécier la dispersion de la sortie *Y* (indice SET), l'étendue horizontale sa densité de probabilité. Les plages de confort et d'acceptabilité de la SET sont représentés en aplat de couleur. Les extrémums, la valeur médiane de la série (tiré blanc) sont également représentés. La barre noire correspond à l'écart interquartile représentant 50% des données, il est centré sur la médiane. La *figure 1a* correspond à notre cas d'étude. On observe sans surprise que la probabilité d'inconfort augmente avec l'humidité relative. La dispersion de la SET augmente de 5°SET de la série [45 % : 55 %] à la série [85 % : 95 %]. En dessous de [65 % : 75 %] HR, il est possible d'avoir au moins 50% de la sortie dans les conditions *confortable et acceptable* (vert) à *fraiche* (bleu). Les 50% restant sont majoritairement en zone *légèrement chaud* (jaune). Ce n'est qu'à partir de la plage [65 % : 75 %] HR que plus de 25 % des points sont en situation inacceptable (dégradé orange). Cette situation est exacerbée lorsque l'on supprime l'apport bénéfique de la vitesse d'air sur le confort ($v < 0.15\text{m/s}$) comme le montre la *figure 1b*. La médiane augmente alors de 3 à 7 °SET pour chaque série. Les maximums restent identiques mais les points minimums sont relevés de 5°SET, ce qui réduit la dispersion d'autant et place plus de 75 % des points dans les zones chaudes.

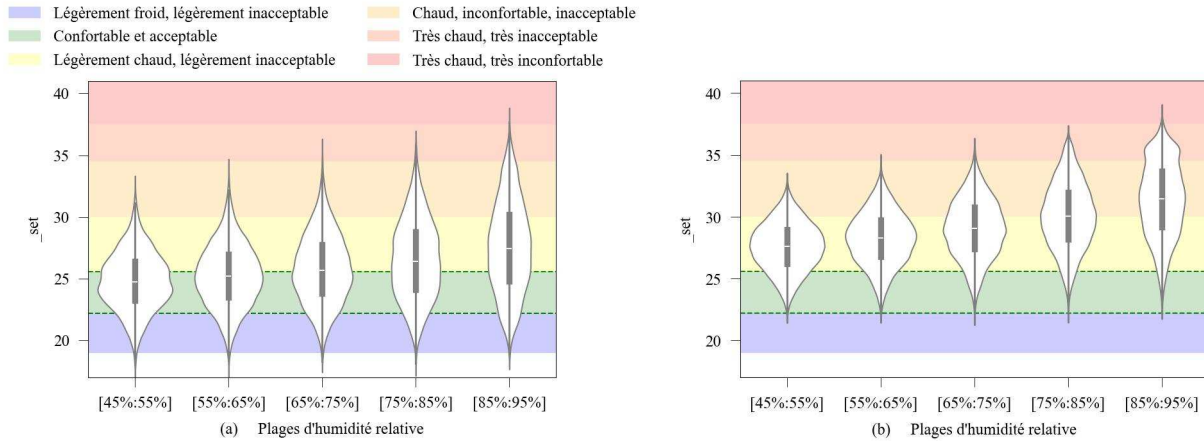


Figure 1 Domaine de variabilité de l'indice SET (Standard Effective Temperature en fonction des plages d'humidité relative avec vitesses d'air représentatives du cas d'étude de 0.01 à 2.2ms⁻¹ à gauche (a) et vitesses d'air hypothétiques faibles 0.01 à 0.15ms⁻¹ (b)

Les variances partielles (figure 2a) représentent la contribution absolues des paramètres X_i sur la sortie Y . Elles sont exprimées en carré de Y , soit SET^2 . La figure 2b présente les indices de sensibilités S_i de premier ordre pour chaque paramètre d'entrée de chaque série. L'indice de Sobol est la variance partielle de Y sachant X_i , normalisée par la variance totale de Y (eq. 1). Ces indices de Sobol représentent la contribution relative d'un paramètre sur la variabilité de la sortie. Au sein de chaque série, nous nous assurons que la somme de indices de Sobol est proche de 1 et que les barres d'erreur sont inférieures à 5% (figure 2b). Un paramètre dont l'indice est inférieur à 0.1 peut être considéré comme ayant une influence négligeable sur la sortie.

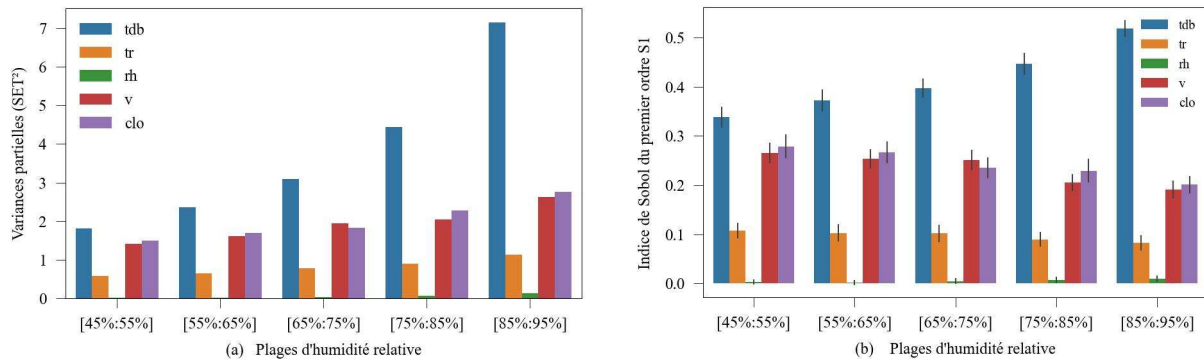


Figure 2 Influence des paramètres de pilotage sur la SET (Modèle à deux nœuds de Gagge). Représentation des indices de sensibilité de Sobol du premier ordre (a) et des variances partielles (b) en fonction de différentes plages d'humidité relative pour le cas d'étude en climat tropical

On constate sur la figure 2b, que les contributions relatives de la vitesse d'air (v) et de la vêtture (clo) sont du même ordre de grandeur quelles que soient les plages d'humidité relative. Elles sont relativement constantes à 0.25 de 45 % à 75 % d'HR et décroissent légèrement à partir de 75 % d'HR. Leur contribution réelle (figure 2a) augmente avec l'humidité relative pour approximativement doubler de la plage [45 % : 55%] HR à la plage [85 % : 95 %] HR. En d'autres termes, l'effet d'une action utilisateur sur un de ces deux paramètres aura deux fois plus d'impact sur la SET en conditions de forte humidité relative qu'en condition sèche. A faible humidité relative, la contribution relative (figure 2a) des deux paramètres (v) et (clo) est légèrement en dessous (0.25) de la contribution de la température (tdb) (0.35). Plus l'humidité relative augmente, plus l'écart se creuse. On passe de 0.1 point d'écart à [45 % : 55 %] à 0.15 point d'écart à [65 % : 75 %] pour atteindre finalement 0.35 points d'écart pour la série [85 % :

95 %]. Ainsi, une action utilisateur sur la vêtture et la vitesse d'air aura donc le même impact que sur la température à faible humidité relative. Cependant, l'impact sera au moins deux fois plus faible à partir de 75% d'humidité relative. Cela s'explique par le fait que plus l'humidité relative est importante dans l'ambiance, plus les échanges évaporatifs se font difficilement pour rétablir la température corporelle. A ce stade, il devient nécessaire d'agir sur la température de consigne (*tdb*) d'un climatiseur pour compléter les effets de (*v*) et (*clo*). Enfin, la contribution de la température rayonnante moyenne des parois reste marginale dans notre cas d'étude pour lequel le bâtiment est bien protégé des sollicitations solaires, tout comme une faible variation (10% max) d'humidité relative.

6. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Cette étude a permis dans un premier temps de poser la question de la pertinence des outils du confort à destination du pilotage des systèmes de rafraîchissement mixte en conditions tropicales. Pour ce climat, le modèle de Gagge présente un avantage par rapport à celui de Fanger, notamment de par une meilleure prise en compte du phénomène d'évapotranspiration, et, de part son caractère dynamique. Une analyse de sensibilité contextualisée à un cas d'étude en usage dans des conditions tropicales est proposée. Elle met en évidence les contributions relatives et réelles d'une action sur un paramètre d'entrée sur la SET issue du modèle à deux nœuds de Gagge. Elle a pour objectif de valider que la température n'est pas l'unique action pour rétablir une situation de confort, et apporte des éléments quantitatifs pour l'indice SET. Bien que l'action sur la température ait un impact toujours plus important que les autres paramètres, agir sur la vitesse d'air et la vêtture dans ces conditions tropicales est une solution alternative viable pour avoir un impact significatif sur la SET. En effet, jusqu'à environ 80% d'HR, une action combinée (*clo+v*) aura à minima le même impact que la seule action sur la température de consigne de climatisation. Au-delà, les transferts évaporatifs se trouvent limités.

L'étude présentée dans cet article est une première étape dans la sélection d'un modèle de confort pour un objectif de pilotage. Il reste que définir les conditions qui permettent de passer d'un mode de rafraîchissement à un autre, comme le mentionnent Parkinson *et al.* (Parkinson, de Dear, and Brager 2020) est un domaine de recherche fertile et dépendra de nombreux facteurs contextuels pour chaque bâtiment. La confrontation modèle – données mesurées s'annonce comme une deuxième étape incontournable pour le choix du modèle combiné basé sur un socle analytique comme le modèle de Gagge. Gardons à l'esprit que la modulation de vêtture et l'usage des ouvrants se font à coûts énergétiques nuls, l'usage de ventilateurs de plafonds à très faible consommation énergétique alors que la modulation de la climatisation génère une demande en électricité conséquente. Cette approche énergétique reste à intégrer dans la notion de pilotage. Enfin, ce type d'étude pourrait être un outil supplémentaire pour comparer différents indices de confort entre eux avant une implantation dans un algorithme de pilotage.

7. BIBLIOGRAPHIE

- Belda, M, E Holtanová, T Halenka, and J Kalvová. 2014. 'Climate Classification Revisited: From Köppen to Trewartha'. *Climate Research* 59 (1): 1–13. <https://doi.org/10.3354/cr01204>.
- Boulinguez, Maxime, Aurélie Fouquier, Olivier Marc, and Castaing-Lasvignottes. 2022. 'Cartographie Des Modèles de Confort : Application Aux Bâtiments En Rafraîchissement Mixte En Climat Tropical'. In , 8. Châlons-en-champagne.
- Haese, Gwénaëlle, Maxime Boulinguez, Pierre Bernaud, and Anthony Couzinet. 2023. 'An Innovative Approach to Better Understand Hot Discomfort, Based on the Measurement of Global Human

- Responses, Including Physiological and Sensory Indicators - Application to End Users of Mixed Mode Cooled Buildings under Tropical Climate Conditions'. In *Ventilation, IEQ and Health in Sustainable Buildings*. Aalborg University, Copenhagen, Denmark.
- Hasan, Mohammad H., Fadi Alsaleem, and Mostafa Rifaie. 2016. 'Sensitivity Study for the PMV Thermal Comfort Model and the Use of Wearable Devices Biometric Data for Metabolic Rate Estimation'. *Building and Environment* 110 (December): 173–83. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.10.007>.
- Herman, Jon, and Will Usher. 2017. 'SALib: An Open-Source Python Library for Sensitivity Analysis'. *Journal of Open Source Software* 2 (9): 97. <https://doi.org/10.21105/joss.00097>.
- Iooss, Bertrand. 2010. 'Revue sur l'analyse de sensibilité globale de modèles numériques', 24.
- Ji, Lili, Abdelaziz Laouadi, Chang Shu, Liangzhu Wang, and Michael A. Lacasse. 2021. 'Evaluation and Improvement of the Thermoregulatory System for the Two-Node Bioheat Model'. *Energy and Buildings* 249 (October): 111235. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111235>.
- Jim, Skea, and Priyadarshi R Shukla. 2022. 'IPCC AR6 WGIII FullReport - Working Group III Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change'. 2022. https://report.ipcc.ch/ar6wg3/pdf/IPCC_AR6_WGIII_FinalDraft_FullReport.pdf.
- Machard, Anaïs, Christian Inard, Jean-Marie Alessandrini, Charles Pelé, and Jacques Ribéron. 2020. 'Sensitivity Analysis of the Input Parameters Impacting Summer Thermal Discomfort in Buildings under Future Climate in Paris'. In . <https://cstb.hal.science/hal-04067828>.
- Moutela, Rui, João Dias Carrilho, and Manuel Gameiro Da Silva. 2015. 'SENSITIVITY OF THE PMV INDEX TO THE THERMAL COMFORT PARAMETERS'. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.3936.1447>.
- Parkinson, Thomas, Richard de Dear, and Gail Brager. 2020. 'Nudging the Adaptive Thermal Comfort Model'. *Energy and Buildings* 206 (January): 109559. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109559>.
- Parsons, K. C. 2020. *Human Thermal Comfort*. CRC Focus. Boca Raton London New York: CRC Press/Taylor & Francis Group.
- Rodriguez, Carolina M., and Marta D'Alessandro. 2019. 'Indoor Thermal Comfort Review: The Tropics as the next Frontier'. *Urban Climate* 29 (September): 100488. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2019.100488>.
- Sánchez-García, Daniel, Jorge Martínez-Crespo, Ulpiano Ruiz-Rivas Hernando, and Carmen Alonso. 2023. 'A Detailed View of the Adaptive-Comfort-Control-Implementation Script (ACCIS): The Capabilities of the Automation System for Adaptive Setpoint Temperatures in Building Energy Models'. *Energy and Buildings* 288 (June): 113019. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113019>.
- Schiavon, Stefano, and Kwang Ho Lee. 2013. 'Dynamic Predictive Clothing Insulation Models Based on Outdoor Air and Indoor Operative Temperatures'. *Building and Environment* 59 (January): 250–60. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.08.024>.
- Tarantola, S., D. Gatelli, and T. A. Mara. 2006. 'Random Balance Designs for the Estimation of First Order Global Sensitivity Indices'. *Reliability Engineering & System Safety* 91 (6): 717–27. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2005.06.003>.
- Tartarini, Federico, and Stefano Schiavon. 2020. 'Pythermalcomfort: A Python Package for Thermal Comfort Research'. *SoftwareX* 12 (July): 100578. <https://doi.org/10.1016/j.softx.2020.100578>.
- Vellei, Marika, and Jérôme Le Dréau. 2020. 'On the Prediction of Dynamic Thermal Comfort under Uniform Environments', 17.
- Vellei, Marika, Manuel Herrera, Daniel Fosas, and Sukumar Natarajan. 2017. 'The Influence of Relative Humidity on Adaptive Thermal Comfort'. *Building and Environment* 124 (November): 171–85. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.08.005>.
- Yao, Runming, Shaoxing Zhang, Chenqiu Du, Marcel Schweiker, Simon Hodder, Bjarne W. Olesen, Jørn Toftum, et al. 2022. 'Evolution and Performance Analysis of Adaptive Thermal Comfort Models – A Comprehensive Literature Review'. *Building and Environment* 217 (June): 109020. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109020>.

Approche sans modèle basée sur le raisonnement à partir de cas pour la gestion d'énergie dans l'espace habité

Fateh Boulmaiz^{1,2,*}, Patrick Reignier^{1,2}, Stéphane Ploix^{1,3}

¹Univ. Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP, 38000 Grenoble, France

²Laboratoire LIG

³Laboratoire G-SCOP

*fateh.boulmaiz@univ-grenoble-alpes.fr

RÉSUMÉ. Cet article propose une nouvelle application de raisonnement à partir de cas (CBR) pour aider à la gestion intelligente des ressources énergétiques dans les espaces habités. Cette approche évite la construction d'un modèle, qu'il soit physique ou basé sur des données, en analysant l'historique des cas précédents de gestion de l'énergie dans l'espace habité. Elle utilise ensuite ces données pour fournir des recommandations d'actions visant à réduire la consommation d'énergie tout en prenant en compte les exigences de confort énergétique des occupants. Les résultats d'évaluation montrent des tendances encourageantes, démontrant ainsi le potentiel de cette approche pour une gestion plus efficace de l'énergie dans les espaces habités.

MOTS-CLÉS. Approche sans modèle, raisonnement à partir de cas, gestion d'énergie.

ABSTRACT. This article proposes a new Case-Based Reasoning (CBR) application to assist in the intelligent management of energy resources in inhabited spaces. This approach avoids constructing a model, whether physical or data-based, by analyzing the historical cases of energy management in the inhabited space. It then utilizes this data to provide actionable recommendations aimed at reducing energy consumption while considering the energy comfort requirements of occupants. Evaluation results show promising trends, thus demonstrating the potential of this approach for more effective energy management in inhabited spaces.

KEYWORDS. Model-free approach, case-based reasoning, energy management.

1. INTRODUCTION

Actuellement, les espaces habités en Europe représentent jusqu'à 40% de la consommation énergétique totale, faisant de ce secteur en France la source de plus de 36% des émissions de CO₂ (écologique, 2019). Avec plus de 36 millions d'unités de logement en France et considérant que les individus passent plus de 90% de leur vie à l'intérieur (You, 2018), il est évident que les actions visant à réaliser des économies d'énergie devraient principalement se concentrer sur les bâtiments et leurs occupants.

Des efforts politiques ont été déployés par les États et les gouvernements pour réduire la consommation d'énergie et les émissions de gaz à effet de serre. Ces efforts comprennent l'octroi d'incitations financières aux familles pour entreprendre des travaux visant à améliorer l'efficacité énergétique des bâtiments, ainsi que l'introduction de nouvelles normes de construction et de contrats de vente d'énergie basés sur des tarifs variables. Bien que ces mesures aient contribué à améliorer l'efficacité énergétique des bâtiments, elles ne prennent pas en compte le rôle crucial du comportement des occupants. Des études, telles que (Peschiera et al., 2010), ont montré que le comportement des occupants a un impact significatif sur la consommation d'énergie des bâtiments. Par conséquent, il est nécessaire de développer des approches

qui intègrent le facteur humain dans la recherche d'une efficacité énergétique accrue, tout en préservant son confort.

Pour générer assister les occupants à gérer l'énergie dans leur espaces habités, on utilise généralement des modèles basés sur des données régressives ou des équations mathématiques. Cependant, ces approches présentent des limitations. Les modèles régressifs, par exemple, ne prennent pas en compte la co-occurrence des phénomènes, ce qui peut entraîner des erreurs d'estimation et nécessitent de grandes quantités de données historiques pour l'apprentissage et le réglage des paramètres, les rendant ainsi dépendants du contexte. D'autre part, les modèles basés sur la connaissance requièrent une compréhension approfondie de l'environnement et du bâtiment, et ne sont pas facilement adaptables aux changements environnementaux, nécessitant une reconstruction du modèle à chaque fois. Face à ces défis, une approche basée sur le raisonnement à partir de cas est proposée, offrant une solution plus adaptable et évolutive, sans nécessiter la construction d'un modèle complexe ou de grandes quantités de données.

Après avoir exposé le contexte de cette étude dans la prochaine section, la section 3 détaille notre approche basée sur le paradigme CBR pour la gestion de l'énergie dans les espaces habités. Cette approche sera ensuite évaluée dans la section 4 afin de déterminer son efficacité et sa pertinence dans des situations réelles. Enfin, nous tirerons les conclusions dans la section 5.

2. CONTEXTE : RAISONNEMENT À PARTIR DE CAS

Le CBR est un paradigme de résolution de problèmes qui exploite des expériences passées, représentées sous forme de "cas sources", stockées dans une base de cas \mathbb{CB} , pour résoudre de nouveaux problèmes, appelés "cas cible". Chaque cas source comprend une description du problème à résoudre ainsi que la solution retenue. Ce paradigme repose sur le raisonnement par analogie dans la résolution des problèmes cibles, en se basant sur le principe selon lequel des problèmes similaires ont des solutions similaires. Ce principe est mis en œuvre à travers cinq processus interdépendants.

- *Élaboration* : Lorsqu'un nouveau problème est présenté, il est analysé pour identifier les caractéristiques importantes et les objectifs à atteindre.
- *Remémoration* : La base de cas est interrogée pour trouver des cas similaires au problème cible. Cette étape implique la recherche de cas sources pertinents qui peuvent servir de base pour résoudre le problème cible.
- *Réutilisation* : Une fois les cas pertinents identifiés, les solutions ou stratégies utilisées pour résoudre ces cas sont extraites et adaptées au nouveau problème. En pratique, il est rare que les problèmes correspondent exactement aux cas précédemment résolus, Ainsi, une adaptation est souvent nécessaire pour ajuster les solutions existantes au contexte spécifique du problème cible.
- *Révision* : La solution adaptée est évaluée pour s'assurer qu'elle est appropriée pour le problème actuel. Si nécessaire, le processus de réutilisation est sollicité pour ajuster la solution en tenant compte des retours d'expérience et des ajustements potentiels identifiés lors de l'évaluation.
- *Rétention* : Enfin, le système intègre le problème cible ainsi que sa solution issue du processus de résolution actuel dans sa base de cas sous forme d'un cas source, enrichissant ainsi son expérience pour les futures résolutions de problèmes similaires.

3. LE CBR POUR GÉNÉRER LES RECOMMANDATIONS

Cette section propose une approche basée sur le paradigme CBR pour aider les occupants à optimiser la gestion de l'énergie dans leur environnement résidentiel sans compromettre leur confort. L'avantage de cette approche est qu'elle ne nécessite ni la construction d'un modèle basé sur des connaissances physiques ni de grandes quantités de données pour l'apprentissage, contrairement à d'autres approches de l'apprentissage automatique. Cependant, il est important de noter que l'approche proposée dans la suite de cet article ne se limite pas à une simple application du paradigme CBR classique. Au contraire, elle intègre des améliorations visant à renforcer les différents processus inhérents à ce paradigme, afin de mieux répondre aux besoins spécifiques de l'optimisation énergétique dans les environnements résidentiels

3.1. STRUCTURE DE CAS

Pour répondre aux besoins des autres processus de l'approche CBR proposée, les données d'un cas sont structurées différemment de la structuration traditionnelle, qui présente un cas sous forme d'un problème et de sa solution. Dans cette approche, les données sont organisées en trois catégories :

- *Données de contexte* : Ces données, représentées par \mathcal{C} , modélisent les phénomènes sur lesquels le système n'a aucune influence directe, comme les conditions météorologiques ou le nombre de personnes présentes dans l'espace habité.
- *Données d'actions* : Ces données, représentées par \mathcal{A} , englobent les phénomènes qui peuvent d'être contrôlés et d'influencer l'état de l'environnement. Elles englobent les actions ou les décisions envisageables pour résoudre le problème rencontré, telles que l'ouverture des fenêtres/portes et la définition des points de consigne pour le chauffage/climatisation.
- *Données d'effets* : Ces données, représentées par \mathcal{E} , décrivent les conséquences observées en réponse aux actions prises dans le contexte donné, telles que la température intérieure, la qualité de l'air intérieur, etc.

Un cas C_i est ainsi défini par le triplet $(\mathcal{C}_i, \mathcal{A}_i, \mathcal{E}_i)$. En se conformant à cette nouvelle structure, le principe du paradigme CBR est reformulé par le Principe 1. Le processus de résolution de problème consiste donc à identifier les actions permettant d'améliorer le confort énergétique tout en maintenant, voire en réduisant, le coût de la consommation d'énergie.

Principe 1 *Des actions similaires entreprises dans des contextes similaires produisent des effets similaires*

3.2. REMÉMORATION DE CAS SIMILAIRES

Le CBR conventionnel présente la limitation de ne pas avoir de critère pour identifier les cas les plus proches en fonction de la similarité entre les problèmes des cas. Les approches de CBR conventionnelles remémorent un nombre fixe de cas sources similaires. Ainsi, elles sélectionnent toujours le même nombre de cas similaires, indépendamment d'un nombre optimal de cas similaires selon les cas cibles. Ce nombre fixe de cas similaires pose problème lorsque certains cas cibles devraient prendre en compte davantage de cas sources similaires tandis que d'autres en nécessiteraient moins. De plus, un problème survient avec le CBR conventionnel lorsque de nombreux cas sources sont également distants des cas cibles. Ainsi, il ne

garantit pas des cas sources similaires optimaux pour divers cas cibles, ce qui conduit à des performances médiocres en raison de l'écart par rapport aux cas sources similaires.

Dans cet article, nous présentons une technique de remémoration de cas similaires qui adapte dynamiquement le nombre optimal de cas similaires en tenant compte de la distribution des distances entre les cas sources pour chaque cas cible. L'idée principale est de sélectionner les cas sources similaires en fonction de la similarité plutôt que du nombre, en déterminant un seuil de distance de similarité pour chaque cas cible. Les cas sources similaires seront ainsi les cas qui satisfont au critère de ce seuil de distance. Plus précisément, le processus de remémoration des cas similaires se déroule en trois étapes.

1. Détermination du seuil de distance contexte-action : Le Principe 1 du paradigme CBR met l'accent sur la similarité entre les variables, une formalisation du terme similitude, pouvant être traitée par des systèmes informatiques, est donc requise. Dans cette étude, cette similarité est exprimée par la mesure de distance entre les variables. Aucune hypothèse n'est faite sur la distance utilisée, tant qu'elle prend en compte la représentation vectorielle des variables utilisées pour modéliser les phénomènes. Ainsi, des distances telles que la distance euclidienne ou la distance de Manhattan peuvent être utilisées selon le choix du concepteur. Pour tenir compte de la catégorie des variables et de leurs interactions, nous introduisons trois distances : $d_E(C_i, C_j)$ pour mesurer la distance entre les variables d'effets des cas C_i et C_j , $d_{CA}(C_i, C_j)$ pour évaluer la distance entre les variables de contexte et d'action, et $d_C(C_i, C_j)$ pour quantifier la distance entre les variables de contexte.

Bien que la distance entre les variables fournisse une mesure objective de leur proximité dans un espace donné, elle ne permet pas en elle-même de juger de leur similarité. Il est donc nécessaire de compléter cette évaluation en considérant d'autres aspects, tels que l'établissement d'un seuil en deçà duquel deux variables peuvent être considérées comme similaires. Précisément, dans ce travail, pour déterminer si 2 vecteurs représentant les valeurs d'une variable d'effets de deux cas sont similaires, un seuil est nécessaire. La valeur sensible Δ_e définie par un expert, associée à chaque variable d'effet e_i , va être utilisée : elle représente la sensibilité perceptible par l'humain à une variation de Δ_e dans la valeur de la variable e . Ce seuil permet ainsi de déterminer si les variables d'effets sont similaires selon la définition 1.1.

Définition 1.1 (Vecteurs d'effet similaires.) Deux cas C_i et C_j sont similaires basé sur leurs variables d'effets \mathcal{E} si : $\forall e \in \mathcal{E}, d_E(C_i(V_e), C_j(V'_e)) \leq \Delta_e$, où les vecteurs V_e et V'_e représentant les valeurs de la variable d'effet e dans C_i et C_j respectivement.

La définition 1.1 permet d'évaluer la similarité des effets dans le principe 1, mais ne couvre pas la similarité basée sur le contexte et les actions. Pour combler cette lacune, ce travail introduit un seuil de similarité basé sur ces variables, comme énoncé dans la définition 1.2. Dans cette définition, les cas (cas) pour lesquels la distance contexte-action satisfait le seuil $\delta_{CA}^{C_i}$ par rapport au cas C_i ne présenteront pas de différence perceptible par l'utilisateur en termes de variables d'effet.

Cette approche permet de générer, au maximum, un nombre équivalent de seuils de distance contexte-action que le nombre de cas sources dans la base de cas. L'objectif est d'estimer le seuil $\delta_{CA}^{C^*}$ lié au cas cible C^* à partir des seuils contexte-action des cas disponibles dans la base de cas. Ce seuil représente la distance contexte-action optimale qui, pour chaque cas source C_i , maximise à la fois la précision et la sensibilité lors du calcul du seuil $\delta_{CA}^{C_i}$. Cette optimisation est réalisée en utilisant la méthode statistique F1-score, comme indiqué dans l'équation 1.

Définition 1.2 (Seuil de similarité contexte-action.) *Le seuil de distance contexte-action $\delta_{CA}^{C_i}$ associé au cas C_i doit satisfaire la condition suivante : $\forall C_j, \forall e, d_{CA}(C_i, C_j) \leq \delta_{CA}^{C_i} \Rightarrow d_E(C_i, C_j) \leq \Delta_{e_i}$, avec Δ_e – la distance de sensibilité associée à la variable d’effet e .*

$$\delta_{CA}^{C^*} = \operatorname{argmax}_{\delta_{CA}^{C_i}} (\text{F1-score}(\delta_{CA}^{C_i})) \quad (1)$$

2. Détermination du seuil de distance contexte et remémoration de cas sources similaires :

Il n’est pas possible d’appliquer directement le seuil contexte-action au cas cible C^* . En effet, les actions du cas C^* sont inconnues (c’est précisément ce que nous cherchons à déterminer), et les seules informations disponibles pour ce nouveau cas sont les données de contexte. Ainsi, seules les variables de contexte peuvent être utilisées pour évaluer la similarité entre le cas C^* et les cas sources, en utilisant la distance du contexte d_C . Le défi à ce stade est de déterminer le seuil $\delta_C^{C^*}$ qui représente la distance de contexte maximale déterminant les cas sources similaires au cas C^* .

Une approche pour relever ce défi consiste à déduire le seuil $\delta_C^{C^*}$ à partir du seuil $\delta_{CA}^{C^*}$ de la distance contexte-action. Cela peut être accompli en utilisant une fonction de projection ϕ qui permet de projeter la distance contexte-action dans l’espace du contexte, comme le présente l’équation 2.

$$\delta_C^{C^*} = \max \phi(\delta_{CA}^{C^*}), \forall C_i \in \mathbb{CB} \quad (2)$$

L’ensemble \mathcal{N}_{C^*} de cas sources similaires au cas cible C^* est composé des cas sources C_i dont la distance contexte $d_C(C^*, C_i)$ est inférieure au seuil $\delta_C^{C^*}$. Ceci est représenté formellement dans l’équation 3.

$$\mathcal{N}_{C^*} = \{C_i \in \mathbb{CB}, d_C(C^*, C_i) \leq \delta_C^{C^*}\} \quad (3)$$

3.3. ADAPATATION

Le schéma classique de raisonnement dans l’élaboration des approches d’adaptation repose souvent sur une hypothèse implicite selon laquelle la base de cas ne contient que des cas positifs, c’est-à-dire des cas où la solution a réussi à satisfaire le problème correspondant. Toutefois, il existe aussi des cas négatifs où la solution proposée échoue à résoudre le problème. Ces cas d’échec ne sont jamais utilisés par les systèmes CBR existants, portant ils pourraient constituer des sources de connaissance potentiellement utiles pour le processus de résolution de problème.

Dans cet article, une approche d’adaptation est proposée qui est inspirée par cette reconnaissance des cas d’échec comme une source de connaissance précieuse, supposant que les cas sources ont déjà été étiquetés comme des cas réussis (positifs) ou des cas échoués (négatifs), selon une fonction d’étiquetage \mathcal{E} (voir équation 4). De plus, cette approche présume que le système CBR est équipé d’une fonction de qualité QF, qui évalue l’efficacité des actions entreprises dans un contexte donné. Des scores plus élevés indiquent de meilleures performances, établissant ainsi implicitement une valeur seuil \mathcal{TS}^e pour chaque variable d’effet e , comme défini par l’équation (4).

$$\forall C \stackrel{\text{def}}{=} (\mathcal{C}, \mathcal{A}, \mathcal{E}) \in \mathbb{CB}, \forall e \in \mathcal{E}, \text{QF} : e \mapsto \mathbb{R}$$

$$\text{LF}(C) = \begin{cases} C^+ & \text{if } \text{QF}(e) \geq \mathcal{TS}^e, \forall e \in \mathcal{E} \\ C^- & \text{sinon.} \end{cases} \quad (4)$$

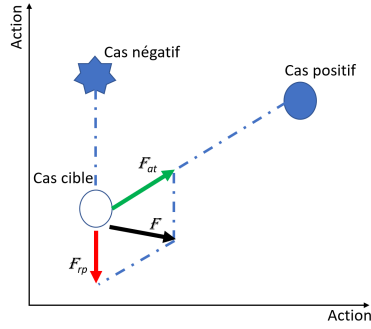


Figure 1 : Forces attractives et répulsives.

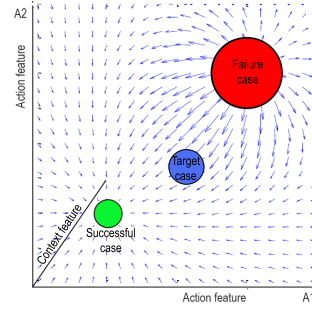


Figure 2 : Champ potentiel total.

Dans cet article, une approche d'adaptation est proposée qui est inspirée par cette reconnaissance des cas négatifs comme une source de connaissance précieuse, où le concept fondamental est de traiter le cas cible comme un point se déplaçant dans l'espace des actions, influencé par des forces virtuels créés autour des actions des cas sources similaires positifs à atteindre et des cas sources négatifs à éviter. Par conséquent, les actions du cas cible subit deux types de forces : des forces attractives \mathbb{F}^A générées par les cas sources similaires positifs, et des forces répulsives \mathbb{F}^R générées par les cas sources similaires négatifs (voir figure 1). Les champs potentiels, associés à ces forces, sont appliqués à une solution initiale représentée par le barycentre des actions des cas sources similaires, pour déterminer collectivement la position des actions à retenir pour le cas cible dans l'espace des actions, comme illustré dans la figure 2.

L'amplitude des deux forces devrait être directement proportionnelle à la performance des solutions sources. En d'autres termes, cela signifie que l'on cherche à s'approcher des actions ayant des effets positifs et à s'éloigner des actions ayant des effets négatifs. Cependant, cette amplitude devrait également être inversement proportionnelle à la distance entre les contextes des cas sources similaires et le contexte cible. En effet, plus les contextes des deux cas sont différents, moins les actions sources sont pertinentes pour le cas cible. Pour intégrer ces contraintes, l'équation 5 introduit une fonction qui détermine à la fois l'amplitude et la direction de la force potentielle \mathbb{F}_C associée à un cas source similaire C .

$$\forall C \in \mathcal{N}_{C^*}, \mathbb{F}_C = \begin{cases} \left(1 - \frac{d_C(C^*, C)}{\delta_C^{C^*}}\right) \times (QF(C) - \mathcal{T}S), & \text{si } QF(C) \neq \mathcal{T}S \\ 1 - \frac{d_C(C^*, C)}{\delta_C^{C^*}}, & \text{sinon} \end{cases} \quad (5)$$

4. ÉVALUATION

Pour évaluer notre approche, désignée par CBR-APF par la suite, nous avons mené une expérience avec des données semi-synthétiques générées à partir de données réelles. La base de cas comprend 15 948 cas, chacun composé de variables d'effet (température et qualité de l'air), d'actions (ouverture de porte et fenêtre) et de variables contextuelles (conditions météorologiques), chacune décrite par un vecteur de 24 valeurs par jour. Nous avons utilisé une validation croisée à 5 volets, avec un ensemble de test $\mathbb{C}B_T$ choisi parmi cinq ensembles, tandis que les quatre restants servent d'ensembles d'apprentissage. Les résultats des métriques sont moyennés sur les cinq itérations pour obtenir une estimation finale de la performance. Pour évaluer l'efficacité des actions proposées, nous avons utilisé des fonctions pour mesurer le niveau de l'insatisfaction des utilisateurs concernant la température (QF^{eT}) et la qualité de l'air (QF^{eCO_2}), comme défini par l'équation 6. En outre, afin de simuler les conséquences des actions suggérées, nous avons élaboré un modèle physique du bâtiment qui a été utilisé dans

l'expérience.

1. L'approche CBR^S, présentée dans (Boulmaiz et al., 2022), utilise des cas réussis et échoués mais manque d'un processus d'adaptation.
2. L'approche CBR^B fusionne les solutions des cas similaires sans forces artificielles pour évaluer leur efficacité.
3. CBR^P teste une variante qui ne considère que les cas positifs, soulignant les avantages d'incorporer les cas négatifs.
4. CBR^R, introduite dans (Patterson et al., 2002), utilise un algorithme des K-plus proches voisins et une régression linéaire pour prédire la solution du cas cible.

$$QF^{e_T}(h) = \begin{cases} 0 & \text{si } e_T(h) \in [21, 23] \\ \frac{e_T(h)-23}{26-23} & \text{si } e_T(h) > 23 \\ \frac{21-e_T(h)}{21-18} & \text{si } e_T(h) < 21 \end{cases}, \quad QF_C^{e_{CO_2}}(h) = \begin{cases} 0 & \text{si } e_{CO_2}(h) \leq 500 \\ \frac{e_{CO_2}(h)-500}{1500-1000} & \text{si } e_{CO_2}(h) > 500 \end{cases} \quad (6)$$

Pour évaluer les approches d'adaptation, nous définissons et utilisons les indicateurs suivantes :

- *Taux d'Amélioration des Performances (TAP)* : Cette métrique, formalisée par l'équation 7, évalue l'amélioration des performances des actions générées par l'approche d'adaptation par rapport à celles des actions réalisées par l'utilisateur sans assistance.

$$TAP(C_i) = \frac{PRF_{C_i}^* - PRF_{C_i}^r}{\text{abs}(PRF_{C_i}^r)} \quad (7)$$

Où $PRF_{C_i}^* = QF(C_i)$ – Les performances du cas C_i suite à l'application des actions générées par l'approche d'adaptation, $PRF_{C_i}^r$ – Les performances du cas C_i suite à l'application des actions réalisées par l'utilisateur. $\text{abs}(\cdot)$ – La valeur absolue.

- *Taux d'Efficacité de l'Approche (TEA)* : C'est le ratio entre le nombre de cas de test dont les performances sont améliorées par l'application des actions recommandées par l'approche d'adaptation et le nombre total de cas de test, tel qu'illustré dans l'équation 8.

$$TEA = \frac{|\beta^+|}{|\beta|} \quad (8)$$

Où $\beta = \mathbb{C}\mathbb{B}_T$ – L'ensemble de cas de test, $\beta^+ = \{C_i \in \mathbb{C}\mathbb{B}_T / TAP(C_i) > 0\}$, $|\cdot|$ – La cardinalité.

La Table 1 résume les résultats comparatifs de notre approche avec les quatre approches choisies. Les observations notables de cette expérience sont :

- Peu importe l'ensemble de test utilisé, notre approche CBR-APF est nettement meilleure en termes de performances que toutes les autres bases de référence, avec également de meilleurs TEA.
- La qualité du processus de raisonnement est significativement influencée par le nombre de cas sources similaires. Lors de l'utilisation d'une approche d'adaptation compositionnelle, le TAP tend à être supérieur par rapport à l'utilisation d'un seul cas similaire, comme le montre la comparaison entre CBR-APF (approche compositionnelle) et CBR^S (cas similaire unique).
- L'ajout des forces d'attraction et de répulsion impacte significativement les résultats du processus d'adaptation. Notre approche APF-CBR surpasse la base de référence CBR^B, même avec un nombre égal de cas similaires. CBR-APF est 1,52 fois plus efficace que CBR^B pour améliorer la performance des cas (TAP global = 29.87% contre 19.58%). De

ENSEMBLE APPROCHE	S ₁		S ₂		S ₃		S ₄		S ₅		GLOBAL	
	MÉTRIQUE		MÉTRIQUE		MÉTRIQUE		MÉTRIQUE		MÉTRIQUE		MÉTRIQUE	
	TAP (%)	TEA(%)	TAP (%)	TEA(%)	TAP (%)	TEA(%)	TAP (%)	TEA(%)	TAP (%)	TEA(%)	TAP (%)	TEA(%)
CBR ^S	16.73	59.13	17.85	48.57	19.53	60.12	20.48	56.07	18.79	64.48	18.68	57.67
CBR ^B	17.03	57.51	15.36	63.90	20.52	59.69	23.63	65.52	21.36	662.71	19.58	61.87
CBR ^P	22.62	42.26	18.54	48.85	20.14	50.21	22.48	52.92	23.47	39.86	21.45	46.82
CBR ^R	13.91	32.18	11.83	29.89	14.71	43.07	17.45	39.52	15.09	41.26	14.60	37.18
CBR-APF	29.84	94.01	28.85	87.93	31.05	96.77	32.62	93.60	27.03	88.99	29.87	92.05

Tableau 1 : Résultats de l'évaluation 5-fold des approches d'adaptation avec des données semi-synthétiques.

plus, APF-CBR trouve avec succès une solution pour 1,49 fois plus de cas que CBR^B, en améliorant la performance des solutions proposées par l'utilisateur sans assistance dans 92,05% des cas, contre 61,87% pour CBR^B.

- L'utilisation des cas d'échec influence considérablement la performance d'un système CBR. En incorporant à la fois des cas positifs et des cas négatifs, le système améliore les résultats du raisonnement. Comparant les trois approches différentes CBR-APF, CBR^P, et CBR^R, les résultats TAP montrent que l'approche CBR-APF surpasse les autres. Elle est plus de trois fois plus efficace que CBR^R et plus de 1.5 fois plus efficace que CBR^P pour améliorer la performance.

5. CONCLUSION

Cet article a présenté une nouvelle approche basée sur le paradigme CBR pour la conception des systèmes de gestion d'énergie. En utilisant le CBR, notre méthode évite les difficultés liées à la construction de modèles de l'environnement, offrant ainsi une approche plus flexible et plus facilement déployable. Cette approche évite de modéliser explicitement l'environnement en se basant sur les expériences passées, qu'elles soient réussies ou échouées, dans le raisonnement pour générer des actions qui optimisent la gestion de l'énergie dans un espace habité. Les résultats d'une première expérimentation ont démontré une amélioration significative des performances par rapport aux actions effectuées par un occupant sans assistance. Nous travaillons actuellement sur l'amélioration du processus de raisonnement, en abordant spécifiquement le défi posé par le fait que les approches d'adaptation actuelles supposent que les solutions présentes dans la base de cas sont optimales. Notre travail se concentre sur le développement d'une nouvelle approche qui reconnaît explicitement que ces solutions ne sont pas nécessairement optimales.

BIBLIOGRAPHIE

- (2018). Modern indoor living can be bad for your health. Technical report, YouGov.
- Boulmaiz, F., Reignier, P., and Ploix, S. (2022). An occupant-centered approach to improve both his comfort and the energy efficiency of the building. *Knowledge-Based Systems*, 249 :108970.
- Patterson, D. W., Rooney, N., and Galushka, M. (2002). A regression based adaptation strategy for case-based reasoning. In *AAAI/IAAI*.
- Peschiera, G., Taylor, J. E., and Siegel, J. A. (2010). Response–relapse patterns of building occupant electricity consumption following exposure to personal, contextualized and occupant peer network utilization data. *Energy and Buildings*, 42(8) :1329–1336.
- écologique, M. T. (2019). Chiffres clés de l'Énergie-edition 2019. Technical report, Ministère de la transition écologique, France.

Intégration d'un modèle de microclimat méso-échelle dans une plateforme d'énergétique du bâtiment à l'échelle quartier

Léo Bourquin^{1,2,4}, Mathias Bouquerel^{*1,4}, Thierry Duforestel^{1,3,4}, Emmanuel Bozonnet^{2,3,4}

¹ EDF R&D

**EDF Lab les Renardières, Avenue des Renardières,
77250 Ecuelles Moret-Loing-et-Orvanne,
[*mathias.bouquerel@edf.fr](mailto:mathias.bouquerel@edf.fr)**

² LaSIE UMR CNRS 7356, Avenue Michel Crépeau, 17042 La Rochelle Cedex

³ IRSTV FR CNRS 2488, CENTRALE NANTES 1 Rue Noë – BP 92101 44321 Nantes

⁴ Laboratoire Commun 4eV Lab EDF & LaSIE

RESUME. Dans les modèles d'énergétique du bâtiment (BEM) de nos jours, le contexte urbain est souvent simplifié ou négligé en raison des difficultés à prendre en compte de manière précise tous les échanges avec l'environnement extérieur. La simplification excessive du contexte urbain peut avoir un effet important sur la précision des prédictions des BEM. Plusieurs approches sont possibles pour remédier à ces problèmes. Dans cet article, une méthodologie visant à intégrer l'effet d'îlot de chaleur urbain dans un BEM à une échelle quartier est proposée. On présente un couplage asynchrone entre Urban Weather Generator (UWG) et MyBEM. L'effet de l'îlot de chaleur urbain et l'efficacité du couplage sont évalués par une analyse de sensibilité sur un cas d'étude réel. On constate des phénomènes caractéristiques des îlots de chaleur urbains : augmentation des températures et notamment nocturnes et augmentation du besoin de rafraîchissement. On constate également que les paramètres liés à la morphologie urbaine sont les plus sensibles.

MOTS-CLÉS : Microclimat urbain, Energétique du bâtiment, Îlot de chaleur urbain

ABSTRACT. In contemporary Building Energy Modeling (BEM), the urban context is often simplified or neglected due to the challenges of accurately accounting for all exchanges with the outdoor environment. Overly simplifying the urban context can significantly impact the accuracy of BEM predictions. Several approaches are possible to address these issues. In this article, a methodology aimed at integrating the Urban Heat Island (UHI) effect into a neighborhood-scale BEM is proposed. An asynchronous coupling between Urban Weather Generator (UWG) and MyBEM is presented. The effect of the urban heat island and the effectiveness of the coupling are evaluated through a sensitivity analysis on a real case study. Characteristic phenomena of urban heat islands are observed: Increase in temperatures, especially during the night and increase in cooling need. It is shown that parameters related to urban morphology are the most sensitive

KEYWORDS : Urban microclimate, Building Energy, Urban Heat Island

1. INTRODUCTION

L'îlot de chaleur urbain (ICU) est un phénomène bien établi, caractérisé par des températures de l'air plus élevées dans les zones urbaines par rapport aux zones rurales avoisinantes (Oke, 1982). L'urbanisation altère le cycle diurne de la température de l'air, avec des pics d'intensité d'ICU observés en fin de journée et la nuit. La morphologie urbaine contribue à l'ICU avec un albédo effectif plus élevé, une réduction de la vitesse du vent et une diminution de l'évaporation due à la diminution des zones végétalisées. L'ICU a des répercussions significatives sur la demande énergétique des bâtiments, pouvant modifier leur consommation énergétique jusqu'à 20% dans certains cas (B. Bueno et al. 2012; Bozonnet, 2005). Les bâtiments représentent environ 40% de la demande énergétique mondiale, soulignant ainsi l'importance de tenir compte de l'ICU dans la modélisation des performances énergétiques des bâtiments (Santamouris 2014; Pérez-Lombard et al. 2008).

Les modèles énergétiques traditionnels ne considèrent généralement pas l'influence de l'ICU, ce qui peut conduire à des estimations erronées de la consommation des bâtiments (Grimmond et al. 2010). Dans cet article, on propose donc d'intégrer un outil de microclimat mésoclimatique, Urban Weather Generator (UWG) (B. Bueno. 2013), dans une plateforme BIM to BEM dédiée à l'énergétique du bâtiment : MyBEM. UWG combine un modèle atmosphérique et un modèle thermique de bâtiment, ce qui permet de produire des fichiers météorologiques adaptés à une configuration urbaine, à l'échelle d'un quartier ou d'une ville. Ce couplage est examiné avec une étude de cas, suivie d'une discussion sur ses limites actuelles et les perspectives d'amélioration.

2. OBJECTIFS DE RECHERCHE ET METHODE

Dans cette partie, on présente le couplage entre la chaîne d'outils MyBEM et le modèle de microclimat UWG. L'objectif est de modéliser la canopée urbaine à l'échelle mésoclimatique (maille quartier) et prendre en compte son influence dans des simulations d'énergétique du bâtiment.

2.1. LA PLATEFORME MYBEM

MyBEM est une plateforme modulaire développée par EDF R&D pour la modélisation et la simulation énergétique du bâtiment. Elle permet de considérer l'influence de la localisation et du contexte urbain environnant sur l'éclairement solaire du bâtiment d'étude (Bouquerel et al. 2021, Plessis et al 2014). Basée sur une architecture modulaire, MyBEM est un chaînage d'outils indépendants qui sont lancés de manière successive et communiquent par échange de fichiers (Figure 1).

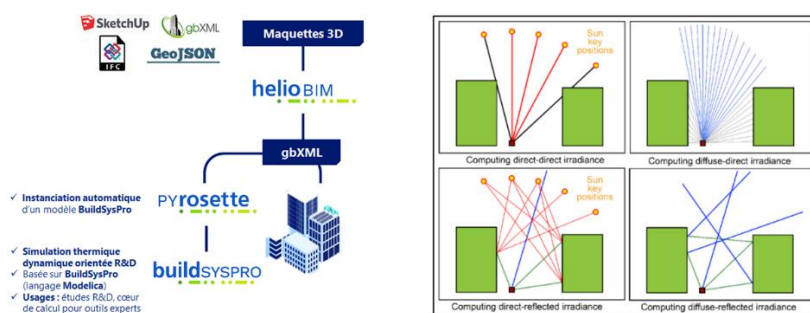


Figure 1 : Workflow MyBEM et composantes de l'éclairement solaire calculées par HelioBIM

L’outil de prétraitement **HelioBIM** permet la génération d’un fichier BIM (Bouquerel et al. 2021). Le logiciel intègre l’édition des composants du bâtiment, des scénarios d’utilisation. Il calcule quatre composantes d’éclairement : Le flux solaire direct sans réflexion et avec des réflexions (direct-direct et direct-réfléchi), et le flux diffus provenant de la voute céleste avec et sans réflexions (diffus-direct et diffus-réfléchi) pour chaque surface d’enveloppe et chaque heure du fichier de données météorologiques annuel (fichiers CSV) à l’aide d’un algorithme de lancer de rayons Monte-Carlo inversé. **Pyrosette**, un package Python d’EDF R&D, permet ensuite le passage du BIM au BEM. Il analyse le gbXML pour obtenir la liste des composants du bâtiment à intégrer dans le BEM puis instancie dans un modèle Modelica chaque composant du bâtiment en tant qu’instance du modèle suivant **BuildSysPro**, bibliothèque Modelica gratuite et open-source pour la modélisation énergétique des bâtiments, et développée par EDF R&D (Plessis et al. 2014). Elle fournit un ensemble de composants élémentaires pour décrire les composants d’enveloppe, les systèmes et dispositifs énergétiques, ainsi que les systèmes de contrôle. Elle est principalement basée sur deux branches de la physique : la modélisation thermique pure et la thermoaéraulique. La manière de modéliser les bâtiments avec BuildSysPro est similaire à des approches couramment utilisées par la communauté scientifique du bâtiment, et les conditions météo font partie des conditions limites.

2.2. COUPLAGE D’UWG ET MYBEM

Le but du couplage est de pallier le problème de précision des prévisions de consommations énergétiques des bâtiments issues de BuildSysPro influencées par le contexte urbain. UWG calcule les valeurs horaires de température et d’humidité de l’air extérieur urbain à partir d’un fichier météo EPW d’une station rurale. UWG utilise pour cela un modèle de canopée urbaine inspiré du modèle TEB (Masson 2000), relié à un modèle de couche limite urbaine simplifié (Bueno, Hidalgo, et al. 2013). Nous avons créé un programme Python pour produire les entrées d’UWG à partir d’un fichier gbXML (format pour HelioBIM). On crée donc automatiquement des typologies de bâtiments personnalisées pour UWG (matériaux, scénarios d’occupation, de chauffage et de climatisation) qui remplacent les typologies existantes d’UWG (constructions type US). Cependant, la correspondance UWG/gbXML n’est pas complète, certains paramètres ne sont pas présents ou explicites dans le gbXML (tableau 1).

	Paramètres géométriques	Paramètres de simulation	Paramètres liés à la physique urbaine	Paramètres de scénario	Total
Paramètres présents dans le gbXML	5	5	13	21	44
Paramètres calculables à partir du gbXML	8	0	1	5	14
Paramètres à renseigner manuellement	7	8	15	3	33
Total	20	13	29	29	91

Tableau 1 : Workflow du couplage MyBEM-UWG

On classe ici les paramètres d’UWG en quatre catégories. Une partie de ces paramètres peut être extraite automatiquement du fichier gbXML (par les propriétés thermiques des bâtiments et), tandis que d’autres doivent être renseignés manuellement (hauteurs de couche limite urbaine par exemple) ou calculés à partir de données d’entrée (Densité de bâtiment, Taux de vitrage, Rapport de surfaces horizontales sur surfaces verticales). Les paramètres de simulation sont des données comme le pas de temps et les paramètres liés à la physique urbaine sont les hauteurs de couche limite, les albédos ou le

flux de chaleur anthropique. La dernière étape du couplage consiste à utiliser dans le BEM les températures d'air et d'humidité calculées par UWG, et les flux solaires calculées par HelioBIM.

3. CAS D'ÉTUDE ET ANALYSE DE SENSIBILITÉ

3.1. COUPLAGE D'UWG ET MYBEM

Le couplage MyBEM-UWG est évalué à l'aide d'un cas d'étude sur le quartier de Monastiraki à Athènes et précisément sur un ensemble de 3 rues canyon parallèles à la rue Ermou. Cette dernière est une des grandes rues principales du centre d'Athènes s'étendant sur plus de 5km (Figure 2).



Figure 2 : Le quartier Monastiraki au-dessus, la rue Ermou et la localisation de la station météo

Le BIM est construit en considérant un unique type de bâtiment, s'apparentant à celui de la Figure 2 (Google StreetView). Les données météorologiques du site sont issues du site d'EnergyPlusTM. Les données rurales proviennent d'une station réelle située à 10km du quartier de Monastiraki (Fig 2). La maquette créée avec Sketchup est traitée par le logiciel de calcul solaire HelioBIM. Les données d'entrée relatives à la thermique des bâtiments (figure 3, à droite), sont issues des bibliothèques BuildSysPro d'EDF, et au-delà des systèmes classiques de CVC, on impose un taux de fermeture des volets de 70% constant en été. Les bâtiments correspondant sont relativement bien isolés (années 1989 à 2000).

Paramètres	Chauffage	Climatisation	Occupation et gains internes	Ventilation
Valeurs	18°C (minuit-7h et 9h-18h) 20°C (le reste du temps) Du 1 janvier au 1 mai Du 1 octobre au 31 décembre	26°C constant en été Du 2 mai au 30 septembre	20% (7h - 18h) 80% (reste du temps) Occupants 70 W / 25 m ² Équipements 2,50 W / m ²	0.5 vol/h constant

Tableau 2 : scénarios des bâtiments du quartier

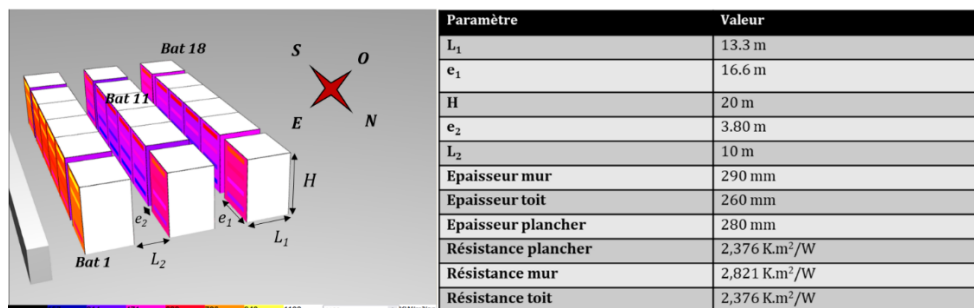


Figure 3 : éclairements solaires (à gauche) et composition (à droite)

On remarque que la position des bâtiments influence les valeurs d'éclairements solaires, ce qui est également traité dans l'analyse de sensibilité de la partie suivante.

Une fois l'ensemble des paramètres renseignés, on lance le module gbXMLtoUWG.py pour une année complète, avec les résultats ici Figure 4 pour le cas d'étude (semaine la plus chaude de l'été).

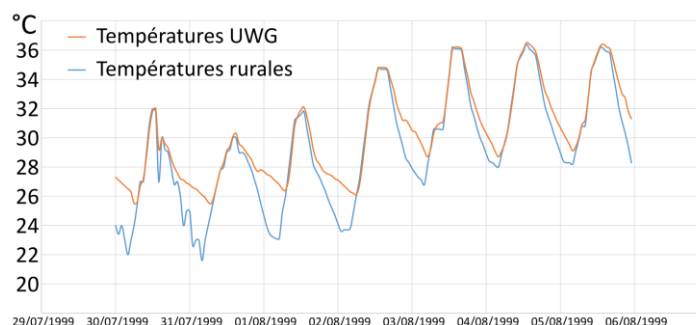


Figure 4 : évolution des températures d'air de référence (rural) et résultats UWG (urbain)

L'effet d'ICU est particulièrement évident la nuit. L'inertie thermique des matériaux urbains, tels que l'asphalte et le béton joue en effet un rôle clé dans la persistance de cet effet (Oke 1982).

3.2. ANALYSE DE SENSIBILITE

3.2.1. Influence du microclimat sur les besoins énergétiques des bâtiments issus du BEM de BuildSysPro

Dans cette partie, on propose de comparer les besoins en chauffage et climatisation de 3 bâtiments différents de notre quartier d'étude (Figure 2) issus de BuildSysPro avec la prise en compte ou non du microclimat urbain (donc avec l'utilisation d'UWG ou non), à la manière de (Salvati et al. 2015) (Tableau 3).

	Heat Bat 1	Heat bat 11	Heat bat 18	Cool Bat 1	Cool Bat 11	Cool Bat 18
Sans UWG	120.6	139.0	125.9	53.1	59.0	68.9
Avec UWG	111.3	127.3	115.6	68.3	74.7	86.0
% d'évolution	-8 %	-8 %	-8 %	29 %	27 %	25 %

Tableau 3 : évolution du besoin de chauffage et climatisation en $kW.h/(m^2.an)$

La demande de chauffage en hiver baisse et la demande de climatisation en été augmente (environ 15% d'augmentation) à cause de l'augmentation des températures d'air. L'orientation des bâtiments joue également sur ces données, le bâtiment 18 orienté sud est plus demandeur en climatisation que le 2 autres en été, ce qui semble cohérent avec sa position dans la rue (Figure 3). Le microclimat impacte fortement les besoins énergétiques annuels, et on notera aussi l'influence de la position des bâtiments sur ces mêmes critères d'évaluation et donc l'importance de prendre en compte de manière la plus précise la localisation des bâtiments et les apports solaires réels sur les bâtiments, ce que notre couplage permet par rapport à d'autres études (Salvati et al. 2015, Palme et al. 2017).

3.2.2. Influence des paramètres d'UWG sur la demande énergétique des bâtiments.

Un point intéressant à observer lorsque l'on évalue des outils de microclimat est la variation moyenne de la température de l'air de la canopée urbaine (canyon équivalent pour UWG) en fonction des paramètres du modèle. Des études ont été menées (Palme et al. 2017; Salvati et al. 2015 ; Bueno, Norford, et al. 2013) et ont montré l'importance des paramètres géométriques et morphologiques du quartier sur les températures d'air extérieur. On reprend ici cette démarche d'analyse de sensibilité, non pas en regardant l'influence des paramètres du modèle de microclimat sur les températures d'air, mais sur les besoins en chauffage et climatisation de notre quartier d'étude, calculés par le BEM. On calcule

le pourcentage de variation sur les demandes énergétiques entre deux simulations UWG en faisant varier les paramètres les plus influents sur les températures d'air déterminés par Bueno dans son étude (Bueno, Norford et al 2013). On peut ainsi mesurer la sensibilité du couplage lorsque les paramètres de la maquette varient de 25% (résultats tableau 2). On fera cette analyse uniquement sur le bâtiment 11, étant donné que la localisation des bâtiments a un impact très faible lorsque les paramètres de la maquette entière sont changés.

	Valeur initiale	Valeur modifiée	Heat bat 11	Cool Bat 11
Albedo route	0.2	0.25	127.3	74.9
% d'évolution			-0.05%	0.21%
Bldg density	0.33	0.42	125.7	75.4
% d'évolution			-1.28%	1.01%
VertoHor	0.61	0.81	122.8	76.9
% d'évolution			-3.57%	2.88%
Hauteur ref	150	187.5	125.8	77.1
% d'évolution			-1.19%	3.13%

Tableau 2 : évolution du besoin de chauffage et climatisation en kW.h/(m².an) en fonction de la variation de 4 paramètres morphologiques ou de simulation

On constate que malgré une variation de 25% sur les 4 paramètres étudiés, l'impact sur les besoins de chauffage et climatisation est assez minime. Cela est le plus remarquable sur l'albédo de la route, où les différences sont négligeables (moins de 1%) mais non surprenantes car l'albédo augmente seulement de 0.05 (de 0.2 à 0.25). Cela est plus étonnant pour la densité de bâtiment et le ratio « VertoHor » (rapport des surfaces verticales sur horizontales) où on pourrait s'attendre à ce qu'une augmentation de ces paramètres impactent de manière plus importante ces valeurs la température d'air extérieur (Bueno, Noford et al 2013). Cependant d'autres études ont montré que la consommation énergétique pouvait varier fortement d'une ville à l'autre malgré des configurations morphologiques similaires (Mostafavi N. et al 2021). Enfin le paramètre H_{ref} , représentant la hauteur de référence à laquelle on suppose les profils de température potentielle constants, semble avoir un impact plus important et notamment en été sur le besoin en climatisation. Cela est assez cohérent avec l'analyse de Bueno (Bueno, Noford et al 2013) où ce paramètre est parmi les influents sur la température d'air extérieur en raison de sa variabilité significative entre différentes zones urbaines. La hauteur de la couche limite urbaine est un autre facteur important de l'ICU, et souvent estimé empiriquement, qui entraîne des imprécisions et/ou instabilités (Martinez et al. 2021; Le Bras et Masson 2015).

4. CONCLUSION ET DISCUSSIONS

Cet article présente la méthodologie et les premiers résultats de travaux de doctorat d'un couplage entre un modèle de microclimat UWG et une plateforme de BIM to BEM (MyBEM), permettant de réaliser des études d'énergétique du bâtiment prenant en compte l'influence du microclimat urbain. La méthode utilisée donne des résultats plausibles et représentatifs de l'impact de l'ICU. L'analyse de sensibilité confirme le rôle non négligeable de la morphologie urbaine, avec ici un effet d'ICU qui entraîne une réduction du besoin de chauffage (20 %), et une augmentation en climatisation (10 %). L'orientation et la position des bâtiments impactent aussi plus finement les résultats.

Ces premiers résultats seront amenés à évoluer au cours des prochaines années, notamment selon les axes suivants :

- Interaction entre le modèle de microclimat et la plateforme et amélioration du couplage actuel asynchrone (échange par fichiers) entre UWG et MyBEM, pour prendre en compte la rétroaction du modèle BEM vers UWG dynamiquement (approche modulaire) ;
- Prise en compte de la 3D à l'intérieur de la zone d'étude pour aller au-delà du modèle de rue canyon en 2D d'UWG, où les contributions de chaque bâtiment sont moyennées. La prise en compte de la morphologie de la zone d'étude est quelque chose que l'on retrouve dans la littérature mais avec des approches nodales ou zonales (Gros et al. 2014; Yao et al. 2011) ;
- Amélioration du/des modèle(s) physique(s), en particulier la couche limite urbaine trop simplifiée (deux états actuellement, jour / nuit) qui entraîne des discontinuités menant à une surévaluation de l'ICU (Martinez et al. 2021). D'autres phénomènes, comme les échanges de chaleur latente et l'impact de la végétation sont également à améliorer. Également, le modèle BuildSysPro, bien que robuste, est encore amené à évoluer (ventilation et surventilation nocturne en été) ;
- Prise en compte de l'influence des quartiers adjacents, avec également un travail sur les modèles d'interactions entre les différents modules et les modèles de microclimat et bâtiment. Certaines études comme celles menées par (Salvati et al. 2015) ou (Afshari 2023) ont montré qu'une approche par zone en utilisant les LCZ ou des zones équivalentes était une piste intéressante et pertinente.

5. BIBLIOGRAPHIE

- Afshari, Afshin. 2023. « Optimization of Urban Design/Retrofit Scenarios Using a Computationally Light Standalone Urban Energy/Climate Model (SUECM) Forced by ERA5 Data ». *Energy and Buildings* 287 (mai): 112991. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.112991>.
- Bouquerel, Mathias, Kevin Ruben Deutz, Benoît Charrier, Thierry Duforestel, Mickael Rousset, Bart Erich, Gerrit-Jan Van Riessen, et Thomas Braun. 2021. « Application of MyBEM, a BIM to BEM Platform, to a Building Renovation Concept with Solar Harvesting Technologies ». In . <https://doi.org/10.26868/25222708.2021.30153>.
- Bozonnet, Emmanuel. 2005. « Impact des microclimats urbains sur la demande énergétique des bâtiments Cas de la rue canyon ». Thèse de doctorat, Université de la Rochelle., <http://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00011115>
- Bueno, B., G. Pigeon, L. K. Norford, K. Zibouche, et C. Marchadier. 2012. « Development and Evaluation of a Building Energy Model Integrated in the TEB Scheme ». *Geoscientific Model Development* 5 (2): 433-48. <https://doi.org/10.5194/gmd-5-433-2012>.
- Bueno, Bruno, Julia Hidalgo, Grégoire Pigeon, Leslie Norford, et Valery Masson. 2013. « Calculation of Air Temperatures above the Urban Canopy Layer from Measurements at a Rural Operational Weather Station ». *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 52 (2): 472-83. .
- Bueno, Bruno, Leslie Norford, Julia Hidalgo, et Grégoire Pigeon. 2013. « The Urban Weather Generator ». *Journal of Building Performance Simulation* 6 (4): 269-81. <https://doi.org/10.1080/19401493.2012.718797>.
- Grimmond, C. S. B., M. Blackett, M. J. Best, J. Barlow, J-J. Baik, S. E. Belcher, S. I. Bohnenstengel, et al. 2010. « The International Urban Energy Balance Models Comparison Project: First Results from

- Phase 1 ». *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 49 (6): 1268-92. <https://doi.org/10.1175/2010JAMC2354.1>.
- Gros, Adrien, Emmanuel Bozonnet, et Christian Inard. 2014. « Cool Materials Impact at District Scale— Coupling Building Energy and Microclimate Models ». *Sustainable Cities and Society* 13 (octobre): 254-66. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2014.02.002>.
- Le Bras, Julien, et Valéry Masson. 2015. « A Fast and Spatialized Urban Weather Generator for Long-Term Urban Studies at the City-Scale ». *Frontiers in Earth Science* 3 (juin). <https://doi.org/10.3389/feart.2015.00027>.
- Mao, Jiachen, Joseph H. Yang, Afshin Afshari, et Leslie K. Norford. 2017. « Global Sensitivity Analysis of an Urban Microclimate System under Uncertainty: Design and Case Study ». *Building and Environment* 124 (novembre): 153-70. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.08.011>.
- Martinez, S., A. Machard, A. Pellegrino, K. Touili, L. Servant, et E. Bozonnet. 2021. « A Practical Approach to the Evaluation of Local Urban Overheating— A Coastal City Case-Study ». *Energy and Buildings* 253 (décembre): 111522. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111522>.
- Masson, Valéry. 2000. « A Physically-Based Scheme For The Urban Energy Budget In Atmospheric Models ». *Boundary-Layer Meteorology* 94 (3): 357-97. <https://doi.org/10.1023/A:1002463829265>.
- Mostafavi N., Heris M., Gándara F., Hoque S. 2021. « The Relationship between Urban Density and Building Energy Consumption ». *Buildings* 11 (10): 455. <https://doi.org/10.3390/buildings11100455>.
- Oke, T. R. 1982. « The Energetic Basis of the Urban Heat Island ». *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 108 (455): 1-24. <https://doi.org/10.1002/qj.49710845502>.
- Palme, M., L. Inostroza, G. Villacreses, Andrea Lobato-Cordero, et C. Carrasco. 2017. « From Urban Climate to Energy Consumption. Enhancing Building Performance Simulation by Including the Urban Heat Island Effect ». *Energy and Buildings* 145 (juin): 107-20. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.03.069>.
- Pérez-Lombard, Luis, José Ortiz, et Christine Pout. 2008. « A Review on Buildings Energy Consumption Information ». *Energy and Buildings* 40 (3): 394-98. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2007.03.007>.
- Plessis, Gilles, Aurelie Kaemmerlen, et Amy Lindsay. 2014. « BuildSysPro: A Modelica Library for Modelling Buildings and Energy Systems ». In , 1161-69. <https://doi.org/10.3384/ecp140961161>.
- Salvati, Agnese, Helena Coch Roura, et Carlo Cecere. s. d. « URBAN MORPHOLOGY AND ENERGY PERFORMANCE: THE DIRECT AND INDIRECT CONTRIBUTION IN MEDITERRANEAN CLIMATE ».
- Santamouris, M. 2014. « On the Energy Impact of Urban Heat Island and Global Warming on Buildings ». *Energy and Buildings* 82 (octobre): 100-113. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.07.022>.
- Yao, Runming, Qing Luo, et Baizhan Li. 2011. « A Simplified Mathematical Model for Urban Microclimate Simulation ». *Building and Environment* 46 (1): 253-65. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.07.019>.

Analyse multi-échelles de l'influence de l'inertie thermique des parois opaques sur la température interne d'un logement

Zineb BOUTAYEB*, Matthieu LABAT, Claire OMS, Stéphane GINESTET

¹ LMDC, Université de Toulouse, INSA, UPS, Toulouse, France
135 Avenue de Rangueil, 31077 Toulouse cedex 04 France,

* boutayeb@insa-toulouse.fr

RESUME

Cet article explore l'optimisation du confort d'été dans les bâtiments résidentiels en mettant l'accent sur les bâtiments à structure bois. Il aborde la question de la faible inertie thermique de ces bâtiments et propose une analyse à différentes échelles. L'étude commence par une analyse des matériaux à prendre en compte, puis se poursuit avec une étude analytique de l'inertie au niveau des murs. Cette étude évalue les effets de différentes compositions de murs soumis à des sollicitations cycliques selon la norme ISO 13786. Ensuite, l'analyse est étendue à un bâtiment "typique" en appliquant différentes excitations dans différents scénarios à l'aide du logiciel Pléiades Comfie. L'objectif est de déterminer l'impact relatif de l'inertie des parois opaques sur l'environnement interne du bâtiment.

MOTS-CLÉS : Inertie, Périodes estivales, Parois légères.

ABSTRACT.

This paper is aimed at optimizing summertime comfort in residential buildings. In particular, it focuses on wood-frame buildings. The analysis is conducted at different scales, starting with an evaluation of the materials to be considered, followed by an analytical study of inertia at the wall level. The study assesses the effects of various wall compositions subjected to cyclic loading in accordance with the standard ISO 13786. The analysis extends to a 'typical' building by applying various excitations in different scenarios using the Pléiades Comfie software. The objective is to determine the relative impact of opaque wall inertia on the internal environment of the building.

KEYWORDS: Thermal inertia, Summer periods, Lightweight walls

1. INTRODUCTION

En raison de l'attention croissante portée aux enjeux environnementaux et énergétiques à l'échelle mondiale, le secteur de la construction s'oriente vers la réduction de la consommation d'énergie et des émissions de gaz à effet de serre. La directive 2018/844 renforce cette tendance en encourageant les pays européens à élaborer des stratégies pour garantir que les nouveaux bâtiments respectent des normes minimales de performance énergétique, tout en promouvant la rénovation à long terme des bâtiments existants pour améliorer leur efficacité énergétique d'ici 2050. Ainsi, la conception de bâtiments à faible empreinte énergétique est devenue une priorité dans le secteur de la construction.

Dans ce contexte, la réglementation française encourage l'adoption de méthodes de construction à faible émission de gaz à effet de serre, ce qui accroît l'intérêt pour la construction en bois et l'emploi de matériaux biosourcés. Cependant, la faible masse du bois lui confère une faible inertie thermique. Cela signifie que ce matériau réagit rapidement aux variations de température extérieure, limitant ainsi les effets de stockage et de déphasage de chaleur qui ont un impact sur le confort thermique en été. De

nombreuses études ont été réalisées afin de comparer les comportements thermiques des bâtiments en fonction de leur inertie thermique. (Di Perna et al. 2011) ont mené une étude in-situ suivie d'une simulation dynamique sur des salles de classe en faisant varier l'inertie thermique de l'enveloppe. Les résultats ont montré que les bâtiments dotés d'une enveloppe à forte inertie étaient en mesure de maintenir des températures plus stables pendant les périodes les plus chaudes (fin mai et début septembre), réduisant ainsi le besoin de refroidissement excessif et améliorant le confort des occupants. Il a été conclu que la meilleure solution consiste à adopter un calendrier adaptatif pour l'ouverture et la fermeture des fenêtres. (Tonelli et Grimaudo 2014) ont testé l'utilisation de matériaux lourds, tels que le sable, pour remplir intégralement une cavité murale dans un prototype de construction en bois à parois sandwich, dans les régions méditerranéennes. Cette approche a donné un indice de masse presque deux fois supérieur à celui d'un mur à ossature traditionnel et donc très proche d'un mur en maçonnerie classique. Ils ont conclu que la combinaison de bois et de matériaux lourds peut présenter des avantages tels qu'une meilleure stabilité de la température intérieure et une réduction des besoins en climatisation.

Cet article vise à évaluer l'influence de l'inertie thermique à l'échelle du matériau, des parois et enfin du local. Une approche analytique est adoptée à l'échelle du matériau et des parois, permettant d'analyser les effets de l'inertie thermique à chaque niveau de granularité. Tout d'abord, une analyse des propriétés thermiques des matériaux constitutifs des parois est réalisée afin de comprendre leur comportement thermique, comprenant leur diffusivité et leur effusivité. Ensuite, une étude est menée sur les performances thermiques des parois opaques multicouches, en tenant compte de leur composition et de leur configuration. Cette étude repose sur la méthode des quadripôles thermiques, notamment utilisée dans la norme ISO 13786. Cette norme permet d'analyser la réponse d'une paroi à des sollicitations thermiques périodiques. Enfin, l'évaluation à l'échelle du local est effectuée en utilisant le logiciel Pléiades COMFIE. Différents scénarios sont proposés afin de mettre en évidence l'impact des apports solaires et leurs interactions avec les parois. Cette approche méthodologique permettra de déterminer l'impact de l'inertie thermique des parois opaques sur les transferts de chaleur, tout en identifiant les facteurs clés à chaque niveau d'analyse.

2. ECHELLE DU MATERIAU

(Jeanjean, Olives, et Py 2013) soulignent l'importance du choix des matériaux dans la construction de bâtiments neufs afin d'améliorer leur efficacité énergétique. Selon les auteurs, les matériaux utilisés doivent être sélectionnés en tenant compte de leur capacité de stockage de chaleur, déterminée par leur masse volumique et leur capacité thermique spécifique, ainsi que de leur conductivité thermique. La combinaison de ces propriétés permet de définir l'inertie de transmission, ou diffusivité thermique, α , qui décrit la vitesse de propagation de la chaleur à travers un matériau. Elles peuvent aussi être combinées pour décrire l'inertie par absorption, ou effusivité thermique b , qui caractérise la capacité d'un matériau à absorber la chaleur.

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho C_p} \quad (1) \quad b = \sqrt{\lambda \times C_p \times \rho} \quad (2)$$

La Figure 1 présente l'évolution de l'effusivité et de la diffusivité en fonction de la masse volumique, pour cinq catégories distinctes de matériaux de construction. Les propriétés thermiques des matériaux étudiés sont issues de la norme ISO 10456.

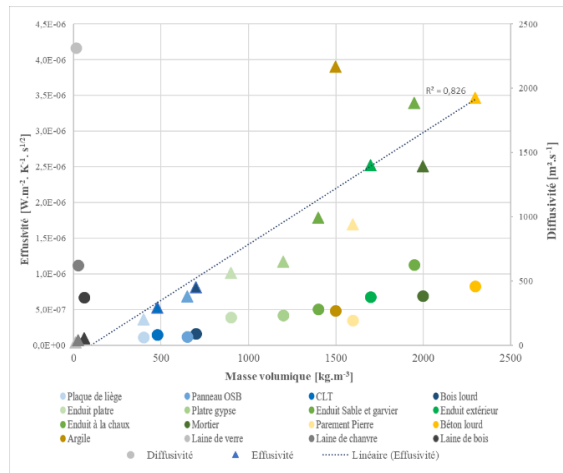


Figure 1 : Catégorisation des matériaux de construction en fonction de leur masse volumique, effusivité et diffusivité

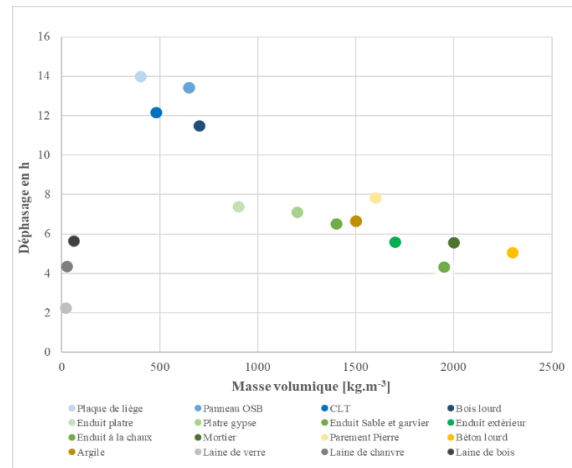


Figure 2: Déphasage en fonction de la masse volumique des matériaux de construction, pour une épaisseur de 20 cm.

Bien que l'effusivité et la diffusivité soient généralement considérées comme des propriétés thermiques indépendantes, la plupart des matériaux peuvent être classés dans deux catégories : ceux ayant une faible effusivité et diffusivité, tels que les isolants (en gris), le bois et les végétaux (en bleu), et ceux avec une effusivité et diffusivité élevées, comme les pierres et les bétons (en jaune) ainsi que les mortiers et les plâtres (en vert). L'argile se distingue par sa combinaison unique d'une faible diffusivité et d'une effusivité élevée. Il est également à noter que l'effusivité est fortement corrélée à la densité du matériau. Un matériau plus dense peut stocker rapidement de grandes quantités de chaleur, limitant ainsi l'augmentation rapide de sa température de surface. Ainsi, l'effusivité revêt une importance capitale dans l'amortissement des variations de température à l'intérieur des bâtiments.

La Figure 2 représente le déphasage D en fonction de la masse volumique pour les mêmes catégories de matériaux. Le déphasage, qui mesure le temps nécessaire à la propagation de la chaleur à travers un matériau, constitue un indicateur de l'impact de la diffusivité thermique.

$$D = \frac{e}{\sqrt{2\alpha\omega}} \quad (3) \quad \text{Où } e \text{ représente l'épaisseur des matériaux et } \omega \text{ est la fréquence angulaire.}$$

Ainsi, une faible masse volumique entraîne un déphasage plus court, tel que constaté avec les isolants. Les mortiers, plâtres, pierres, bétons et l'argile, sont caractérisés par une densité élevée, d'où un déphasage moyen se situant généralement entre 4 et 8 heures. Le bois et ses dérivés se distinguent par un déphasage plus important, généralement compris entre 11 et 14 heures. Cela signifie que la densité moyenne de ces matériaux, associée à leur faible diffusivité, se traduit par une capacité limitée à transmettre rapidement les variations de température.

Dans le contexte des récentes évolutions réglementaires, à travers la RE2020 notamment, nous avons retenu l'argile pour la suite de cette étude en raison de sa nature biosourcée et ses propriétés thermiques uniques. Contrairement aux autres matériaux conventionnels, l'argile présente une combinaison particulière de faible diffusivité et d'effusivité élevée.

3. ECHELLE DE LA PAROI

Tout d'abord, il convient de noter qu'il n'existe pas de consensus pour caractériser précisément l'inertie thermique à l'échelle d'une paroi. Néanmoins, plusieurs paramètres existent, tels que le

déphasage Φ , le facteur d'amortissement f_a et peuvent être estimés analytiquement à l'aide de la méthode présentée dans la norme (NF EN ISO 13786 2017). Elle repose sur la méthode des quadripôles, qui permet de déterminer les propriétés thermiques dynamiques d'une paroi soumise à des variations sinusoïdales de température ou de flux thermique. Plus particulièrement, elle permet d'établir la relation entre l'amplitude du flux de chaleur et de température de part et d'autre la paroi, tout en définissant des propriétés dynamiques de transfert. La relation entre les flux (q_1, q_2) et les températures (θ_1, θ_2) des deux côtés peut être exprimée comme suit (les indices 1 et 2 se référant respectivement au côté interne et au côté externe) :

$$\begin{pmatrix} \widehat{\theta}_2 \\ \widehat{q}_2 \end{pmatrix} = Z \begin{pmatrix} \widehat{\theta}_1 \\ \widehat{q}_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \widehat{\theta}_1 \\ \widehat{q}_1 \end{pmatrix} \quad (4)$$

Le transfert de chaleur se fait en fonction de δ , la profondeur de pénétration périodique de chaque couche, qui se calcule à partir des propriétés thermiques des matériaux et de la période T de l'excitation sinusoïdale, ainsi que du rapport sans dimension ξ représentant le rapport de l'épaisseur d à la profondeur de pénétration δ .

$$\delta = \sqrt{\frac{\lambda T}{\pi \rho c_p}} \quad (5) \quad \xi = \frac{d}{\delta} \quad (6)$$

Les éléments de la matrice sont :

$$\begin{aligned} \mathbf{Z}_{11} &= \mathbf{Z}_{22} = \cosh(\xi) \times \cos(\xi) + j \times \sinh(\xi) \times \sin(\xi) \\ \mathbf{Z}_{12} &= -\frac{\delta}{2\lambda} \times \{ \sinh(\xi) \times \cos(\xi) + \cosh(\xi) \times \sin(\xi) + j [\cosh(\xi) \times \sin(\xi) - \sinh(\xi) \times \cos(\xi)] \} \\ \mathbf{Z}_{21} &= -\frac{\lambda}{\delta} \times \{ \sinh(\xi) \times \cos(\xi) - \cosh(\xi) \times \sin(\xi) + j [\sinh(\xi) \times \cos(\xi) + \cosh(\xi) \times \sin(\xi)] \} \end{aligned}$$

Une paroi étant généralement constituée de plusieurs couches, le calcul de la matrice de transfert global se fait en multipliant les matrices individuelles de chaque couche, en commençant par la couche interne. La matrice Z résultante contient des propriétés thermiques périodiques de la paroi, dont le facteur d'amortissement f_a , le déphasage ϕ et la capacité thermique surfacique K_1 (voir Tableau 1). Le facteur d'amortissement en particulier compare l'amplitude flux transmis à travers la paroi en tenant compte de son inertie au flux qui serait transmis par une paroi purement résistive. Il permet ainsi de déterminer, pour une paroi donnée, la réduction relative du flux due à la masse (une valeur proche de 1 signifiant que l'impact est négligeable).

Tableau 1 : Caractéristiques statiques (U, M_s) et dynamiques (f_a, ϕ et K_1) de différentes parois

	Béton ITE	Béton ITI	Bois CLT	Bois Initial (BI)	Bois modifié (BM)
Description					
Epaisseur (cm)	46,8	46,8	34,8	28,6	33,1
U (W.m⁻². K⁻¹)	0,16				
Masse surfacique (kg.m⁻²)	501	501	98	64	132
f_a	0,15	0,30	0,25	0,77	0,36
ϕ (h)	8,52	7,84	9,17	5,36	9,13
K_1 (kJ.m⁻². K⁻¹)	67,87	12,93	32,73	16,82	70,69

La méthode a été appliquée à différentes typologies de parois, dont le choix repose sur les directives l'Union européenne concernant les systèmes de construction à basse consommation d'énergie, et les normes de construction mises en place en France à partir de 2012. Pour simplifier la comparaison, tous les murs ont le même coefficient de transmission thermique U ($0,16 \text{ W.m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$). Un mur lourd en béton avec isolation thermique par l'extérieur (ITE) a été défini comme cas de référence pour cette étude. Il a été comparé avec un mur en béton avec une isolation intérieure, puis à un mur en bois lamellé-collé (CLT) avec une isolation extérieure comme dans (Rugani et al. 2021). Enfin, un mur en bois provenant du catalogue des constructions bois de la FCBA a été sélectionné pour représenter une paroi légère. Ce même mur a été modifié en intégrant une couche d'argile sur sa face intérieure. Ce choix s'appuie sur les résultats de (Gregory et al. 2008), qui ont démontré que la présence de masse thermique à l'intérieur d'une enveloppe a un impact significatif sur le comportement thermique des systèmes de construction résidentiels.

Concernant le facteur d'amortissement tout d'abord, il est effectivement élevé pour la paroi BI. Cela confirme l'hypothèse de départ qu'un système léger (8 fois moins lourd que le cas de référence) n'apporte que peu d'inertie thermique. Le facteur d'amortissement est cependant du même ordre de grandeur pour les parois CLT et BM que pour les parois bétons. La valeur la plus faible est certes obtenue avec le cas de référence (ITE), mais les résultats restent intéressants pour des parois 4 à 5 fois plus légères.

Concernant le déphasage thermique, là aussi les résultats sont du même ordre de grandeur – et même meilleurs pour les parois CLT et BM, à l'exception de la paroi la plus légère où le temps de déphasage est significativement plus faible. Pour la capacité thermique surfacique intérieure enfin, cette dernière reflète la capacité effective d'accumulation de chaleur à la surface interne d'un élément de construction. C'est une grandeur qui évolue très significativement selon les configurations de paroi car elle tient compte surtout de la dernière couche, côté intérieur. Il est très intéressant de constater que les quelques centimètres d'argile (4,5 cm) ajoutés à la paroi légère permettent d'atteindre la valeur maximale dont l'ordre de grandeur est similaire au cas de référence. Plus généralement, cette modification a eu une influence significative et positive sur toutes les propriétés thermiques périodiques calculées par rapport à la paroi initiale (BI). De fait, elle offre des propriétés théoriques qui paraissent compétitives avec la paroi de référence, mais pour une masse totale significativement plus faible.

4. ECHELLE DU BATIMENT

L'objectif ici est d'évaluer l'influence des parois externes sur les besoins énergétiques d'un logement type. Pour ce faire, le logiciel de simulation thermique dynamique Pléiades Comfie a été utilisé. Un appartement simplifié d'une surface de $92,4 \text{ m}^2$, correspondant à la surface utile moyenne des logements en France selon une étude menée en 2020 par l'INSEE, a été simulé (voir *Figure 3*). L'objectif n'est cependant pas de simuler le comportement réaliste d'un bâtiment mais de prolonger l'étude théorique menée à l'échelle de la paroi, notamment en tenant compte des apports solaires. Aussi, des simplifications similaires à celles effectuées avec la méthode des quadripôles ont été adoptées.

L'étude concerne un étage intermédiaire dont la température intérieure est maintenue à 23 °C , avec les niveaux supérieur et inférieur maintenus à la même température pour garantir une uniformité thermique. Les dalles supérieures et inférieures sont agencées pour minimiser l'inertie interne, c'est-à-dire à éviter tout contact direct entre les couches massives et l'espace étudié, afin de se focaliser sur celle des parois

extérieures. Les fenêtres occupent 1/6 de la surface habitable, conformément à la réglementation française, avec une orientation choisie pour représenter des conditions estivales défavorables. Un renouvellement d'air de 0,6 vol/h est intégré, et les apports internes sont négligés.

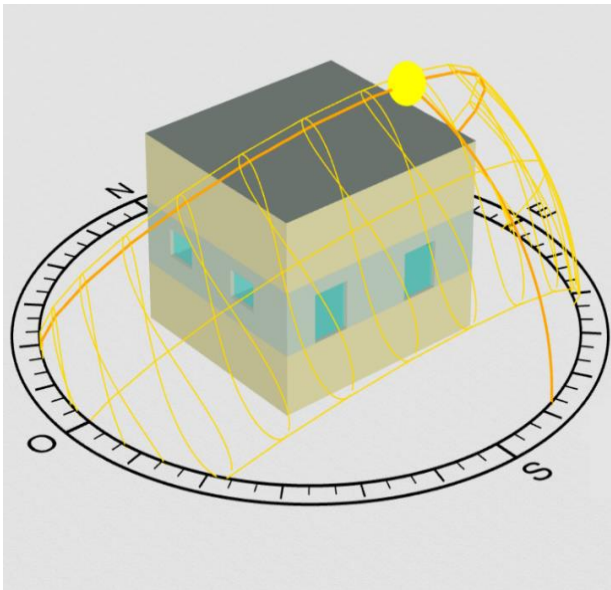


Figure 3: Extrait du prototype de logement simulé à partir de Pléiades Comfie (Zone d'étude en vert)

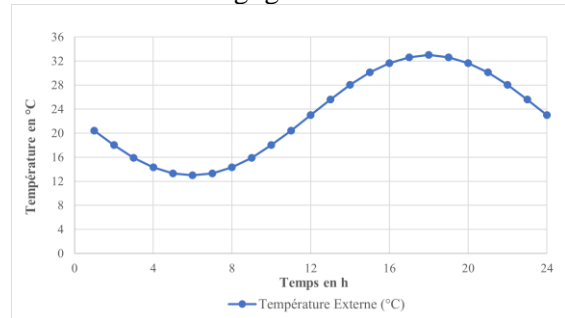


Figure 4: Température extérieure

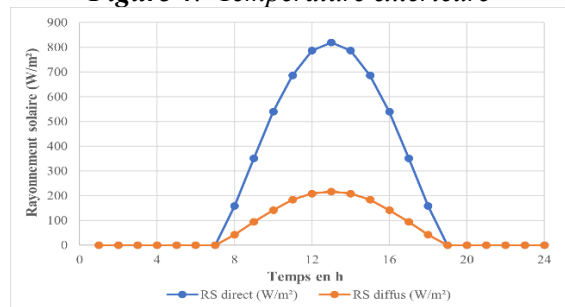


Figure 5: Rayonnement solaire sur un plan horizontal

Les conditions aux limites extérieures sont périodiques et simplifiées. De manière similaire à ce qui a été fait pour l'étude des parois seules, la température extérieure suit une sinusoïde de 23°C de valeur moyenne (Figure 4). Des apports solaires ont été ajoutés, là aussi en suivant un régime périodique. Les valeurs utilisées correspondent à la moyenne du mois de juillet à Toulouse (Figure 5).

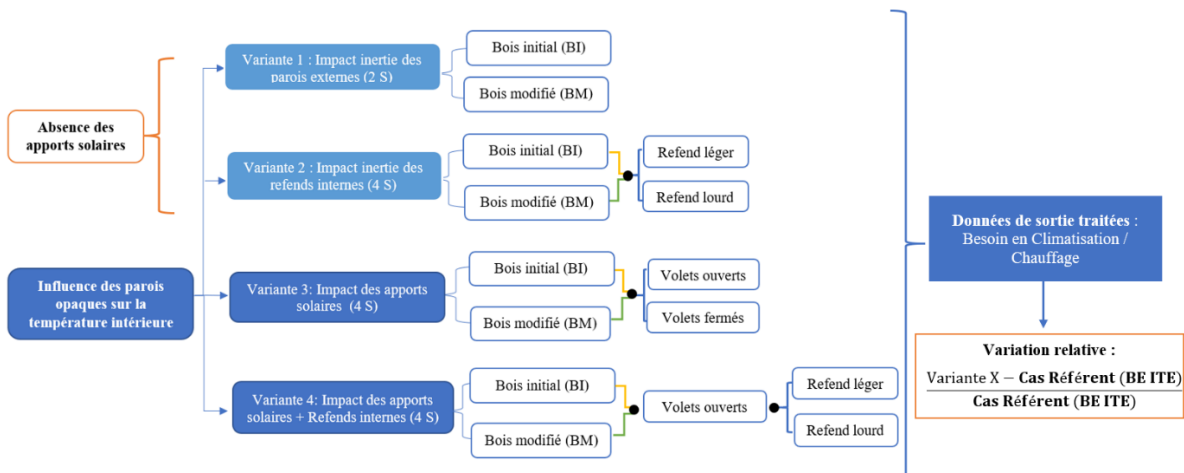


Figure 6 : Variantes d'études simulés à l'aide du logiciel Pléiades Comfie

La paroi prise comme référence est toujours celle en béton ITE, et plusieurs variantes ont été simulées afin d'effectuer une comparaison relative (voir Figure 6). Les variantes 1 et 2 ne tiennent pas compte des apports solaires, ce qui permet d'étudier directement l'effet des parois externes et refends interne. Les deux types de refends internes utilisés se distinguent par leur densité. Le premier, d'une masse surfacique de 298 kg.m², est composé de deux plaques de BA13 et du béton, tandis que le second, plus léger avec une masse surfacique de 33 kg.m², est constitué de deux plaques de BA13 et de la laine de

verre. Les variantes 3 et 4 intègrent les apports solaires, avec des ajustements aux occultations des fenêtres pour évaluer leur impact sur la consommation énergétique.

Les simulations ont enfin été reproduites pour deux consignes de température intérieure : avec une consigne maintenue strictement (23°C) et avec une tolérance ($\pm 1^\circ\text{C}$). Les résultats sont présentés dans le Tableau 1 sous forme de besoins de chauffage de et refroidissement, pour une période de 24h et une fois le régime périodique atteint.

Tableau 2 : Résultats des simulations des différentes variantes étudiés (les variations relatives se rapportent au cas Réfèrent BE ITE)

Cas référent : 23°C		Cas étudiés	Cas 1 : 23°C				Cas 2 : 23 \pm 1
BE ITE			Besoin en froid (kWh)	Variation relative en froid	Besoin en chaud (kWh)	Variation relative en chaud	Variation relative en froid par rapport au Cas référent
Besoin en froid (kWh)	Besoin en chaud (kWh)						
Variante 1 : Sans apports solaires							
-4,94	5,13	Bois initial	-5,95	20%	6,14	20%	NA
		Bois Modifié	-5,31	7%	5,49	7%	NA
Variante 2 : Sans apports solaires + Refend léger							
-5,2	5,39	BI	-5,92	14%	6,11	13%	NA
		BM	-5,27	1%	5,46	1%	NA
Sans apports solaires + (Refend lourd)							
-5,16	5,35	BI	-5,88	14%	6,07	13%	NA
		BM	-5,24	1%	5,42	1%	NA
Variante 3 : Avec apports solaire - Volets ouverts (VO)							
-18,36	2,54	BI	-19,74	8%	3,84	51%	-27%
		BM	-18,71	2%	2,84	12%	-25%
Avec apports solaires - Volets fermés (VF)							
-7,38	4,29	BI	-8,39	14%	5,26	23%	-70%
		BM	-7,61	3%	4,50	5%	-73%
Variante 4 : Avec apports solaires (VO) + Refend léger							
-18,57	2,64	BI	-19,87	7%	3,87	47%	-27%
		BM	-18,88	2%	2,90	10%	-25%
Avec apports solaires (VO) + Refend lourd							
-18,38	2,46	BI	-19,65	7%	3,65	48%	-27%
		BM	-18,70	2%	2,73	11%	-25%

Pour le cas de référence, une réduction minimale, voire négligeable, est constatée lorsqu'un mur de refend est ajouté, qu'il soit lourd ou léger. Cette conclusion est observée tant en présence qu'en absence de gain solaire. Ensuite, pour l'impact des apports solaires, les résultats révèlent une augmentation significative du besoin de climatisation lorsque les volets sont ouverts, doublant ainsi la consommation par rapport à la situation où les volets sont fermés. Cela souligne l'importance de la gestion des apports solaires dans le but de réduire les besoins énergétiques liés à la climatisation.

En ce qui concerne le bois initial, une augmentation de 20 % des besoins en climatisation et chauffage est observée par rapport au cas de référence pour la première variante, qui évalue l'impact des parois externes en l'absence de gain solaire. En revanche, cette augmentation n'est que de 7 % pour le mur en bois modifié. Ces résultats mettent en évidence l'impact direct des différents types de parois sur les besoins en climatisation et chauffage. De plus, il convient de noter que la présence d'un mur refend entraîne une légère réduction de l'ordre de 6 % des besoins de chauffage et de climatisation. Des écarts similaires par rapport au cas de référence sont observés pour les deux parois étudiées, qu'il s'agisse d'un

refend léger ou lourd. En présence d'apports solaires, des écarts plus faibles sont constatés par rapport au cas de référence en termes de climatisation, de 8 à 14 % pour le bois initial, tandis que pour le bois modifié, cet écart se réduit à seulement 3 %. Cela signifie que le bois initial nécessite une charge de refroidissement plus importante en réponse aux apports solaires par rapport au bois modifié, ce qui montre une fois de plus la pertinence du choix d'ajouter une couche d'argile.

Maintenir une température de 23 °C permet de mettre en évidence l'effet de l'inertie sur les différentes parois, bien que cela se déroule principalement dans un cadre théorique. Cependant, autoriser une fluctuation de la température intérieure de ± 1 °C réduit les effets de l'inertie sur les besoins de climatisation, qui sont similaires pour les deux compositions de paroi (bois initial et modifié). Cette remarque reste valable quelle que soit la variante considérée. Néanmoins, il apparaît que c'est dans la configuration avec les volets fermés que les écarts sont les plus importants, avec une réduction de 70% du besoin de froid, illustrant une fois de plus la prévalence de la gestion des apports solaires.

Les différentes comparaisons permettent de confirmer la similitude du comportement dynamique entre le mur en béton ITE et celui en bois modifié, comme déjà prédit par le calcul normatif. Ceci souligne la cohérence de l'approche d'analyse multi-échelles employée tout au long de l'étude.

5. CONCLUSION

Cette étude analyse l'impact de l'inertie thermique des parois sur les besoins internes du bâtiment à différentes échelles. Les matériaux comme l'argile, avec une faible diffusivité et une haute effusivité, offrent des propriétés intéressantes. À l'échelle de la paroi, l'ajout d'un enduit d'argile sur une paroi légère en bois peut restaurer des propriétés thermiques similaires à celles d'une paroi en béton ITE, mais plus légère. Ces résultats ont été confirmés à travers des simulations à l'échelle du local et pour des conditions extérieures simplifiées. Cependant, la gestion des apports solaires et la tolérance sur la gamme de température intérieure apparaissent comme des facteurs déterminants qui influencent de manière beaucoup plus significative les besoins de rafraîchissement. Par conséquent, bien que l'utilisation de matériaux tels que l'argile présente des caractéristiques intéressantes à l'échelle de la paroi, leur impact réel sur les performances énergétiques du bâtiment dépend fortement des conditions extérieures et des exigences de confort intérieur au niveau local.

6. REFERENCES :

- Di Perna, C., F. Stazi, A. Ursini Casalena, et M. D'Orazio. 2011. « Influence of the Internal Inertia of the Building Envelope on Summertime Comfort in Buildings with High Internal Heat Loads ». *Energy and Buildings* 43 (1): 200-206. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.09.007>.
- Gregory, Katherine, Behdad Moghtaderi, Heber Sugo, et Adrian Page. 2008. « Effect of Thermal Mass on the Thermal Performance of Various Australian Residential Construction Systems ». *Energy and Buildings* 40 (4): 459-65. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2007.04.001>.
- Jeanjean, Anaïs, Régis Olives, et Xavier Py. 2013. « Selection Criteria of Thermal Mass Materials for Low-Energy Building Construction Applied to Conventional and Alternative Materials ». *Energy and Buildings* 63 (août): 36-48. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.03.047>.
- NF EN ISO 13786. 2017. « NF EN ISO 13786, Performance thermique des composants de bâtiment Caractéristiques thermiques dynamiques Méthodes de calcul ».
- Tonelli, C., et M. Grimaudo. 2014. « Timber Buildings and Thermal Inertia: Open Scientific Problems for Summer Behavior in Mediterranean Climate ». *Energy and Buildings* 83 (novembre): 89-95. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.12.063>.

Performances des systèmes adiabatiques directs pour des locaux industriels pour différentes localisations en climats futurs

Antoine Breteau*^{1,2}, Patrick Salagnac¹, Jean-Marie Caous², Emmanuel Bozonnet¹

¹ LaSIE (UMR CNRS 7356), La Rochelle Université, Av. M. Crépeau, 17042 La Rochelle, France

² BLUETEK, ZI Nord les Pins, 37230 Luynes, France

*antoine.breteau@univ-lr.fr

RESUME. Cet article propose une analyse des performances d'un système de rafraîchissement adiabatique direct intégré au sein d'un bâtiment industriel. Le système étudié est une solution qui utilise un matériau poreux humidifié pour abaisser la température de l'air sans nécessiter d'énergie externe. Dans cette étude, le système est évalué pour quatre zones climatiques à moyen terme (2040-2060), en utilisant des indicateurs de performance énergétique, de confort thermique et de consommation d'eau. Les résultats révèlent des différences significatives dans le fonctionnement et la performance du système selon les climats étudiés et selon les indicateurs observés.

MOTS-CLÉS : Rafraîchissement passif, rafraîchissement adiabatique, confort

ABSTRACT. This paper presents an analysis of the performance of a direct adiabatic cooling system integrated within an industrial building. The system is a solution that utilizes humidified porous material to lower the air temperature without requiring external energy. In this study, the system is evaluated for four medium-term climate zones (2040–2060), using indicators of energy performance, thermal comfort and water consumption. The results reveal significant differences in system operation and performance according to the climates studied and the indicators observed.

KEYWORDS : Passive cooling, adiabatic cooling, comfort

1. INTRODUCTION

Le changement climatique et les températures extrêmes qui en découlent constituent un défi crucial pour le monde. Le 6^{ème} rapport du GIEC indique que les émissions de GES dues aux activités humaines réchauffent le climat à un rythme élevé (IPCC 2022). Parmi ces activités, les secteurs du bâtiment et industriel représentent respectivement 6 % et 21 % des émissions de GES mondiales (IPCC 2014) notamment en raison de l'utilisation intensive de la climatisation. Cette dernière représente 12 % des émissions des gaz à effet de serre du secteur du bâtiment (PROMEE 2023) en raison de l'utilisation de fluides frigorigènes et de leur forte consommation d'énergie. Pour faire face à l'impact du réchauffement climatique et réduire l'utilisation des climatiseurs, des méthodes de rafraîchissement adiabatique passives se développent.

Le rafraîchissement adiabatique est une technique qui permet de rafraîchir l'intérieur des bâtiments en utilisant l'énergie de l'évaporation de l'eau produite par le passage d'un air sec et chaud au travers

d'un matériau poreux humide. Cette technique peut se décliner en trois familles distinctes : le rafraîchissement adiabatique direct, indirect et hybride.

Le rafraîchissement adiabatique direct permet de refroidir l'air extérieur directement à travers un matériau poreux humide pour ensuite être soufflé au sein d'un bâtiment. La transformation de l'air est isenthalpique (sans apport d'énergie externe sauf celle de la pompe et du ventilateur). Cette typologie de système est plus performante dans les climats chauds et secs (Chiesa et al. 2017). De nombreux articles montrent que les systèmes directs réduisent l'inconfort intérieur des bâtiments (Xuan et al. 2012; Breteau et al. 2022; 2023), mais conduisent à une augmentation de l'humidité intérieure (Pistochini et Modera 2011). En termes de performance énergétique, ces systèmes consomment beaucoup d'eau (Sahai 2012) et d'énergie (Kowalski et Kwiecień 2020) malgré le fait qu'ils consomment moins d'énergie qu'un système de climatisation classique (Ford et al. 1998; McKenzie et al. 2013).

Concernant les autres typologies de système, ils existent les systèmes de rafraîchissement adiabatique indirect qui permettent de rafraîchir l'intérieur des bâtiments sans augmenter l'humidité de l'air. L'air neuf échange ses calories avec l'air repris dans un échangeur sensible avant d'être soufflé dans le bâtiment (Xuan et al. 2012; Gómez, Rey-Martínez, et Tejero-González 2010). De plus, il est possible de combiner des systèmes directs et indirects pour répondre à différents besoins en fonction des conditions intérieures et extérieures et de la régulation du système (PROFEEL 2021).

L'objectif de cet article est d'étudier les performances d'un système de rafraîchissement adiabatique direct intégré à un bâtiment industriel pour différentes localisations en climat futur. Dans un premier temps, le cas d'étude (bâtiment) et le système sont décrits. Par la suite, le comportement du système sera étudié mettant en évidence les différentes phases de fonctionnement. Pour finir, les performances du système seront analysées par le biais de divers indicateurs de performance, de confort, mais aussi de résilience.

2. CAS D'ETUDE

2.1. BATIMENT

Le bâtiment étudié (Figure 1) est un bâtiment industriel de type « entrepôt », constitué d'une structure acier avec une surface au sol de $36 \times 36 \text{ m}^2$ et une hauteur de 8 m.

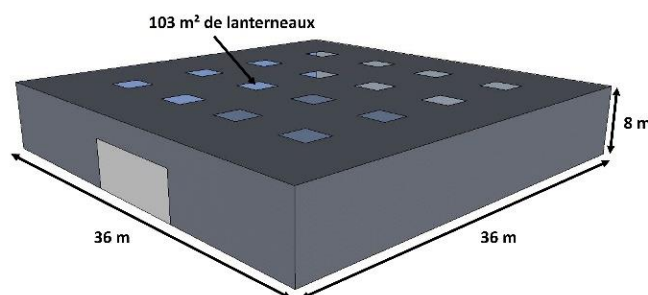


Figure 1 : Bâtiment étudié

Les murs verticaux et la toiture sont constitués de deux bardages en acier de 2 mm d'épaisseur recouvrant une couche de laine de roche de 5 cm d'épaisseur. Le sol est composé d'une dalle béton de 20 cm non isolée. Le bâtiment est équipé de 103 m^2 de lanternes répartis uniformément en toiture (8 % de la surface de toit). Le bâtiment stocke des marchandises (carton, métal et caisse-palette) sur des

étagères métalliques dont l’inertie est considérée comme une masse interne. La perméabilité à l’air du bâtiment est équivalente à $2,6 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ (sous 4 Pa) en l’absence de ventilation. Un débit hygiénique de $45 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{occ}^{-1}$ a été mis en place afin de respecter les normes de ventilation. Une densité d’occupation de $60 \text{ m}^2 \cdot \text{occ}^{-1}$ est considérée. La période d’occupation est de 7 h à 22 h tous les jours sauf le dimanche. Le bâtiment est ventilé et refroidi par un système de rafraîchissement adiabatique direct.

2.2. SYSTEME

Pour cette étude, un modèle numérique simplifié a été développé et intégré au logiciel de simulation thermique des bâtiments (TRNSYS©). Ce modèle s’appuie essentiellement sur l’efficacité de saturation ϵ_{wb} (1).

$$\epsilon = 100 \frac{T_{AE} - T_{AS}}{T_{AE} - T_{wb,AE}} \tag{1}$$

Avec T_{AE} , T_{AS} et $T_{wb,AE}$ respectivement la température de l’air extérieur, de l’air de soufflage et la température de bulbe humide de l’air extérieur.

Le système réduit la température de bulbe sec de l’air extérieur à sa température de l’air de bulbe humide par le biais de l’énergie d’évaporation de l’eau produite au passage de l’air à travers un matériau poreux.

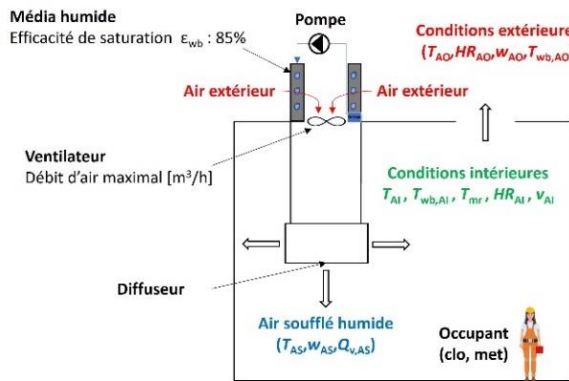


Figure 2 : Système intégré au bâtiment

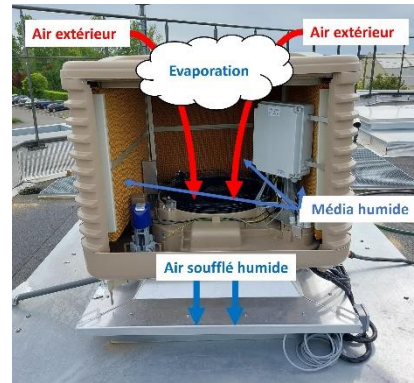


Figure 3 : Système adiabatique

Le système de rafraîchissement adiabatique direct étudié est mis en place sur la toiture du bâtiment (Figure 2). Il est composé d’une pompe à eau, d’un média poreux d’une efficacité de saturation de 85 % et d’un ventilateur avec un débit nominal de $12\,000 \text{ m}^3/\text{h}$ (Figure 3). Ce système fonctionne en mode free-cooling (ventilateur seul) ou en mode adiabatique (avec humidification), aussi bien en période d’occupation que d’inoccupation. Ces deux modes se différencient par des conditions de température intérieure et extérieure qui peuvent être modifiées selon le climat et la typologie du bâtiment (Tableau 1).

	Free-cooling		Adiabatique	
	Intérieur (T_{Ai})	Extérieur (T_{AE})	Intérieur (T_{Ai})	Intérieur (T_{Ai})
Occupation	$> 22^\circ\text{C}$	$< T_{Ai}$	$> 24^\circ\text{C}$	$> T_{wb,AE}$
Inoccupation	$> 19^\circ\text{C}$	$< T_{Ai}$	$> 28^\circ\text{C}$	$> T_{wb,AE}$

Tableau 1 : Conditions de température extérieure et intérieure

La régulation du système fonctionne avec une bande proportionnelle de 2°C qui permet d’ajuster le débit d’air du ventilateur en fonction des conditions de température. Pour le mode free-cooling, la bande

proportionnelle s'applique entre la température intérieure (T_{AI}) et la consigne intérieure ainsi qu'avec la température extérieure (T_{AE}). Pour le mode adiabatique, la bande proportionnelle s'applique entre la température intérieure (T_{AI}) et la température de consigne intérieure, ainsi qu'avec la température de bulbe humide extérieure ($T_{wb,AE}$).

Le dimensionnement du système a été fait en fonction du climat étudié, mais aussi des caractéristiques du bâtiment (volume, enveloppe, apports...). Le bâtiment étudié a un volume de 10 368 m³ et peu d'apports internes (machines, éclairage, occupants et bureautique). Le débit d'air de soufflage du ventilateur a été défini sur la base des valeurs intérieures SET^* obtenues à partir du débit de soufflage en régime permanent. La valeur des 2/3 de cette courbe a été choisie pour définir le débit de soufflage maximal (Tableau 2).

Localisations	Carpentras	Paris	Singapour	AbuDhabi
Débit de soufflage maximal [m ³ /h]	22 000 (2,1 vol/h)	22 000 (2,1 vol/h)	23 000 (2,2 vol/h)	22 000 (2,1 vol/h)

Tableau 2 : Débit de soufflage maximal pour chaque localisation

Le choix des localisations a été fait pour des climats modérés et extrêmes : **Carpentras** (climat méditerranéen chaud et humide), **Paris** (climat continental mixte humide), **AbuDhabi** (climat extrêmement chaud et sec) et **Singapour** (climat extrêmement chaud et humide). Dans ce papier, les fichiers météo produits par l'annexe 80 (Attia et al. 2022) ont été utilisés. Les simulations ont été faites avec une période météorologique caniculaire à moyen terme (2040-2060), pour le scénario d'émissions défavorables.

2.3. INDICATEURS

Dans cet article, différents indicateurs de confort, de performance et de résilience ont été étudiés. Pour évaluer le confort thermohydrique intérieur, les indicateurs T_{op} et SET^* ont été choisis.

La SET^* (Standard Effective Temperature) est une température opérative d'un environnement de référence qui provoquerait les mêmes réponses physiologiques que l'environnement réel. La SET^* est défini comme l'équivalent de la température sèche d'un environnement isotherme à 50 % d'humidité relative où les occupants auraient des vêtements standardisés pour l'activité considérée, qui auraient la même contrainte thermique (température de peau) et la même contrainte thermorégulatrice (humidité de la peau) que dans un environnement de référence (Gagge, Fobelets, et Berglund 1986).

L'inconfort thermo(hydrique) intérieur a été évalué par le nombre de degrés-heures au-dessus de la température limite ($T_{i,lim}$). Les valeurs de $T_{i,lim}$ pour T_{op} et SET^* ont été déterminées par une méthode d'équivalence utilisant l'indicateur PMV (Zare et al. 2018). Nous avons choisi un indicateur PMV égal à 0 (sensation thermique neutre) et les paramètres suivants : $v_{AI} = 0,2$ m/s ; métabolisme 1,4 met ; vêtue 0,5 clo. Selon le diagramme psychométrique de confort (ASHRAE 2013), une température opérative T_{op} de 26°C a une équivalence en SET^* de 28°C.

L'étude de la résilience du système a été faite au travers de l'indicateur α qui permet d'évaluer la résistance d'un bâtiment au changement climatique et le risque de surchauffe associé (2). C'est la pente de régression entre IOD et AWD (Hamdy et al. 2017). IOD est la surchauffe intérieure du bâtiment par

rapport à une température limite ($T_{lim} = 26^{\circ}\text{C}$) et AWD définie la surchauffe extérieure par rapport à une température de base extérieure ($T_b = 26^{\circ}\text{C}$).

$$\alpha = \frac{IOD}{AWD} \quad (2)$$

Si $\alpha < 1$ alors le bâtiment est capable d'éliminer la contrainte thermique externe à long terme et si $\alpha > 1$ alors le bâtiment est incapable d'éliminer la contrainte thermique externe à long terme.

3. RESULTATS ET DISCUSSIONS

3.1. FONCTIONNEMENT

La Figure 4 montre le temps de fonctionnement et la consommation des ventilateurs pour le mode free-cooling (vert) et adiabatique (violet).

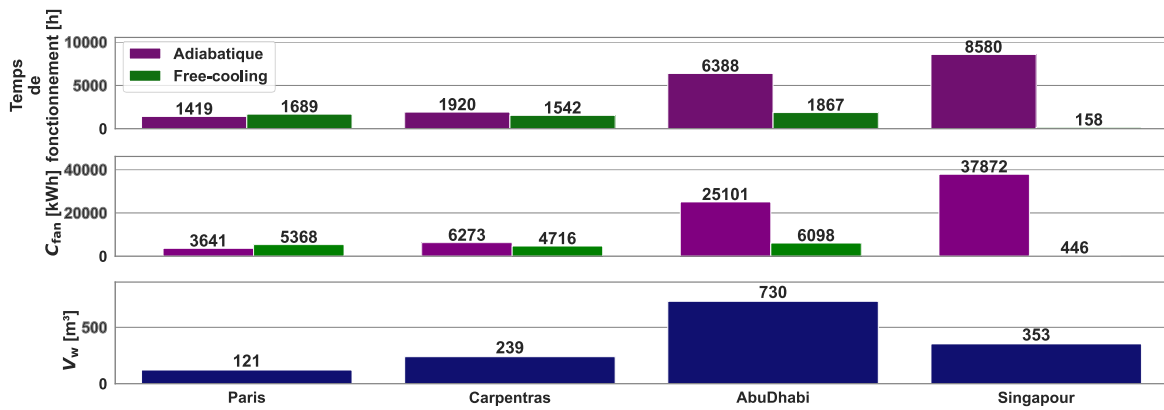


Figure 4 : Temps de fonctionnement et consommation de ventilateur des deux modes (FC et AD)

Le mode adiabatique est le plus fréquemment utilisé, sauf pour le climat de Paris où les conditions extérieures favorisent le fonctionnement du free-cooling. Pour le climat d'AbuDhabi, le mode adiabatique est utilisé trois fois plus souvent (6 388 heures) que le mode free-cooling (1 867 heures), comme en témoigne la consommation annuelle des ventilateurs. Ce phénomène est dû au climat sec à Abu Dhabi. Pour Carpentras, l'échelle de consommation est bien plus réduite : le ventilateur ne consomme que 6 273 kWh en mode adiabatique, soit 1,3 fois plus qu'en free-cooling (4 716 kWh). Les résultats de consommation sont moins importants que pour Abu Dhabi, car le climat de Carpentras est similaire à celui d'AbuDhabi, mais beaucoup moins extrême en température et humidité. Pour le climat de Singapour, plus humide et plus chaud, le mode adiabatique est presque toujours utilisé (98 % du temps de fonctionnement du système) avec une consommation annuelle de 37 872 kWh, contre 446 kWh pour le mode free-cooling.

L'aspect important de ces systèmes est la consommation d'eau. Celle-ci est corrélée au temps passé en mode adiabatique sous tous les climats. On constate que dans les climats arides, le système consomme beaucoup d'eau (730 m³) pour Abu Dhabi, le phénomène d'évaporation de l'eau à travers le média est important. A l'inverse, dans les climats humides (Singapour) la consommation est assez faible (353 m³) par rapport au temps d'utilisation de l'adiabatique. On remarque également que la consommation d'eau du système pour le climat de Carpentras (239 m³) est peu différente à celle de Singapour alors que les conditions climatiques sont plus extrêmes. L'humidité de l'air extérieur réduit l'énergie d'évaporation de l'eau.

3.2. CONFORT

La Figure 5 montre les résultats obtenus de la surchauffe intérieure du bâtiment en termes de SET^* et T_{op} .

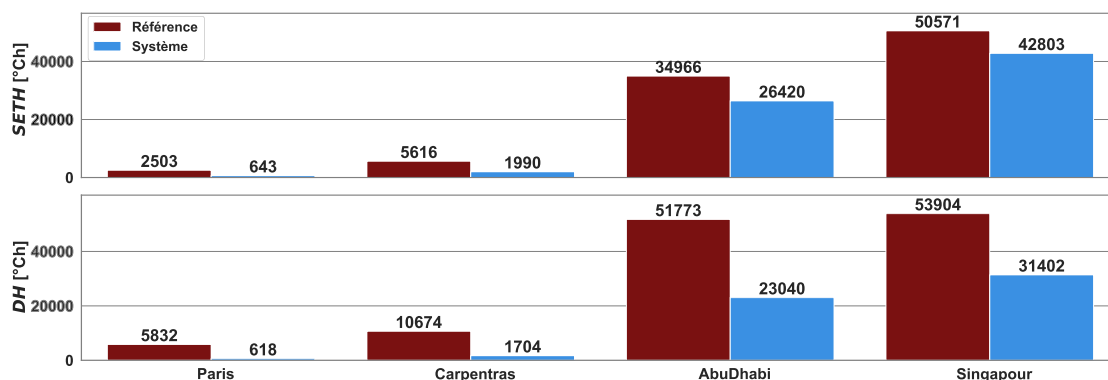


Figure 5 : DH et SETH pour différents climats

Ce graphique montre une tendance similaire pour chaque climat entre les indicateurs DH et $SETH$. Paris est la ville avec le niveau d'inconfort le plus faible, tandis que Singapour est la ville avec le niveau d'inconfort le plus élevé. On observe que la sévérité de l'inconfort est plus importante dans les climats extrêmes (Abu Dhabi et Singapour) par rapport au climat français. On remarque également que l'impact du système sur cet inconfort varie selon les climats. En termes de sévérité DH , le système réduit l'inconfort de 90 % à Paris et de 84 % à Carpentras. Il existe également une différence entre la sévérité en termes de DH et $SETH$; en général, la sévérité est la plus élevée en prenant en compte T_{op} (DH), principalement en raison de la prise en compte de l'humidité relative intérieure dans le calcul du SET^* . Il en résulte une réduction moins significative de l'inconfort par le système lorsque la sévérité est calculée à l'aide du SET^* . En prenant comme exemple la ville de Singapour, la réduction de l'inconfort est de 15 % avec le $SETH$, contre 42 % avec le DH . En termes de sévérité avec le $SETH$, le système permet de réduire la surchauffe au maximum de 74 % à Paris et 65 % à Carpentras.

3.3. PERFORMANCES ET RESILIENCE

Les indicateurs de performance utilisés ($\Delta SETH/V_w$) et ($\Delta SETH/C_{fan}$) sont définis comme la réduction de la surchauffe intérieure ($\Delta SETH$) par rapport à la consommation d'eau (V_w) et par rapport à la consommation énergétique du ventilateur (C_{fan}). Le Tableau 3 montre les résultats des simulations réalisées avec le système en fonctionnement.

	Carpentras	Paris	Abu Dhabi	Singapour
DH [°Ch]	1704	618	23040	31402
$SETH$ [°Ch]	1990	643	26420	42803
$SET^*_{daily\max}$ [°C]	32,2	31,1	41,7	38,2
$\frac{\Delta SETH}{C_{fan}}$ [°Ch/kWh]	0,31	0,19	0,27	0,20
$\frac{\Delta SETH}{V_w}$ [°Ch/L]	15,13	15,31	11,69	21,98
α [-]	0,16	0,17	0,55	1,24

Tableau 3 : Performances du système pour les différents climats

On remarque que les différences entre les conditions extérieures des climats français (Carpentras et Paris), équatorial (Singapour) et subtropical (AbuDhabi) impactent les performances du système et l'inconfort intérieur du bâtiment. Par exemple, le nombre de degrés-heures DH est 14 fois plus élevé entre le climat de Carpentras et celui d'AbuDhabi. La tendance est comparable en ce qui concerne la surchauffe mesurée en SET^* , mais nous observons que celle-ci est plus marquée par rapport aux DH . Cette disparité est particulièrement prononcée dans le climat de Singapour, avec une différence de 36 % entre les DH et $SETH$. La moyenne journalière maximale en occupation ($SET^*_{daily\max}$) est la plus élevée à AbuDhabi (41,7°C). De plus, on note que le gain en $SETH$ par volume d'eau évaporée est le plus important pour le climat de Singapour avec 21,98°C/L, soit 88 % de plus qu'AbuDhabi et 45 % de plus que Carpentras. Cela montre que dans un climat humide, le système réduit davantage l'inconfort intérieur en consommant le moins d'eau possible. En regardant le gain en degrés-heures par rapport à la consommation des ventilateurs, le climat de Carpentras (0,31°C/kWh) est plus adapté avant celui d'AbuDhabi (0,27°C/kWh). Pour les climats arides, le système contribue à réduire l'inconfort intérieur avec une consommation d'énergie minimale du ventilateur. Pour finir, nous remarquons que pour seul le climat de Singapour, le système n'arrive pas à éliminer la contrainte thermique externe ($\alpha > 1$).

4. CONCLUSION

L'objectif de cette étude était d'évaluer les performances et la résilience d'un système de rafraîchissement adiabatique direct intégré à un bâtiment industriel pour différents climats. Les premiers résultats montrent que le système fonctionne le plus souvent en mode adiabatique pour les climats aux conditions extrêmes. A contrario, pour le climat continental, le mode free-cooling est le plus utilisé. De plus, pour une même utilisation du mode adiabatique, le système consomme moins d'eau dans les climats humides. La réduction de la surchauffe intérieure ($SETH$ et DH) est la plus importante dans les climats méditerranéens et continentaux. Cependant, le climat de Singapour est le plus adapté en ce qui concerne la réduction de la surchauffe intérieure par rapport au volume d'eau évaporé. Pour ces climats humides, une énergie d'évaporation de l'eau importante n'est pas nécessaire pour réduire l'inconfort. De plus, lorsqu'on rapporte la réduction de l'inconfort à la consommation énergétique de ventilateur, le système est le plus performant pour les climats arides. Pour finir, le système ne permet pas d'éliminer la contrainte thermique externe pour le climat de Singapour. Pour conclure, sur le moyen terme, le système se révèle plus performant dans les climats continentaux et méditerranéens lors de périodes de chaleur intense. De plus, le système est résilient pour tous les climats sauf celui de Singapour.

5. BIBLIOGRAPHIE

- ASHRAE. 2013. « ANSI/ASHRAE Standard 55-2013 ».
- Attia, Shady, Peter Holzer, Shabnam Homaei, Ongun Berk Kazanci, Chen Zhang, et Per Heiselberg. 2022. « Resilient Cooling in Buildings – A Review of Definitions and Evaluation Methodologies ». *CLIMA 2022 Conference*, mai. <https://doi.org/10.34641/clima.2022.195>.
- Breteau, Antoine, Patrick Salagnac, Emmanuel Bozonnet, Mathieu Carage, et Jean-Marie Caous. 2022. « Evaluation des performances énergétiques d'un système de rafraîchissement adiabatique intégré au sein d'un bâtiment industriel ». In *Colloque International Franco-Québécois en Energie Ville et Transition face aux défis climatiques et énergétiques*, 164-69. Ville et Transition face aux défis climatiques et énergétiques. Paris, France. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03718248>.

- Breteau, Antoine, Patrick Salagnac, Emmanuel Bozonnet, Mathieu Carage, et Jean-Marie Caous. 2023. « Comparaison d'indicateurs dans l'analyse du confort intérieur d'un bâtiment industriel équipé d'un système de rafraîchissement adiabatique direct ». In *31ème Congrès Français de la Société Française de Thermique "Thermique et Agroressources"*, 127. Reims, France: Société Française de Thermique. <https://doi.org/10.25855/SFT2023-127>.
- Chiesa, Giacomo, Nora Huberman, David Pearlmutter, et Mario Grosso. 2017. « Summer Discomfort Reduction by Direct Evaporative Cooling in Southern Mediterranean Areas ». *Energy Procedia*, 8th International Conference on Sustainability in Energy and Buildings, SEB-16, 11-13 September 2016, Turin, Italy, 111 (mars): 588-98. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.221>.
- Ford, Brian, Nimish Patel, Parul Zaveri, et Mark Hewitt. 1998. « Cooling without Air Conditioning: The Torrent Research Centre, Ahmedabad, India ». *Renewable Energy*, Renewable Energy Efficiency, Policy and the Environment, 15 (1): 177-82. [https://doi.org/10.1016/S0960-1481\(98\)00150-5](https://doi.org/10.1016/S0960-1481(98)00150-5).
- Gagge, A., A. Fobelets, et L. Berglund. 1986. « A standard predictive index of human response to the thermal environment ». *Ashrae Transactions* 92 (1): 709-31.
- Gómez, Eloy, F. Javier Rey-Martínez, et Ana Tejero-González. 2010. « The phenomenon of evaporative cooling from a humid surface as an alternative method for air-conditioning ». *International Journal of Energy and Environment* 1 (janvier).
- Hamdy, Mohamed, Salvatore Carlucci, Pieter-Jan Hoes, et Jan L. M. Hensen. 2017. « The Impact of Climate Change on the Overheating Risk in Dwellings—A Dutch Case Study ». *Building and Environment* 122 (septembre): 307-23. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.06.031>.
- IPCC. 2022. « AR6 Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change — IPCC ». 2022. <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-working-group-3/>.
- IPCC, 2014. 2014. « AR5 Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change — IPCC ». 2014. <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg3/>.
- Kowalski, Piotr, et Dariusz Kwiecień. 2020. « Evaluation of Simple Evaporative Cooling Systems in an Industrial Building in Poland ». *Journal of Building Engineering* 32 (novembre). <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101555>.
- Mckenzie, Erica, Theresa Pistoichini, Frank Loge, et Mark Modera. 2013. « An investigation of coupling evaporative cooling and decentralized graywater treatment in the residential sector ». *Building and Environment* 68 (octobre): 215-24. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.07.007>.
- Pistoichini, Theresa, et Mark Modera. 2011. « Water-use efficiency for alternative cooling technologies in arid climates ». *Lancet* 43 (février): 631-38. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.11.004>.
- PROFEEL. 2021. « Les solutions de rafraîchissement adiabatique dans les bâtiments tertiaires en rénovation ». *Profeel* (blog). 2021. <https://programmeprofeel.fr/ressources/guide-les-solutions-de-rafraichissement-adiabatique-dans-les-batiments-tertiaires-en-renovation/>.
- PROMEE. 2023. « La climatisation représente 5% des émissions de CO2 du bâtiment ». Promée. 2023. <http://promée.fr/actualites/conseils/la-climatisation-represente-5-des-emissions-de-co2-du-batiment>.
- Sahai, Rashmi. 2012. « Addressing Water Consumption of Evaporative Coolers with Greywater », juillet. <https://escholarship.org/uc/item/6gz5q7mx>.
- Xuan, Y. M., F. Xiao, X. F. Niu, X. Huang, et S. W. Wang. 2012. « Research and Application of Evaporative Cooling in China: A Review (I) – Research ». *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16 (5): 3535-46. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.01.052>.
- Zare, Sajad, Naser Hasheminejad, Hossein Elahi Shirvan, Rasoul Hemmatjo, Keyvan Sarebanzadeh, et Saeid Ahmadi. 2018. « Comparing Universal Thermal Climate Index (UTCI) with Selected Thermal Indices/Environmental Parameters during 12 Months of the Year ». *Weather and Climate Extremes* 19 (mars): 49-57. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2018.01.004>.

Étude du potentiel de rafraîchissement d'un quartier méditerranéen par ventilation naturelle avec un modèle couplé de microclimat et de bâtiment multizone

Alexandre Bryk*^{1,2}, Emmanuel Bozonnet², Georgios Kyriakodis¹, Peter Riederer¹

¹ Centre Scientifique et Technique du Bâtiment Sophia CSTB
290 Rte des Lucioles, 06904 Sophia Antipolis,

²Laboratoire des Sciences de l'Ingénieur pour l'Environnement LaSIE
Avenue Michel Crépeau, 17042 La Rochelle

*alexandre.bryk@cstb.fr

RESUME. On étudie l'efficacité de la ventilation naturelle des bâtiments dans un contexte urbain sur le confort thermique intérieure. On couple un modèle de ventilation de bâtiment avec des modèles de microclimat urbain et de thermique de bâtiment. Les pressions sur les façades dues au vent ainsi que l'effet de tirage thermique sont pris en compte pour le calcul de ventilation. Le cas d'étude consiste en une configuration d'îlot de bâtiments représentatif déterminé à partir d'un quartier réel de la ville de Nice. Une analyse du confort étage par étage, par orientation des façades et par scénario de ventilation met en évidence les logements les plus favorables à l'utilisation de la ventilation naturelle dans un contexte urbain.

MOTS-CLÉS : Rafraîchissement passif, Microclimat urbain, Ventilation des bâtiments.

ABSTRACT. We study the potential of the natural ventilation of buildings in an urban context on the indoor thermal comfort. We couple a building ventilation model with an urban microclimate and building thermal models. The ventilation model takes into account facade pressures and buoyancy. The case study consists of representative building blocks based on a real neighborhood located in the city of Nice. A floor-by-floor comfort analysis, by facade orientation and ventilation scenario, highlights the most favorable dwellings for the use of natural ventilation in an urban context.

KEYWORDS: Passive cooling, Urban Microclimate, Building Ventilation.

1. INTRODUCTION

Les centres villes sont soumis à des conditions thermiques difficiles dû à la présence de l'îlot de chaleur urbain. Spécifiquement les villes méditerranéennes où la température et l'humidité peuvent rester élevées même de nuit. Une solution de rafraîchissement passif des bâtiments en période estivale est la ventilation naturelle. Elle présente l'avantage de ne pas consommer d'énergie et d'être accessible au plus grand nombre. En milieu urbain le potentiel de rafraîchissement des bâtiments est réduit par rapport au milieu rural environnant dû à une rugosité du terrain plus importante (Oke et al. 2017). L'interaction avec le microclimat est rarement prise en compte lors de l'évaluation du rafraîchissement des bâtiments et cette dernière permettrait de déterminer les logements favorables pour la ventilation naturelle. Une étude par Salvati et Kolokotroni 2023 propose un chaînage d'outils pour tenir compte des conditions locales en température et pression autour des bâtiments en comparant les renouvellements d'air et les températures opératives avec et sans obstacles. Les résultats de simulation obtenues à partir

du modèle de microclimat EnviMet sont utilisés comme conditions limites du modèle de ventilation naturelle nodal d'EnergyPlus. La réduction de la température opérative atteint au maximum 2.8°C dans un des logements étudiés. Leur modélisation ne tient pas compte de la rétroaction du bâtiment sur le microclimat. Une étude par Yuan et al. 2022 propose un couplage aéraulique complet entre l'intérieur et l'extérieur afin d'évaluer l'effet provoqué par le rejet de la chaleur de la climatisation à l'extérieur d'un immeuble sur la température d'air intérieur de certains logements ventilés naturellement. Les températures d'air des logements augmentent en moyenne de 0.2°C à 1.1°C . Leur approche numériquement coûteuse permet d'étudier cet effet que pour des conditions climatiques limitées où seul le transfert thermique par convection entre l'intérieur et l'extérieur est modélisé.

La modélisation proposée dans cet article propose un couplage unidirectionnel entre un modèle de microclimat et un modèle aéraulique de bâtiments nodal et un couplage bidirectionnel entre ce dernier et un modèle thermique de bâtiment nodal. Il permet de tenir compte de l'effet du microclimat sur les conditions limites du modèle aéraulique de bâtiment et de la ventilation du logement pour une simulation mensuelle à pas de temps horaire. L'efficacité de la ventilation naturelle sur le confort intérieur est évaluée sur un îlot de bâtiment représentatif d'un quartier de la ville de Nice déterminé à partir de bases de données spatiales.

2. METHODOLOGIE

Dans un premier temps, on expose la construction du cas d'étude de quartier représentatif à Nice. Ensuite on rappelle le modèle couplé microclimat/bâtiments utilisé avec l'ajout d'éléments de ventilation des bâtiments et les couplages réalisés, avec les des données d'entrées nécessaires pour le modèle. Enfin on donne les configurations de ventilation des logements avec la loi d'ouverture des fenêtres choisie.

2.1. CAS D'ETUDE D'UN ILOT URBAIN TYPIQUE DE LA VILLE DE NICE

Le quartier étudié se situe à Nice (voir Figure 1 à gauche) et couvre une surface de $1,89 \text{ km}^2$. Déterminer un quartier représentatif permet de ne pas à avoir à simuler toute la surface et d'obtenir des conclusions sur tout le périmètre d'étude. De plus, la classification des zones climatiques locales (Stewart et Oke 2012) ne donne pas une géométrie précise nécessaire pour une simulation microclimatique détaillée. Pour cela, nous proposons une méthodologie pour déterminer une configuration d'îlot de bâtiments représentatif d'un quartier réel.

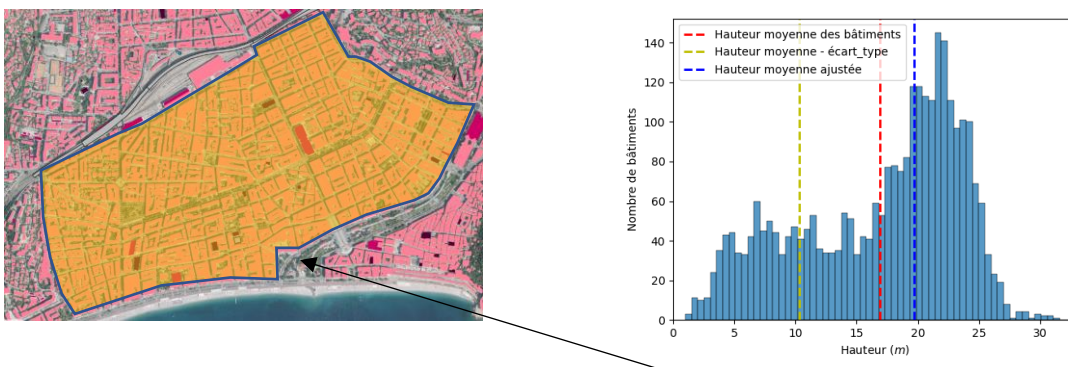


Figure 1 - Vue satellitaire du quartier de Nice étudié en jaune (à gauche) et distribution de la hauteur des bâtiments (à droite)

2.1.1. Détermination de la géométrie d'une maquette représentative d'un quartier réel

La configuration des îlots de bâtiments identifié est de type cour intérieure. Le quartier simplifié envisagé est de type 3x3 îlots identiques afin d'avoir des conditions limites réalistes pour l'îlot central. La géométrie d'un îlot représentatif est déterminée à partir de la géométrie des bâtiments réels du quartier donné Figure 1. Les propriétés utilisées sont la hauteur des bâtiments H et La surface des îlots $S_{\text{îlots}}$ issues de la BD TOPO.

Sur la Figure 1 on trace la fréquence de la hauteur de bâtiments du quartier (barre rouge). On remarque une tendance de fréquence de bâtiment inférieur/supérieur à 17m. Les îlots réels ont une cour intérieure souvent occupé par des bâtiments de taille inférieure aux bâtiments adjacents à la rue. Pour le modèle, on ne tient pas compte des bâtiments à l'intérieur des cours en supprimant les bâtiments de moins de 10m (barre jaune Figure 1) pour déterminer la hauteur et la surface moyenne de la cour intérieure du modèle. On obtient une hauteur moyenne pour le modèle de 19,7 m (barre bleue Figure 1) arrondie à 7 niveaux de 3m chacun.

On note $L_{\text{bat-bat}}$ la distance séparant deux bâtiments du modèle. Elle est déterminée à partir des propriétés du quartier réel (surface totale du quartier S_{total} (surface jaune Figure 1 à gauche), surface de l'ensemble des îlots $S_{\text{îlots}}$ et la longueur totale des rues L_{rues} égale à la somme des longueurs de toutes les rues).

En supposant une géométrie de type canyon, la distance inter bâtiments est donnée par :

$$L_{\text{bat-bat}} = \frac{S_{\text{rues}}}{L_{\text{rues}}} = \frac{S_{\text{total}} - S_{\text{îlots}}}{L_{\text{rues}}} \quad (1)$$

Le quartier déterminé est donné Figure 2 en représentant les maillages surfacique et zonal.

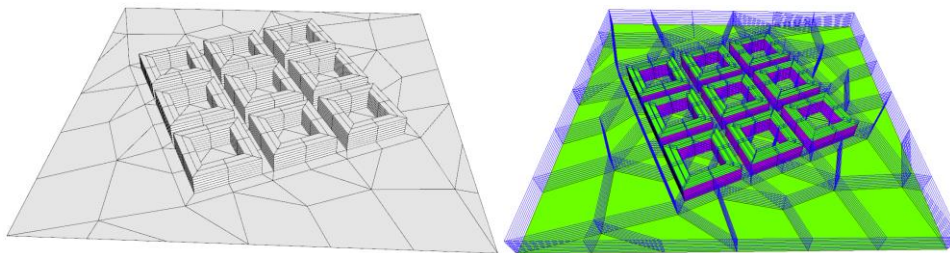


Figure 2 - Maillages surfacique (à gauche) et zonale (à droite) du quartier simplifié

La scène urbaine est constituée 2313 faces, 1008 logements au total (112 par îlot) et 1665 mailles extérieures. Cette configuration permet d'avoir des champs réalistes en vitesse de vent, les masques solaires et les échange grande longueur d'onde pour l'îlot central. Les îlots environnants ont des masques solaires adjacents identiques non représentés ici.

2.1.2. Détermination des propriétés thermiques et optiques

Les propriétés thermiques sont déterminées à partir de la base de données nationale des bâtiments (BDNB). Les propriétés thermiques des bâtiments du quartier réel Figure 1 sont utilisées pour déterminer des propriétés du modèle Figure 2. En fonction de la propriété, on pondère les valeurs pour chaque bâtiment par l'empreinte au sol ou par la surface des façades du bâtiment. Les paramètres d'entrées de la simulation sont donnés dans le *Tableau 1*. Le coefficient convectif extérieur est calculé à partir de la formule $h_{c,\text{ext}} = 5,7 + 3,8U$ (Palyvos 2008) où U est la vitesse moyenne du vent météorologique de référence sur la période simulée.

Taux de vitrage	U_{vitrage} (W/m ² /K)	Epaisseur murs	Isolation	Réflectivité				Coefficient de convection (W/m ² /K)	
				ρ_{toits}	ρ_{rue}	$\rho_{\text{façades}}$	ρ_{vitres}	$h_{c,\text{ext}}$	$h_{c,\text{int}}$
28%	3,0	40 cm	Non isolé	0,18	0,15	0,5	0,15	12,8	3,3

Tableau 1 - Propriétés géométriques, thermiques et optiques de l'enveloppe des bâtiments

2.1.3. Climat de la ville de Nice sur la période étudiée

Les principales variables météorologiques de ville de Nice durant la période de juillet 2022 sont données Figure 3. La température d'air de nuit supérieure à 23°C tout le mois dépasse régulièrement le seuil caniculaire nocturne de 24°C (Laaidi et al. 2012), en dépassant trois fois le seuil caniculaire diurne de 31°C. De plus, l'humidité relative se situe régulièrement à 60-70% de jour et de nuit. Le vent provient principalement du Nord-Ouest de nuit et des autres directions la journée et correspond à l'orientation des rues de la maquette (voir Figure 2).

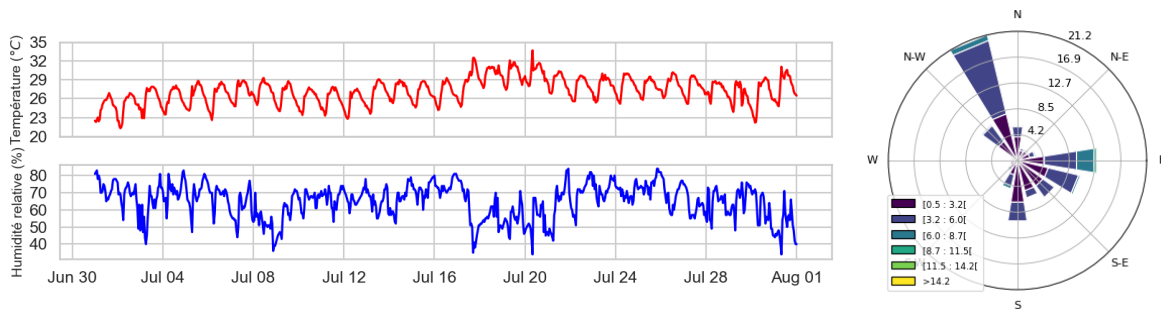


Figure 3 - Température d'air, humidité relative et rose des vents à la station météorologique de l'aéroport Nice-Côte d'Azur du mois de juillet 2022 (Données Météo France, s. d.)

2.2. MODELE COUPLE DE MICROCLIMAT, DE VENTILATION NATURELLE ET CONDITIONS LIMITES AERAULIQUES

L'étude est réalisée à partir d'un modèle de microclimat urbain couplé entre le modèle de microclimat EnviBatE (Gros 2013) et le modèle d'énergétique à l'échelle urbaine Dimosim (Garreau et al. 2021). Le couplage est donné dans (Kyriakodis 2020). Le modèle calcule les températures d'air T_{air} et de surfaces T_s intérieures et extérieures et le besoin des bâtiments en énergie en tenant compte :

- Des rayonnements solaires direct, diffus et réfléchis entre les parois
- Des échanges par grande longueur d'onde entre les parois et vers le ciel
- De la conduction dans les parois avec leur inertie
- De la convection des surfaces intérieures et extérieures
- Du flux thermique des systèmes vers l'environnement extérieur

2.2.1. Modèle de ventilation et données d'entrées du modèle

Face à la limitation du modèle de ventilation dans Dimosim, on propose un couplage entre le modèle de microclimat et le modèle de ventilation MATHIS (François). Le modèle consiste en une approche nodale de l'équation de conservation de masse d'air du local i afin de déterminer la pression au sol de la zone P et les débits d'air $q_{m,j}$ à travers les ouvertures j :

$$V_i \frac{d\rho_i}{dt} = \sum_j q_{m,j} \quad (2)$$

Où $q_{m,j}$ s'écrit en fonction de la différence de pression de part et d'autre de l'ouverture j . Les conditions limites en pression sont obtenues à partir des coefficients de pression c_p définis par :

$$c_p = \frac{P_{façade} - P_{ref}}{\frac{\rho_{ref} U_{ref}^2}{2}} \quad (3)$$

Où $P_{façade}$ est la pression de l'air exercée sur la façade, P_{ref} est la pression de référence, U_{ref} la vitesse de référence en condition limite du domaine de calcul à 10m de haut.

2.2.2. Détermination des coefficients de pression et condition limite aérauliques

Le logiciel QUICURB (Singh et al. 2008) permet de calculer le champ de vitesse à l'extérieur des bâtiments. Pour cette étude les c_p sont obtenus à partir d'une simulation OpenFoam (Jasak, Jemcov, et Tukovi' 2007) puisque QUICURB ne fournit pas de c_p . L'approche est de type RANS (Reynolds Averaged Navier Stokes) en régime stationnaire incompressible isotherme, avec un modèle de turbulence k- ϵ réalizable. Les directions de vent simulées sont 0°, 20°, 40°, 60°, 80°, les autres directions sont obtenues par symétrie de la maquette. Les coefficients de pression obtenus sont moyennés selon le maillage surfacique de la Figure 2.

Le profil de vent utilisé pour le calcul OpenFoam utilisé est basé sur les profils de vent (AFNOR 2008). Le profil de vent utilisé dans QUIC est $V_{QU}(z) = U_{ref} \times \ln((z + z_{0,QU}) / z_{0,QU}) / \ln((z_{ref} + z_{0,QU}) / z_{0,QU})$, avec $U_{ref} = k_r \times \ln(z/z_0) \times V_{météo}$, $V_{météo}$ la vitesse mesurée à la station météorologique à 10m de hauteur et $z_{0,QU} = 1,7m$ est la rugosité déterminée à partir du profil Eurocode, z est l'altitude, z_0 est la longueur de rugosité du site ici égale à 1 correspondant à des zones urbaines, $V_{b,0}$ est la vitesse de vent à la station météorologique et $k_r = 0,19 (z_0/z_0, II)^{0,07}$ avec $z_{0,II} = 0,05m$ la rugosité de la station météorologique. La comparaison entre les deux profils de vitesse est donnée Figure 4.

Enfin, la convection naturelle (buoyancy) extérieure n'est pas prise en compte dans le modèle aéraulique extérieur. La vitesse météorologique extérieure est minorée à 1m/s afin d'éviter une vitesse de vent trop faible provoquant une surchauffe extérieure élevée.

2.2.3. Couplage des modèles de thermique et aéraulique du logement avec le modèle de microclimat

Le couplage des modèles de zone thermique de Dimosim et aéraulique de Mathis est basé sur l'échange de la température d'air T_i vers Mathis et du débit d'air q_m vers Dimosim. Le critère de convergence du couplage est la variation absolue des températures de la zone thermique, fixée à 0,01°C entre deux itérations successives. Un facteur de relaxation permet d'éviter des oscillations sur la température d'air des locaux (Weber et al. 2003) provoqués par des débits entre locaux variables à chaque itération.

Dans le modèle de microclimat, la température d'air est calculée dans chaque zone extérieure (voir Figure 2 à droite). Le couplage entre EnviBatE et Mathis consiste à imposer la température d'air extérieur T_{ext} dans l'ouverture correspondante dans Mathis. Le couplage vers EnviBatE reste inchangé : le débit d'air sortant du logement n'est pas pris en compte dans cette étude.

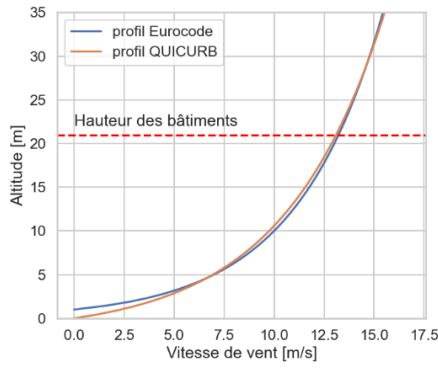


Figure 4 - Comparaison des profils Eurocode et QUIC pour une vitesse de référence de 10m/s à 10m d'altitude

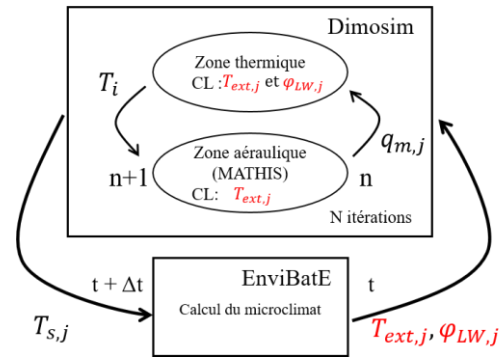


Figure 5 - Couplages entre le modèle de microclimat EnviBatE, le modèle de bâtiment de Dimosim et le modèle aéraulique de MATHIS

2.3. CONFIGURATIONS DE VENTILATION DES LOGEMENTS ET OUVERTURE DES FENETRES

Le découpage des bâtiments en zone thermo-aérauliques permet de considérer de considérer deux configurations de ventilation par orientation: traversant et mono-exposé, dont la configuration pour l'îlot central est donnée Figure 6. L'ouverture des fenêtres donnée Figure 7 est déterminée en fonction des températures d'air intérieure/extérieure adjacentes avec une température d'ouverture intérieure fixée à 28°C.

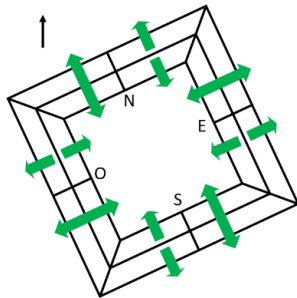


Figure 6 - Configuration des logements traversant - non traversant et orientation des bâtiments

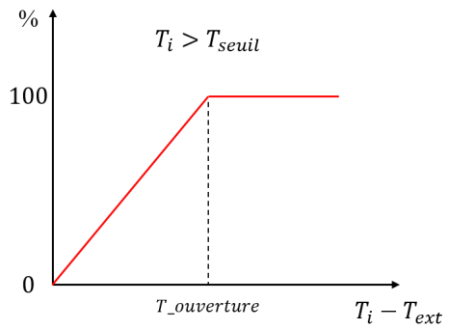


Figure 7 - Loi d'ouverture des fenêtres en fonction des conditions intérieures/extérieures

3. RESULTATS

On expose les résultats sur potentiel de ventilation et le confort dans les bâtiments selon le niveau et l'orientation du bâtiment. Les niveaux 0, 3 et 6 sont représentatifs pour percevoir les tendances en fonction de l'altitude.

3.1. POTENTIEL DE VENTILATION

On s'intéresse dans un premier au potentiel de ventilation en fonction de la configuration. On fait l'hypothèse de fenêtres ouverte à tout instant. Le renouvellement d'air des logements par direction et par niveau est donné Figure 8. En configuration traversant, le renouvellement d'air représenté est dû aux différences de pression sur les façades et en mono-exposé il est dû à la différence de température d'air intérieur-extérieur.

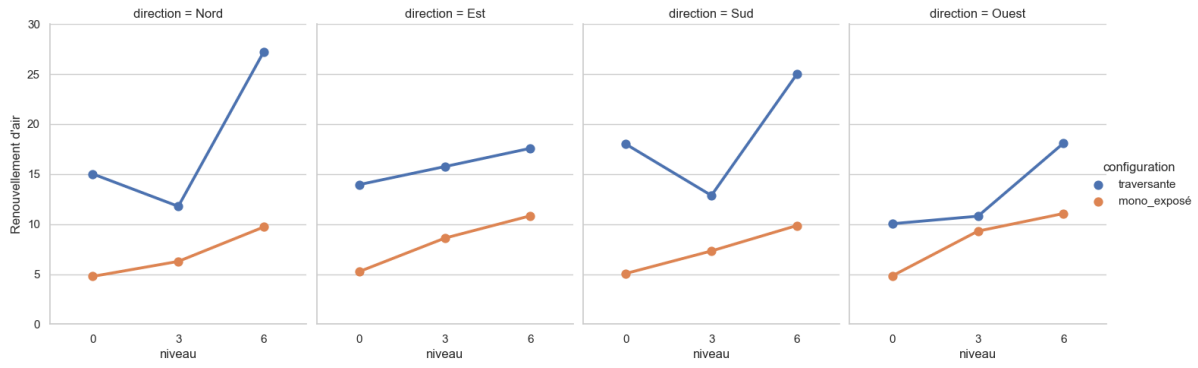


Figure 8 - Renouvellements d'air moyens des logements par orientation (Nord, Est, Sud, Ouest) du bâtiment et par niveau (0, 3, 6) en vol/h

Les observations principales sont:

- Le renouvellement d'air est compris entre 5 et 12 vol/h en moyenne dans les logements mono-exposés, et entre 10 et 25 vol/h en configuration traversant, valeurs comparables à celles obtenues dans l'étude par Geros et al. 2005.
- Les logements les plus favorables sont ceux situés au dernier étage
- En mono-exposé le renouvellement d'air est peu sensible à l'orientation
- En orientation traversant et pour les orientations Nord et Sud, le niveau 3 est défavorable, alors que pour les orientations Est et Ouest il est intermédiaire par rapport aux niveaux 0 et 6

3.2. CONFORT DANS LES LOGEMENTS

Le confort thermique des logements est évalué en calculant la température opérative. On compare l'efficacité de la ventilation sur le confort intérieur en considérant la loi d'ouverture des fenêtres présentée au paragraphe 2.3. La distribution de la température opérative de chaque logement sur la période étudiée de juillet 2022 en fonction de l'orientation (colonne), de la configuration (ligne), du niveau dans le bâtiment (sous-colonne) sans et avec ventilation (bleu/orange) est donnée Figure 9.

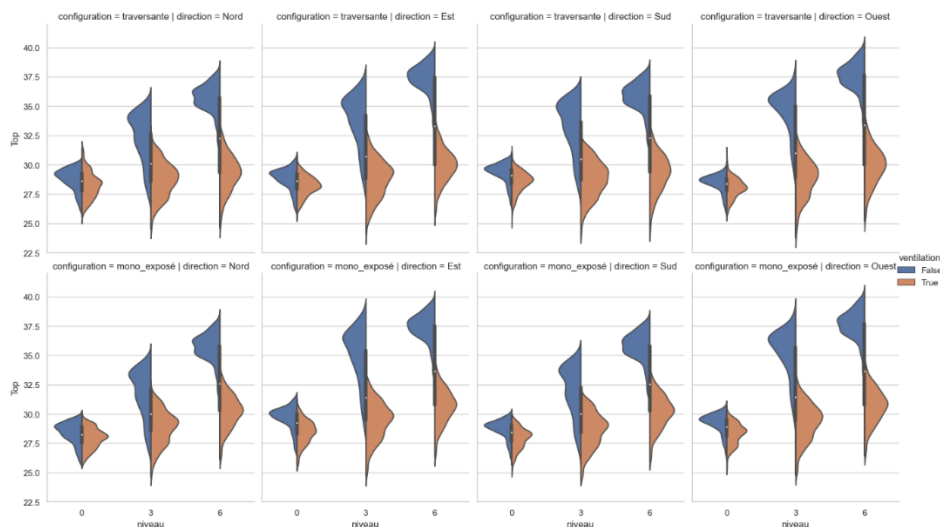


Figure 9 - Comparaison de la température opérative de plusieurs niveaux pour les quatre directions avec et sans ventilation

Les points à retenir sont :

- La température opérative diminue pour toutes les configurations, l'effet de l'orientation est plus difficile à percevoir
- L'abaissement de la température opérative est d'autant plus efficace que le logement est situé haut

L'amélioration du confort au niveau 0 n'est pas en contradiction par rapport au potentiel de ventilation puisque les fenêtres ne sont pas nécessairement ouvertes à ce niveau.

4. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

L'effet de la ventilation naturelle avec prise en compte du microclimat sur le confort intérieur a été étudié sur une maquette d'îlot de bâtiments avec cour intérieure construit à partir d'un quartier réel. Les couplages réalisés permettent d'obtenir des conditions limites plus réalistes pour la ventilation des bâtiments. Tous les logements présentent une amélioration du confort et les logements du dernier étage présentent le potentiel de ventilation et d'amélioration du confort les plus élevés.

Une analyse de la distribution de vent dans le canyon permettrait d'expliquer les résultats de potentiel renouvellement d'air diminué au milieu du bâtiment. Des travaux de modélisation pour estimer l'effet du débit d'air depuis l'intérieur vers l'extérieur des bâtiments sur la température d'air extérieur sont en cours.

REMERCIEMENTS

Ce travail est financé par le programme doctoral du Centre Scientifique et Technique du Bâtiment. Les auteurs remercient Sylvain Aguinaga pour avoir proposé et réalisé la simulation OpenFoam et fournit les fichiers des coefficients de pression. Les auteurs remercient également François Demouge pour l'aide apporté sur la prise en main du modèle Mathis et du package python pymathis.

BIBLIOGRAPHIE

- AFNOR. 2008. « Eurocode 1: Actions sur les structures - Partie 1-4 : Actions générales - Actions du vent : NF EN 1991-1-4 et NF EN 1991-1-4/AN ».
- «BD TOPO» ~~s. d.~~ <https://geoservices.ign.fr/bdtopo>.
- «BDNB» ~~s. d.~~ <https://bdnb.io/>.
- «Données Météo France» ~~s. d.~~ <https://meteo.data.gouv.fr/>.
- François, Demouge. s. d. « Mathis: Technical guide. Open-Source heat and mass transfer software, CSTB - Centre scientifique et technique du bâtiment ». <https://gitlab.com/CSTB/mathis/-/tree/master/>.
- Garreau, Enora, Yassine Abdelouadoud, Eunice Herrera, Werner Keilholz, G. -E. Kyriakodis, Vincent Partenay, et Peter Riederer. 2021. « District MOdeller and SIMulator (DIMOSIM) – A Dynamic Simulation Platform Based on a Bottom-up Approach for District and Territory Energetic Assessment ». *Energy and Buildings* 251 (novembre): 111354. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111354>.
- Geros, V., M. Santamouris, S. Karatasou, A. Tsangrassoulis, et N. Papanikolaou. 2005. « On the cooling potential of night ventilation techniques in the urban environment ». *Energy and Buildings* 37 (3): 243-57. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2004.06.024>.

- Gros, Adrien. 2013. « Modélisation de la demande énergétique des bâtiments à l'échelle d'un quartier ». Thèse de Doctorat, Université de La Rochelle. <http://www.univ-larochelle.fr/Soutenance-de-these-d-Adrien-GROS>.
- Jasak, Hrvoje, Aleksandar Jemcov, et Zeljko Tukovič. 2007. « OpenFOAM: A C++ Library for Complex Physics Simulations ». In . Dubrovnik, Croatia. <https://csabai.web.elte.hu/http/simulationLab/jasakEtAlOpenFoam.pdf>.
- Kyriakodis, Georgios-Evrystheas. 2020. « Development of a coupled simulation tool for urban building energy demand, district energy systems and microclimate modeling. » Theses, Université de La Rochelle. <https://hal.archives-ouvertes.fr/tel-03203724>.
- Laaidi, Karine, Aymeric Ung, Véréne Wagner, Pascal Beaudeau, et Mathilde Pascal. 2012. « Système d'alerte canicule et santé: principes, fondements et évaluation ». Saint Maurice: Institut de Veille Sanitaire.
- Oke, TR, G Mills, A Christen, et JA Voogt. 2017. *Urban Climates*. Cambridge University Press.
- Salvati, Agnese, et Maria Kolokotroni. 2023. « Urban microclimate and climate change impact on the thermal performance and ventilation of multi-family residential buildings ». *Energy and Buildings* 294 (septembre): 113224. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113224>.
- Singh, Balwinder, Bradley S. Hansen, Michael J. Brown, et Eric R. Pardyjak. 2008. « Evaluation of the QUIC-URB Fast Response Urban Wind Model for a Cubical Building Array and Wide Building Street Canyon ». *Environmental Fluid Mechanics* 8 (4): 281-312. <https://doi.org/10.1007/s10652-008-9084-5>.
- Stewart, I. D., et T. R. Oke. 2012. « Local Climate Zones for Urban Temperature Studies ». *Bulletin of the American Meteorological Society* 93 (12): 1879-1900. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00019.1>.
- Weber, Andreas, Markus Koschenz, Viktor Dorer, Marion Hiller, et Stefan Holst. 2003. « TRNFLOW, A NEW TOOL FOR THE MODELLING OF HEAT, AIR AND POLLUTANT TRANSPORT IN BUILDINGS WITHIN TRNSYS ». In , 1363-68. Eindhoven, Netherlands. https://publications.ibpsa.org/proceedings/bs/2003/papers/bs2003_1363_1368.pdf.
- Yuan, Chao, Ruixuan Zhu, Shanshan Tong, Shuojun Mei, et Wei Zhu. 2022. « Impact of anthropogenic heat from air-conditioning on air temperature of naturally ventilated apartments at high-density tropical cities ». *Energy and Buildings* 268 (août): 112171. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112171>.

Feedbacks personnalisés : conception et évaluation de leur impact dans le processus de changement de comportement. Application au chauffage domestique.

Enzo Cabezas-Rivière^{1,2*}, Maxime Robillart^{1,2}, Thomas Recht^{1,2}, Aline Barlet³, Patrick Sebastian^{1,2}

¹ Univ. Bordeaux, CNRS, Bordeaux INP, I2M, UMR 5295, F-33400, Talence, France

² Arts et Métiers Institute of Technology, CNRS, Bordeaux INP, Hesam Université, I2M, UMR 5295, F-33400 Talence, France

³ GRECCAU, ENSAP Bordeaux, 740 Cours de la Libération - CS70109, 33405, Talence, France

*enzo.cabezas@u-bordeaux.fr

RESUME. L'article présente une méthodologie associant une approche comportementale et physique pour concevoir et évaluer l'impact de feedbacks personnalisés sur la consommation d'énergie de chauffage, les comportements observables associés et les facteurs sous-jacents. Cette approche établit des liens entre les facteurs psychosociaux (préalablement évalués) et les types d'informations à transmettre aux individus. Des conseils personnalisés sur l'utilisation du chauffage, basés sur un modèle thermique dynamique des logements, sont ensuite fournis pour encourager les économies d'énergie. Ces informations personnalisées sont transmises individuellement aux membres de deux familles durant la période de chauffe 2023-2024. Les résultats présentés comprennent la première évaluation des facteurs et les premiers retours d'informations présentés aux occupants.

MOTS-CLÉS : Feedbacks personnalisés, Modèle de changement de comportement, Économies d'énergie

ABSTRACT. This article presents a methodology combining a behavioural and physical approach to designing and evaluating the impact of personalised feedback on heating energy consumption, the associated observable behaviours and the underlying factors. This approach establishes links between psychosocial factors (previously assessed) and the types of information to be conveyed to individuals. Personalised advice on heating use, based on a dynamic thermal model of homes, is then provided to encourage energy savings. This personalised information is delivered individually to members of two families during the 2023-2024 heating season. The results presented include the first assessment of the factors and the first feedback presented to the occupants.

KEYWORDS: Personalised feedbacks, Behaviour change model, Energy savings

1. INTRODUCTION

Pour réduire les consommations d'énergie des bâtiments, deux approches sont couramment employées : améliorer l'efficacité énergétique du bâti et des systèmes et inciter à davantage de sobriété énergétique en agissant sur le comportement des usagers. Lorsqu'elles sont mises en œuvre de manière isolée, l'efficacité de ces approches peut être limitée. Par exemple, des rénovations négligeant les besoins des usagers peuvent entraîner des gains énergétiques inférieurs aux attentes, voire inexistantes (ADEME, 2010). L'absence de prise en compte de l'environnement (facteurs extérieurs) des occupants, avec par exemple la difficulté à comprendre les systèmes énergétiques à disposition (voire leur défaillance), peut également être un frein aux économies (JISE, 2015). Il apparaît donc crucial de concilier à la fois une approche technique et comportementale pour atteindre des économies d'énergie pérennes à travers l'adoption et le maintien de comportements sobres en énergie.

Dans ce cadre, une enquête a été conduite pour identifier les obstacles à l'adoption et au maintien de comportements sobres en énergie (p. ex. mise en place de réduits) dans le contexte du chauffage collectif

en France (Cabezas-Rivière et al. 2023). Les répondants ont demandé et/ou trouvé pertinent de : pouvoir piloter à distance les radiateurs ; visualiser les consignes de température en degré ; de faciliter l'accès et la compréhension des factures¹ et de recevoir des conseils personnalisés afin de pouvoir adopter des comportements sobres en énergie de chauffage. Suite à cette enquête, il a été identifié que l'installation de Robinets Thermostatiques connectés (RTHc) et la transmission de retours d'informations énergétiques pourraient constituer une solution pour générer des économies durables dans le chauffage collectif en France. Les RTHc permettent aux occupants de programmer et piloter à distance leurs radiateurs tout en facilitant la transmission des données sur l'ambiance thermique et les températures de consignes. Ces informations rendent possible la réalisation de conseils personnalisés à l'échelle individuelle. Les retours d'informations, ou feedbacks, énergétiques sont couramment utilisés dans la littérature. Cependant, certains verrous scientifiques persistent :

- Comment personnaliser et choisir les informations pertinentes, au-delà des données relatives aux consommations de chauffage, à transmettre individuellement ?
- Comment évaluer les potentiels d'économie atteignables ?
- Comment évaluer, au-delà des économies d'énergie réalisées ou d'un changement de comportement, l'impact de retours d'informations énergétiques personnalisés ?

Cet article a pour objectif de présenter une méthodologie permettant de concevoir un retour d'informations personnalisé et d'évaluer son impact à la fois sur les consommations de chauffage, sur le comportement, et sur les processus en jeu dans le changement du comportement.

2. ÉTAT DE L'ART

Du point de vue des sciences sociales, le comportement d'une personne est influencé par divers facteurs psychosociaux, tels que la valeur économique ou le cercle social auquel elle appartient (Katzev et Johnson 1983) mais aussi par des facteurs extérieurs tels que le logement ou la technologie de chauffage à disposition. Ces facteurs peuvent influencer positivement (favoriser) ou négativement (entraver) l'adoption et le maintien d'un comportement. Par exemple, un individu ignorant le coût de sa consommation de chauffage (facteur psychosocial : valeur économique) pourrait être moins enclin à économiser de l'énergie. De plus, les facteurs extérieurs ont également une influence sur l'adoption et le maintien d'un comportement. Par exemple, Guagnano et al. (1995) montrent dans leur étude que c'est la possession d'un bac de recyclage qui permet le mieux de prédire, au-delà des facteurs psychosociaux, le recyclage.

Les facteurs psychosociaux et extérieurs peuvent être structurés dans des modèles de comportement visant à mieux comprendre les mécanismes sous-jacents au processus de construction et d'évolution du comportement. Un exemple est le modèle de Ohnmacht et al. (2017), axé notamment sur les comportements liés à l'utilisation de l'énergie (cf. Figure 1). Selon les auteurs, le changement de comportement se déroule en quatre phases : la pré-décision, la pré-action, l'action et la post-action. Pour passer d'une phase à une autre, l'individu doit traverser des points de transition : l'intention d'atteindre un objectif, l'intention de réaliser le comportement pour atteindre l'objectif, mettre en pratique le comportement et le transformer en une nouvelle habitude. Les facteurs psychosociaux et extérieurs influent sur l'atteinte de ces points de transition, impactant ainsi la liaison entre les phases. Avec ce modèle, les auteurs proposent une aide à la conception de retours d'informations personnalisés. Ils identifient, pour chaque facteur psychosocial, une typologie d'informations à communiquer. Par exemple, pour sensibiliser un individu à la conscience de sa responsabilité perçue, il est suggéré de lui communiquer sa contribution personnelle aux émissions de gaz à effet de serre.

¹ Dans le collectif, les factures de chauffage sont souvent regroupées avec d'autres frais et la somme payée est une provision sur charges. Cette provision est la plupart du temps calculée au prorata de la surface du logement et non à partir de la consommation réelle de chaque logement.

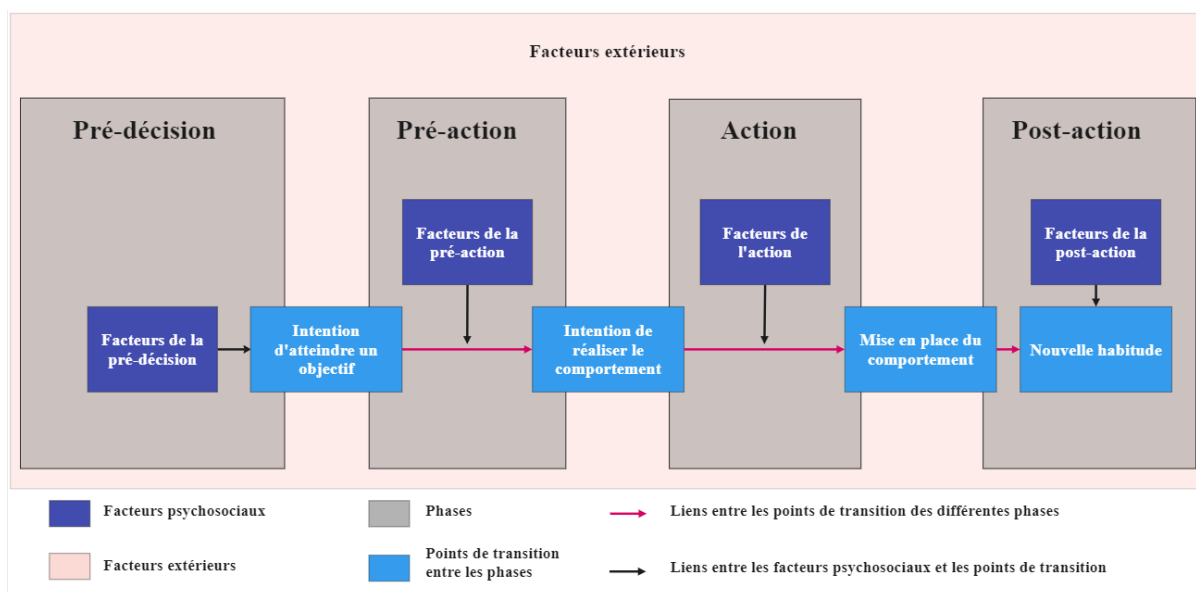


Figure 1 : Modèle de changement de comportement, figure adaptée de Ohnmacht et al. (2017)

Par définition, les facteurs psychosociaux agissent au niveau du choix du comportement et non au niveau du comportement observable lui-même. Ainsi, pour les évaluer, la méthode d'enquête (par entretien ou par questionnaire) est privilégiée car elle permet de recueillir des opinions et des représentations, ce qui n'est pas envisageable par l'observation². Usuellement, dans la littérature, ces facteurs sont évalués en mesurant l'opinion des individus vis-à-vis d'affirmations (classiquement entre 2 et 5 affirmations par facteur), via une échelle de Likert. Par exemple, la responsabilité perçue peut être définie comme la capacité d'une personne à prévoir les conséquences d'événements ou d'actions. Une affirmation possible pour l'évaluer est : « J'ai conscience qu'en utilisant mon chauffage, je contribue aux émissions de CO₂ » avec des choix de réponse allant de 1 = « Tout à fait d'accord » à 7 = « Pas du tout d'accord ». Pour ce facteur, plus l'individu aura un niveau important de responsabilité perçue, plus la probabilité d'adopter et de maintenir des comportements économes en énergie sera grande.

Dans la plupart des études en sciences sociales, l'auto-évaluation est couramment utilisée pour déterminer si un comportement est réalisé ou non, ce qui peut conduire à des biais, notamment de désirabilité sociale (Yuriev et al. 2020). Cependant, dans le cas du travail présenté ici, les comportements seront évalués à l'aide du traitement des données issues de capteurs *in situ*, notamment des RTHc, limitant ainsi ces biais.

3. METHODOLOGIE

La méthodologie de cette recherche met en œuvre le cadre théorique de Ohnmacht et al. (2017) en contextualisant les facteurs extérieurs à l'utilisation du chauffage. Cette approche vise à concevoir des retours d'informations personnalisés élaborés à partir de l'évaluation des facteurs du modèle et des échanges avec les individus via des entretiens individuels.

3.1. LES ENTRETIENS

Les facteurs psychosociaux et extérieurs sont évalués au moyen d'entretiens individuels, réalisés à deux mois d'intervalle sur l'ensemble de la période de chauffe, soit à trois reprises au total. Cette fréquence est considérée comme appropriée pour éviter une sollicitation trop importante des sujets et

² En sciences sociales, une observation peut être définie comme un regard porté sur une situation sans que celle-ci soit modifiée. L'enquête est utilisée lorsque l'observation de certains comportements supposerait une véritable intimité souvent impossible et inacceptable d'un point de vue déontologique.

pour évaluer l'impact des informations transmises. Le 1^{er} entretien, réalisé en amont du recueil et de l'analyse de données, vise à évaluer les facteurs en jeu dans la construction des phases de pré-décision et de pré-action (Figure 1). Les facteurs des phases d'action et de post-action sont évalués à partir du 2^{ème} entretien. Celui-ci vise également à recueillir les évaluations des sujets quant à la pertinence des informations présentées dans les premiers tableaux de bord. Le 3^{ème} et dernier entretien a pour objectif d'évaluer l'impact global des informations transmises aux sujets. Cet entretien est complété par un atelier de groupe, réunissant les familles participant à l'expérience, ce qui permet d'obtenir un retour sur l'ensemble de la méthodologie. Dans cet article, seuls les résultats du 1^{er} entretien sont présentés (cf. partie 5.1).

3.2. LES RETOURS D'INFORMATIONS PERSONNALISES

Tout au long de l'expérimentation, les données des capteurs *in-situ* sont analysées pour suivre l'évolution des comportements des occupants, permettant ainsi de fournir des conseils personnalisés sur l'utilisation du chauffage. Les occupants sont informés des économies réalisées ou potentielles en suivant les conseils proposés, afin d'encourager l'adoption et le maintien de comportements économes. Pour estimer ces potentiels d'économie, un modèle de simulation thermique dynamique est développé avec le logiciel Pleiades³ pour chaque logement. Ces modèles sont construits à l'aide de plans et des caractéristiques connues de l'enveloppe et des systèmes du logement. Les sollicitations internes sont estimées à l'aide des capteurs *in-situ* et des échanges avec les occupants. Les données météorologiques sont récupérées via le webservice météo Visual Crossing⁴. Enfin, les modèles sont calés en comparant mesures *in situ* et simulations (Recht et al. 2018). Ces modèles sont utilisés pour comparer les consommations de chauffage mesurées et simulées résultant de divers scénarios de températures de consigne, d'ouverture de fenêtres ou encore d'occultation. L'objectif est d'isoler l'impact du changement de comportement sur les consommations de chauffage. Ces résultats ne sont pas présentés dans cet article, car les modèles sont en cours de développement.

Les tableaux de bord sont envoyés deux fois par mois. Cette périodicité a été choisie pour éviter de sur-solliciter les sujets tout en leur fournissant des informations au plus proche de leur utilisation du chauffage, pouvant ainsi favoriser leur engagement. Ces retours d'informations personnalisés sont envoyés jusqu'à la fin de la période de chauffe et se concluent avec le dernier entretien.

4. CAS D'ETUDE

4.1. LES OCCUPANTS

Deux familles habitant aux alentours de Bordeaux participent à l'étude. Certaines caractéristiques des occupants sont présentées dans le Tableau 1. Les deux familles sont constituées d'un couple avec deux enfants. Parmi elles, au moins un occupant possède des connaissances en énergétique du bâtiment. Pour la famille 1, le chauffage est piloté par un thermostat central avec comme programme : 18,5 °C entre 6 h et 9 h et entre 17 h et 22 h la semaine ; 18,5 °C entre 7 h et 22 h 30 le weekend ; 17,5 °C le reste du temps. Pour la famille 2, le chauffage est également piloté par un thermostat central avec comme programme : 16 °C entre 22 h et 6 h et 21 °C le reste du temps.

Occupants	Famille 1				Famille 2			
	1	2	3	4	5	6	7	8
Caractéristiques								
Sexe (H/F)	H	F	H	F	H	H	F	F
Classe d'âge (ans)	18-25	15-18	45-55	45-55	45-55	15-18	45-55	18-25
Études/Profession en lien avec l'énergétique du bâtiment	Non	Non	Oui (Ingénieur en Génie Civil)	Non	Oui (Professeur des universités)	Non	Non	Non

Tableau 1 : Caractéristiques des occupants des logements d'étude

³ <https://www.izuba.fr/>

⁴ <https://www.visualcrossing.com/>

4.2. L'INSTRUMENTATION *IN-SITU*

Pour la famille 1, les pièces de vie ainsi que les chambres sont équipées d'un capteur de température/humidité relative de l'air, d'ouverture de fenêtre et d'un RTHc. Ces derniers permettent de disposer notamment de la température de consigne et des mesures de température et d'humidité relative. Les pièces de vie sont également équipées de capteurs de mouvement. Le logement est équipé d'un compteur *Gazpar*, permettant d'accéder aux données de consommation de gaz. Pour la famille 2, seules les données des RTHc sont disponibles, les consommations de gaz sont transmises par l'occupant n° 5.

5. RESULTATS

5.1. L'ENTRETIEN N° 1 A DESTINATION DES OCCUPANTS

Cet entretien a été réalisé entre le 7 et le 11 novembre 2023. Il avait pour objectif de recueillir les sensations thermiques des occupants et leurs habitudes d'utilisation du chauffage, des fenêtres et des occultations au cours de l'hiver précédent. Il a également permis d'identifier leurs idées et sources de motivation pour économiser de l'énergie. Enfin, les facteurs construisant les phases de pré-décision et de pré-action du modèle de Ohnmacht et al. (2017) ont été évalués.

Les résultats, présentés dans le Tableau 2, montrent que les robinets de réglage sur les radiateurs ne sont pas utilisés. L'ensemble des occupants se déclarent satisfaits de la régulation actuelle du chauffage, gérée par les occupants n° 3 et 5 au sein de leur famille respective. En cas d'inconfort, les autres membres de la famille peuvent l'indiquer à ces individus qui changent alors le réglage du thermostat. Aucun occupant ne connaît le montant de sa facture de gaz, incluant la part consacrée au chauffage. Outre les motivations liées à l'économie d'énergie, les occupants ont exprimé leurs désirs : avoir la possibilité de programmer et de piloter à distance leurs radiateurs (occupants n° 5, 6 et 7) ; bénéficier de conseils personnalisés pour la gestion du chauffage (occupants n° 2, 3, 4, 6 et 8) ; approfondir leurs connaissances du fonctionnement de leur chauffage en prévision de leur future autonomie (occupants n° 1 et 8).

Occupants	1	2	3	4	5	6	7	8
Résultats								
Pilote le thermostat	Non	Non	Oui	Non	Oui	Non	Non	Non
Utilisation robinets réglage radiateurs	Jamais							
Fréquence ouverture fenêtres	< 1 fois par jour		1 à 2 fois par jour		< 1 fois par jour		1 à 2 fois par jour	
Durée moyenne d'une ouverture de fenêtre	< 30 minutes par ouverture							
Ouverture des occultations (occupants présents en journée)	De temps en temps	Très souvent ou toujours			Pas d'occultation			
Ouverture des occultations (la nuit et lors d'une absence de quelques heures / jours)	Jamais ou rarement							
Motivation pour économiser énergie	Réduire les coûts	Réduire l'impact environnemental	Réduire les coûts	Réduire l'impact environnemental	Améliorer le bâti et le système de chauffage	Réduire les coûts et l'impact environnemental	Améliorer le bâti et le système de chauffage	Réduire les coûts et l'impact environnemental
Connaissance du prix de la facture de gaz / chauffage	Non							

Tableau 2 : Principaux résultats du 1^{er} entretien

Treize facteurs psychosociaux et extérieurs ont été évalués à l'aide d'une échelle de Likert en 7 points. Les facteurs portant le préfixe *mean* indiquent qu'ils sont évalués à partir de plusieurs affirmations. Seuls les résultats des facteurs considérés comme les plus susceptibles d'entraver les comportements sobres en énergie sont présentés à la Figure 2.

La Figure 2 montre que l'efficacité personnelle perçue (PSE), définie comme la croyance d'un individu en ses capacités à réussir dans une situation donnée, est identifiée comme le facteur le plus

entravant. Il est suivi par la perception des conséquences négatives liées à un comportement (NBC), qui survient lorsqu'un individu prend conscience que son comportement actuel est néfaste. Arrive ensuite le contrôle comportemental perçu (PBC), défini comme la perception par les individus des facteurs facilitants ou entravants la réalisation d'un comportement, tel que la perception qu'adopter des gestes économes est chronophage. Puis vient, les normes subjectives (SN) qui reflètent la perception des pressions sociales et des attentes de l'entourage de l'individu concernant la réalisation d'un ou de plusieurs comportements. Enfin arrive, la conscience des problèmes environnementaux (EA), qui se réfère à la prise de conscience individuelle des menaces pesant sur l'environnement naturel, représente les deux derniers facteurs pouvant entraver le comportement.

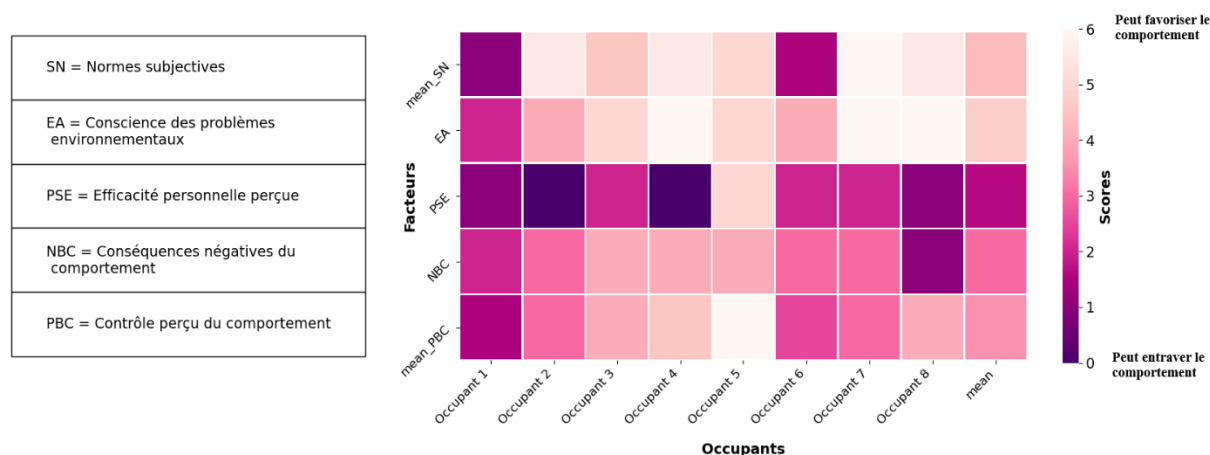


Figure 2 : Scores des occupants sur les facteurs psychosociaux les plus susceptibles d'entraver l'adoption de comportements sobres en énergie.

5.2. EXEMPLE DE CREATION D'UN TABLEAU DE BORD

L'évaluation des facteurs psychosociaux permet de déterminer les informations à transmettre aux occupants et de concevoir les tableaux de bord. Ces derniers sont créés sur la plateforme en ligne Genially⁵. Les facteurs PSE et NBC ont été déterminés comme les deux facteurs les plus susceptibles d'entraver les comportements économes (cf. Figure 2). Ainsi, entre le 18 et le 26 janvier 2024, un premier tableau de bord commun a été envoyé à l'ensemble des occupants pour influencer ces aspects. Pour la PSE, un ensemble de bonnes pratiques d'utilisation, incluant notamment les températures de consigne recommandées par pièce par l'ADEME⁶, a été présenté. Pour la NBC, des informations sur l'impact économique et environnemental de la consommation de chauffage domestique à l'échelle mondiale et française ont été communiquées. À partir du tableau de bord n° 2, les informations ont été personnalisées pour chaque occupant comme l'illustre la Figure 3 pour l'occupant n° 6. Les icônes et textes en bleu sont interactifs et permettent d'accéder à des liens internet, des vidéos ou des images. Le Tableau 3 illustre le lien entre les informations présentées et les facteurs psychosociaux sous-jacents.

Informations	Coût de la facture de gaz	Émissions de CO ₂ eq. pour la consommation gaz	Récolte de dons pour des associations	Empreinte carbone des jeux vidéo	Empreinte carbone personnelle	Usages et conseils
Facteur psychosociaux						
Valeur économique (EV)	X					
Responsabilité perçue (PR)	X	X	X	X	X	X
Conséquence négative du comportement (NBC)		X	X	X	X	
Conscience des problèmes environnementaux (EA)		X	X	X	X	
Normes subjectives (SN)			X	X		
Efficacité personnelle perçue (PSE)					X	
Contrôle perçu du comportement (PBC)						X

Tableau 3 : Lien entre les informations présentées à l'occupant n° 6 et les facteurs psychosociaux

⁵ <https://genial.ly/fr/>

⁶ https://multimedia.ademe.fr/infographies/infographie_mieux_se_chauffer/

Les informations à propos des jeux vidéo visent à encourager le visionnage des vidéos proposées, puis à explorer le reste du tableau de bord. Ce choix fait suite au recueil des centres d'intérêt de l'occupant. Le calcul de l'empreinte carbone personnelle est commun à l'ensemble des tableaux de bord, car il impacte les facteurs PSE et NBC (Figure 2). Bien que les ouvertures de fenêtres ne soient pas détectées chez cette famille, le conseil est inclus, car l'occupant a déclaré ne « jamais » ouvrir ses fenêtres en hiver, ce qui peut affecter la qualité de l'air intérieur. La partie sur l'engagement, commune à tous mais adaptée selon la personnalisation des informations, s'appuie sur le principe de la communication engageante développé en psychologie sociale. Elle encourage le changement de comportement en suscitant un fort engagement chez les individus et se déroule en deux phases : une phase engageante, où les individus réalisent un acte préparatoire, et une phase persuasive, où ils sont exposés à un message visant à les convaincre d'adopter un comportement spécifique (Joule et al. 2004). Dans ce contexte, la phase engageante se manifeste à travers les entretiens et les engagements inscrits dans les tableaux de bord, tandis que la phase persuasive se construit avec les autres informations présentées dans ces tableaux.

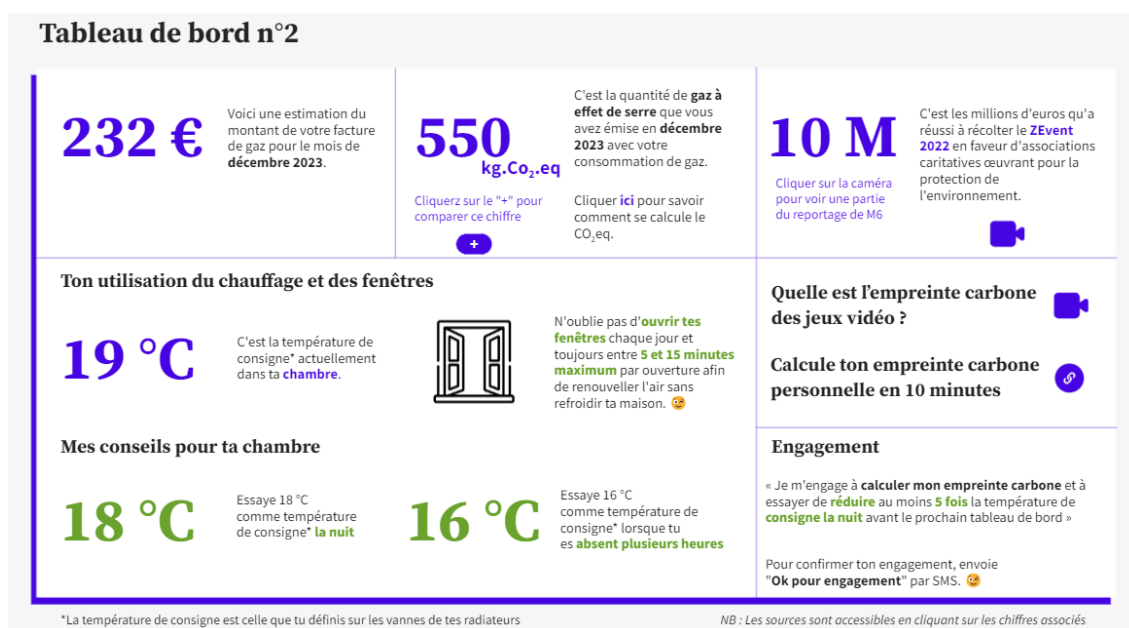


Figure 3 : Tableau de bord n° 2 à destination de l'occupant n° 6

6. CONCLUSION

Ce travail présente l'étude d'une méthodologie couplant une approche comportementale et physique pour élaborer et évaluer des retours d'informations personnalisés à plusieurs niveaux : sur les consommations de chauffage, sur les comportements observables associés, ainsi que sur les facteurs psychosociaux sous-jacents. Les retours d'informations personnalisés sont conçus et proposés aux individus à l'aide de l'évaluation des facteurs psychosociaux et du cadre méthodologique proposé par Ohnmacht et al. (2017). Afin d'encourager les individus à adopter et maintenir des comportements économes, les potentiels d'économie associés ainsi que les économies déjà réalisées sont mises en avant. Ces derniers sont déterminés à l'aide des modèles STD de chaque logement. L'apport principal de cette recherche réside dans la méthodologie de conception et d'évaluation de l'impact des informations personnalisées, allant au-delà du simple prix de la facture, grâce à la combinaison de ces modèles.

Cette méthodologie a été expérimentée dans deux foyers, mais ceux-ci ne représentent pas une configuration familiale typique. En effet, au moins un occupant par famille a réalisé des études et a une activité professionnelle liées à l'énergétique du bâtiment, ce qui peut conduire à des biais. Ainsi, ces occupants régulent principalement le chauffage à l'aide d'un thermostat général et ont une sensibilité élevée à l'environnement et aux économies d'énergie. De plus, les programmes actuels de ces thermostats sont déjà conçus pour être économes en énergie, réduisant ainsi le besoin de conseils sur la

régulation terminale. En outre, deux foyers ne permettent pas de généraliser les résultats, et la personnalisation à grande échelle serait complexe à mettre en œuvre en raison du temps nécessaire pour rechercher et présenter des informations personnalisées. Pour pallier cela, une base de données d'informations personnalisées pourrait être préalablement créée, en tenant compte des différentes sources de motivation, des centres d'intérêt et des facteurs psychosociaux sous-jacents. En évaluant ces aspects pour chaque individu, il serait donc possible de faire le lien avec cette base de données.

Par ailleurs, la conception des enquêtes doit tenir davantage compte du nombre d'affirmations pour évaluer les facteurs. En effet, dans le 1^{er} questionnaire réalisé dans ces travaux, les facteurs PSE et NBC ont été évalués à l'aide d'une seule affirmation pour limiter la durée de l'entretien. Les résultats ont montré que ces facteurs peuvent être les principaux obstacles à l'adoption et au maintien de comportements économes. Par conséquent, des questions supplémentaires seront intégrées dans les entretiens suivants afin de les évaluer de manière plus robuste.

Enfin, les facteurs évalués dans cette étude sont également ceux qui interviennent dans la construction d'autres comportements, tels que ceux liés à l'utilisation de l'eau ou encore du recyclage. Ainsi, la méthodologie pourrait également être appliquée à d'autres types de comportements.

7. REMERCIEMENTS

Cette étude s'inscrit dans le cadre d'un travail de thèse. À ce titre, nous remercions l'Ecole Doctorale de Physique et d'Ingénierie de l'Université de Bordeaux pour le financement.

8. BIBLIOGRAPHIE

- Cabezas-Rivière, Enzo, Thomas Recht, Aline Barlet, Maxime Robillart, Mathieu Bouville, et Patrick Sebastian. 2023. « Towards sustainable energy consumption for occupants of buildings with collective heating systems ». *Journal of Physics: Conference Series* 2600 (9): 092019. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2600/9/092019>.
- Guagnano, Gregory A., Paul C. Stern, et Thomas Dietz. 1995. « Influences on Attitude-Behavior Relationships: A Natural Experiment with Curbside Recycling ». *Environment and Behavior* 27 (5): 699-718. <https://doi.org/10.1177/0013916595275005>.
- JISE. 2015. « Les consommations d'énergie des ménages en situation de précarité énergétique : contraintes et résistances ». In *Les actes des Journées internationales de sociologie de l'énergie 2015*. Tours, France. http://www.socio-energie2015.fr/?page_id=2550.
- Joule, Robert-Vincent, Jacques Py, et Françoise Bernard. 2004. « Qui dit quoi, à qui, en lui faisant faire quoi? Vers une communication engageante. » In *Psychologie sociale et communication*, 205-18. Psycho sup. Paris: Dunod. <https://www.researchgate.net/publication/259646510>.
- Katzev, Richard D., et Theodore R. Johnson. 1983. « A social-psychological analysis of residential electricity consumption: the impact of minimal justification techniques ». *Journal of Economic Psychology* 3 (3): 267-84. [https://doi.org/10.1016/0167-4870\(83\)90006-5](https://doi.org/10.1016/0167-4870(83)90006-5).
- Ohnmacht, Timo, Dorothea Schaffner, Christian Weibel, et Helmut Schad. 2017. « Rethinking Social Psychology and Intervention Design: A Model of Energy Savings and Human Behavior ». *Energy Research & Social Science* 26 (avril): 40-53. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2017.01.017>.
- Recht, Thomas, Jeanne Goffart, Laurent Mora, Monika Woloszyn, et Catherine Buhe. 2018. « Méthodologie pour la comparaison des performances simulées et mesurées de maisons « à énergie positive » ». In *IBPSA France 2018*. Bordeaux. <https://www.researchgate.net/publication/327884219>.
- Yuriev, Alexander, Mehdi Dahmen, Pascal Paillé, Olivier Boiral, et Laurence Guillaumie. 2020. « Pro-Environmental Behaviors through the Lens of the Theory of Planned Behavior: A Scoping Review ». *Resources, Conservation and Recycling* 155 (avril): 104660. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104660>.

Analyse et modélisation des interactions des occupants avec les fenêtres dans les chambres des logements français durant l'été

Kevin Campagna^{1,2,3*}, Aurélie Fouquier³, Anaïs Machard², Dorothée Charlier⁴, Monika Woloszyn¹

¹Université Savoie Mont-Blanc, CNRS, LOCIE, 73000 Chambéry, France

²Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB), 24 Rue Joseph Fourier, 38400 Saint-Martin-d'Hères

³Univ. Grenoble Alpes, CEA, Liten, INES, 73375 Le Bourget-du-Lac, France

⁴Université Savoie Mont-Blanc, IREGE, 4 chemin de Bellevue, 74940 Annecy-le-Vieux, France

*kevin.campagna@cstb.fr

RESUME. Lors des périodes de vagues de chaleurs l'occupant joue un rôle prépondérant sur la surchauffe de son logement et donc sur son confort thermique. Aujourd'hui, la diversité des comportements en période de fortes chaleurs est mal représentée dans les logiciels classiques de STD. A l'aide d'une base de données recueillie sur 76 appartements dans 3 régions de France durant l'été 2023, cette étude vise à mieux comprendre le comportement des occupants vis-à-vis des fenêtres de leurs chambres et les paramètres environnementaux et sociologiques les plus impactant. A l'aide d'un clustering des profils types lors d'une semaine chaude et froide, il a été possible d'analyser la diversité des comportements et de retrouver des comportements adaptatifs de ventilation nocturne. Grâce à la méthode SHAP (Shapley Additive exPlanations) d'IA explicable d'un modèle XgBoost (eXtreme Gradient Boosting) de prédiction de l'état des fenêtres, la température et l'humidité, ainsi, que la catégorie socio-professionnelle, le mois de l'année, l'heure, le bruit ont été déterminés comme les plus impactant.

MOTS-CLÉS : Comportement des occupants - Modèle de prédiction d'état des fenêtres – Surchauffe – Été.

ABSTRACT. During heatwave periods, the occupant plays a major role in its dwelling overheating and therefore its thermal comfort. Today, the diversity of behaviours encountered in real life during periods of extreme heat is poorly represented in Performance Building Simulation (PBS). Using a database collected from 76 dwellings in 3 regions of France during the summer of 2023, this study aims to gain a better understanding of occupants' behaviour towards their bedroom windows openings. It focuses on the environmental and sociological parameters that have the greatest impact. By clustering typical profiles during a hot and a colder summer week, it was possible to analyse the diversity of behaviours and identify adaptive night-time ventilation behaviours. Using explainable AI method SHAP (Shapley Additive exPlanations) on an XgBoost (eXtreme Gradient Boosting) model for predicting window state, the parameters with the greatest impact were identified as the temperature and humidity, as well as socio-professional category, month of the year, time of day and noise.

KEYWORDS: Occupant Behavior - Window state prediction model – Overheating - Summer

1. INTRODUCTION

La prise en compte du comportement des occupants, avec sa stochasticité intrinsèque et sa grande diversité, demeure un défi non résolu et une source majeure d'incertitude de la simulation thermique dynamique (Clevenger et Haymaker 2006). Les scénarios fixes et les règles actuelles ne parviennent pas à intégrer pleinement la diversité et la stochasticité des comportements (D'Oca et al. 2019). Les approches probabilistes, telles que les modèles basés sur des régressions logistiques simples ou multiples et les chaînes de Markov, ont été proposées pour pallier à ces lacunes (Haldi et Robinson 2008). Récemment, l'utilisation du Machine Learning sur des données de campagnes de mesures a montré des performances supérieures avec des modèles tels que les arbres de décisions, les Support Vector Machine,

les réseaux de neurones, les forêts aléatoires et le XgBoost (eXtreme gradient Boosting) (Mo et al. 2019). Le dérèglement climatique amplifie les vagues de chaleur et leur impact sur la surchauffe des bâtiments, soulignant l'importance du comportement des occupants pour maintenir le confort thermique. Par exemple, la gestion des fenêtres, notamment la ventilation nocturne, joue un rôle crucial pendant les périodes chaudes (Gondian 2019). Il apparaît nécessaire d'approfondir la recherche sur le comportement des occupants en période estivale dans les bâtiments résidentiels, étant donné que la majorité des modèles de comportement se concentrent sur les périodes hivernales ou d'inter-saison et principalement dans des bâtiments tertiaires (Balvedi, Ghisi, et Lamberts 2018). Malgré quelques études, comme celle de Hostein et al. (2023) sur quatre logements à Lyon, la généralisation des résultats reste difficile en raison de la taille limitée de l'échantillon (Dong, Liu, et al. 2022). Pour améliorer cette généralisation, il est essentiel d'augmenter la taille des bases de données et d'incorporer des facteurs contextuels et sociologiques dans les modèles (Yan et al. 2015). Cette étude s'appuie sur une base de données collectée dans 76 logements durant l'été 2023 en Ile de France, Gironde et dans le sud-est de la France, et vise à identifier les paramètres explicatifs de l'ouverture des fenêtres par les occupants français en période estivale et caniculaire et à mettre en place un modèle de prédiction de l'état des fenêtres en été basé sur les données.

2. METHODOLOGIE

2.1. METHODOLOGIE GENERALE

La méthodologie générale mise en place au cours de cette étude peut être résumée de façon graphique dans la Figure 1, et est présentée dans les sections suivantes.

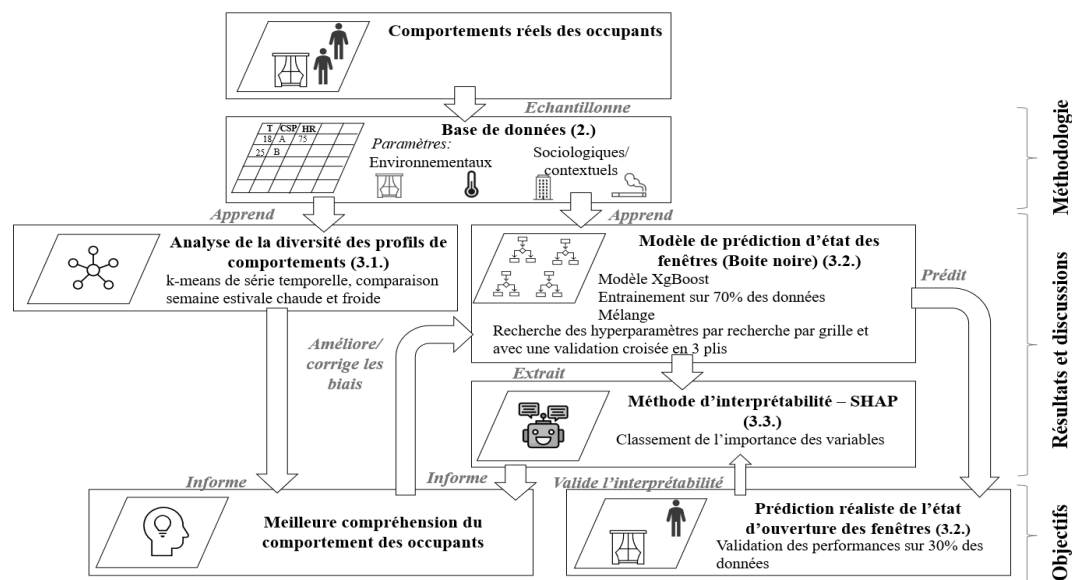


Figure 1 : Schéma explicatif de la méthodologie générale

2.2. DESCRIPTION DE LA BASE DE DONNEES

La base de données utilisée dans cette étude a été constituée dans le cadre du projet RENOPTIM copiloté par le CSTB (Centre Scientifique et Technique du Bâtiment) et l'USH (Union Sociale pour l'Habitat) qui vise à limiter le recours à la climatisation dans les logements français. Les 76 appartements ont été instrumentés de juin à fin septembre 2023, pour récolter la température et l'humidité à l'extérieur et à l'intérieur, l'état des fenêtres, ainsi que des informations sur les caractéristiques thermiques des

logements, sur les habitudes et le profil sociologique des occupants. Parmi les 19 résidences, les appartements ont été sectionnés pour essayer d'avoir un logement au rez-de-chaussée, à un étage intermédiaire et un sous les toits avec répartition de logements traversant et non-traversant de 60-40%. Le niveau de performance thermique des logements va de l'étiquette B à G avec une trentaine de logements ayant une étiquette C. La sociologie des occupants est variée, par exemple 26 occupants exercent une profession intellectuelle (CSP+), 18 sont retraités ou encore 22 occupants sont des employés. Dans cette étude, uniquement les données des chambres sont étudiées. La moitié des résidences étaient équipées d'une station météo sur le toit, pour celles non équipées, la météo de la résidence la plus proche leur a été associées. Un traitement des données a été effectué consistant à enlever les données incohérentes de capteurs (telles que des valeurs constantes, des valeurs physiquement impossibles ou des variations absurdes), à retirer les périodes d'absences longues, et à mettre toutes les données au même pas de temps de 10 minutes avec une interpolation linéaire entre deux pas de temps si nécessaire.

2.3. METHODOLOGIE DE L'ANALYSE DE LA DIVERSITE DES PROFILS DE COMPORTEMENT

Une comparaison des profils d'ouverture de fenêtres d'une période estivale dite « froide » et d'une dite « chaude » est réalisée avec une technique de clustering de K-means adaptée aux séries temporelles. Cette technique est utilisée à partir de la librairie tslearn de python et est utilisée avec le Dynamic time Warping Matching (DTW). Le nombre optimal de clusters est déterminé à l'aide du score de silhouette pour chaque période. Un test statistique du χ^2 (chi-2) est ensuite effectué pour expliquer la distribution des clusters à partir de paramètres sociologiques et contextuels.

2.4. MODELE DE PREDICTION D'ETAT DES FENETRES ET VALIDATION

Pour mieux comprendre le comportement des occupants vis-à-vis des fenêtres, un modèle capable de représenter des relations non-linéaires entre les variables avec une grande quantité de données a été construit. Pour cela, il est possible de construire deux types de modèles : un modèle d'état, prédisant si une fenêtre est ouverte ou fermée, et un modèle d'action, prédisant les changements d'état. Le modèle d'état est privilégié étant donné le faible nombre d'actions liées aux fenêtres durant l'été (Banihashemi et al. 2023). Un modèle XgBoost (eXtreme Gradient Boosting) est un algorithme gradient boosting qui est comparable à une forêt aléatoire, utilisant de nombreux arbres de décisions comme prédicteurs faibles. Contrairement à la forêt aléatoire l'erreur résiduelle de l'arbre de décision précédent est utilisée à chaque itération pour améliorer l'arbre de décision suivant. Ce type de modèle a été choisi pour ses performances, sa capacité à gérer automatiquement les données manquantes et sa capacité à gérer efficacement une grande quantité de données en évitant le sur-apprentissage. Concernant la méthodologie de construction de ce modèle de prédiction des états des fenêtres, les données sont mélangées en gardant la structure d'une journée, puis la base de données est divisée en 70% pour l'entraînement et la validation et 30% pour le test. Ensuite, une recherche par grille des hyperparamètres, correspondant aux paramètres intrinsèques du modèle, comme la profondeur des arbres ou le nombre d'arbres, est effectuée avec une validation croisée en 3 plis sur les 70% de la base de données. La validation croisée en 3 plis divise les données en trois ensembles, entraîne le modèle sur deux tiers et le valide sur le tiers restant, ce processus est répété trois fois pour améliorer l'estimation de la performance du modèle. Enfin, le modèle est testé sur 30% de données restantes en utilisant des métriques mathématiques et des métriques spécifiques au domaine tiré du travail de (Dong, Markovic, et al. 2022)).

2.5. METHODE D'INTERPRETABILITE DU MODELE DE PREDICTION

Les méthodes d'interprétabilité permettent de répondre à plusieurs objectifs : 1) Augmenter la confiance que l'on a dans le modèle en comprenant mieux son fonctionnement ; 2) Détecter des biais d'apprentissage (pour les corriger ensuite) ; 3) Améliorer notre compréhension des mesures que les modèles de Machine Learning ont pu saisir. Il a été choisi d'utiliser la méthode SHAP (Shapley Additive exPlanations) qui détermine la moyenne pondérée de la contribution marginale de chaque paramètre, issue de la bibliothèque python homonyme (Lundberg et Lee 2017). Cette méthode est choisie parce qu'elle permet à la fois de faire une interprétabilité locale (impacts des paramètres sur une prédiction du modèle) et globale (impacts des paramètres sur le comportement général du modèle) et a une implémentation très performante pour les modèles basés sur les arbres comme le XgBoost. La méthode SHAP nous permettra dans ce travail d'identifier les paramètres les plus significatifs et leurs influences globales. Dans un travail futur, elle permettra la sélection des paramètres les plus importants et l'évaluation précise de l'impact des divers paramètres dans des contextes spécifiques, offrant par exemple une meilleure compréhension de l'effet des variables clés lors d'une période de canicule.

3. RESULTATS ET DISCUSSIONS

3.1. ANALYSE DE LA DIVERSITE DES PROFILS DE COMPORTEMENTS

Le lien entre la proportion de fenêtres ouvertes (FO), la température extérieure et le moment de la journée est analysé dans cette partie à l'aide de données d'une semaine estivale « froide » et « chaude » dont les caractéristiques sont résumées dans le Tableau 1.

Tableau 1 : Résumé des températures moyennes durant les semaines estivales "froide" et "chaude"

Région	Semaine estivale « froide »				Semaine estivale « chaude »			
	Période		Température moyenne [°C]		Période		Température moyenne [°C]	
	Début	Fin	[22-6h]]6h-22[Début	Fin	[22-6h]]6h-22[
GIR	18/09/2023	24/09/23	15,8	19,4	17/08/2023	23/08/23	23,8	29,1
IDF	18/09/2023	24/09/23	15,1	17,4	03/09/2023	09/09/23	23,4	28,8
SE	18/09/2023	24/09/23	17,7	21,3	17/08/2023	23/08/23	24,5	32,3

Dans la partie gauche de la Figure 2, les courbes en pointillées mettent en évidence les différences de comportement moyen régional entre les semaines estivales « chaude » et « froide ». En semaine estivale « froide », la proportion de fenêtres ouvertes est plus élevée le matin et après 18h (55% de FO), avec des variations faibles entre les maximums et minimums en journée ainsi qu'entre les régions. En semaine estivale « chaude », la proportion de fenêtres ouvertes varie au cours de la journée, avec une forte ouverture durant la nuit et en de matinée, avec une nette réduction de 8h à 22h. Ce comportement est observé dans toutes les régions, avec quelques différences : il y a une ventilation nocturne plus importante dans le Sud-Est (90% de FO, contre 80% en Gironde et 60% en IDF), et une fermeture plus marquée en journée en Gironde (jusqu'à 40% de FO contre 60% dans le SE et 50% en IDF).

Pour analyser plus clairement la diversité des profils, une analyse par clustering de série temporelle k-means est réalisée, présenté dans la partie centrale de la Figure 2. Les scores de silhouette de la semaine estivale « froide » et « chaude » sont respectivement de 0,5 et 0,44. Pour rappel, un score de

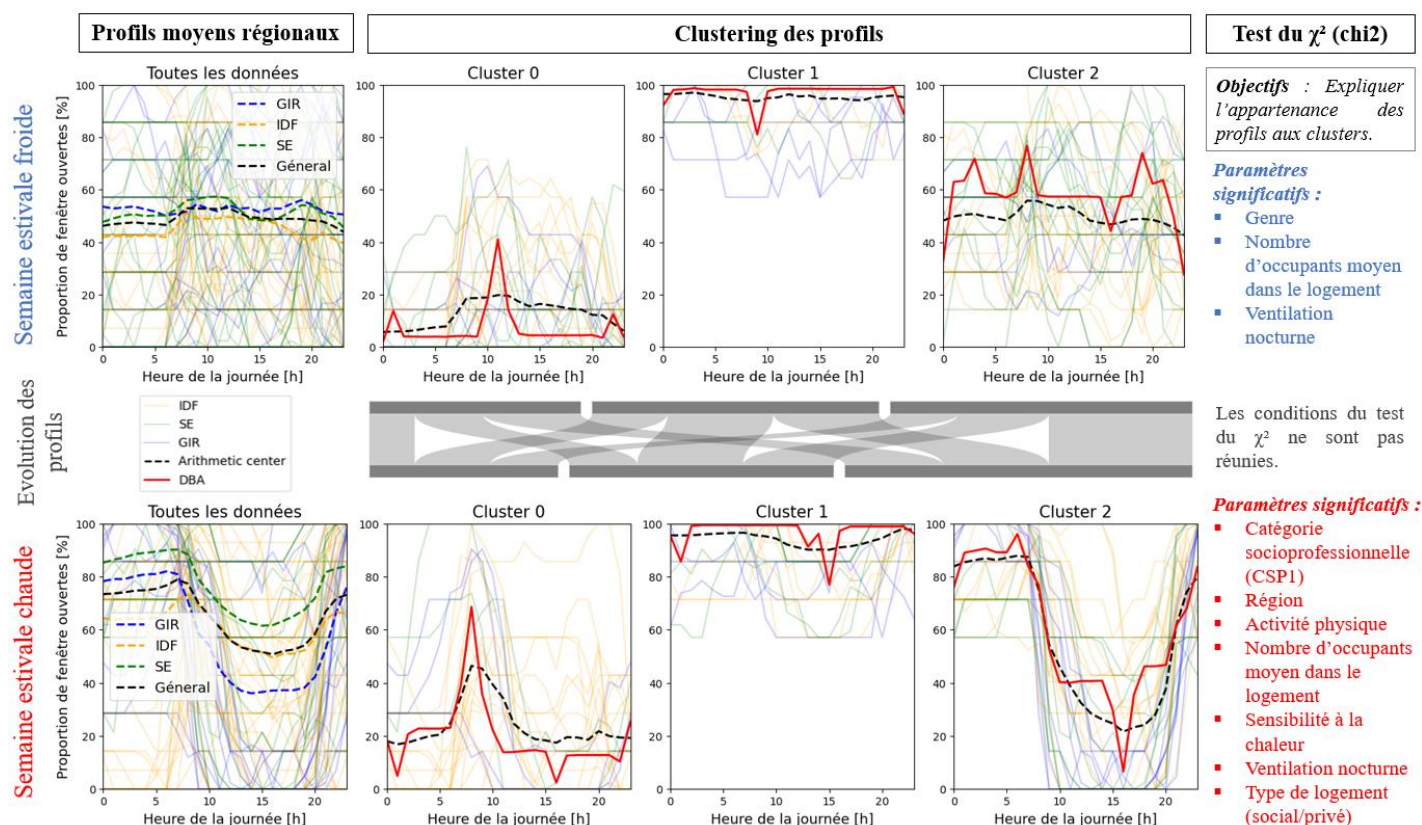


Figure 2 : Gauche : Profils moyen des comportements et moyennes régionales en pointiller. Milieu : Clusters des profils par k-means correspondant à la proportion de fenêtres ouvertes dans les chambres des logements de l'étude. Droite : Résultats du test de Chi2 à une significativité de $p < 0,05$.

Haut : Durant la semaine estivale « froide ». Milieu : Evolution des profils de la semaine estivale « froide » à « chaude » Bas : Durant la semaine estivale « chaude ».

silhouette supérieure à 0,7 est considéré comme "fort", une valeur supérieure à 0,5 comme "raisonnable" et une valeur inférieure à 0,25 comme "faible". Les clusters 0 des semaines estivales correspondent à un cluster où les fenêtres ont tendance à être fermées. On observe cependant, pour la semaine estivale « chaude » un fort pic d'ouverture entre 7h et 10h du matin. Le cluster 1 des deux semaines représente des profils qui ont tendance à garder leurs fenêtres toujours ouvertes. Le cluster 2 de la semaine estivale « froide » correspond à un profil moyen, qui a les fenêtres majoritairement fermées la nuit, et rassemble les profils qui n'ont pas pu être classés dans les deux autres clusters. Le cluster 2 de la semaine estivale « chaude » rassemble des profils qui font de la ventilation nocturne, qui a donc une ouverture des fenêtres durant la nuit et une fermeture de 8h à 21h.

Des tests du χ^2 (chi-2) ont été réalisés pour déterminer les paramètres contextuels et sociologiques qui pourraient expliquer l'appartenance des profils aux clusters en évaluant l'indépendance des paramètres par rapport aux clusters. Les résultats des tests se trouvent dans la partie droite de la Figure 2. Pour la semaine estivale « froide », les paramètres significativement influents ($p < 0,05$) sont le genre, le nombre d'occupants dans le logement et la pratique de la ventilation nocturne. Par exemple, les personnes n'effectuant pas de ventilation nocturne sont significativement moins présentes dans le cluster 1, où les fenêtres ont tendance à rester ouvertes en permanence. Pour la semaine estivale « chaude », les paramètres influents sont la catégorie socioprofessionnelle (CSP1), la région, l'activité physique, le nombre d'occupants dans le logement, la sensibilité à la chaleur, le statut du logement (social ou non) et la pratique de la ventilation nocturne. Par exemple, les habitants d'Île-de-France sont significativement

moins présents dans le cluster chaud 2, indiquant que la ventilation nocturne y est moins pratiquée que dans les autres régions. De même, les personnes déclarant être sensibles à la chaleur sont significativement plus présentes dans les clusters chauds 1 et 2 que celles déclarant ne pas l'être. Certains paramètres testés, tels que le tabagisme, la présence de moustiquaires, le bruit ou l'étage ne se sont pas révélés significatifs. Avec un nombre élevé de transitions entre clusters (9 transitions), séparant les données en trop petits groupes, le test du χ^2 n'a pas pu être appliqué sur les transitions rendant impossible l'étude des raisons du changement de comportement entre les deux semaines.

3.2. MISE EN PLACE D'UN MODELE DE PREDICTION D'ETAT DES FENETRES

Pour compléter notre analyse du comportement des occupants, des paramètres l'influençant et pour prédire l'état des fenêtres, un modèle XgBoost est construit en utilisant les données de juin 2023 à fin septembre 2023. Les hyperparamètres du modèle sont sélectionnés et fixés comme suit : taux d'échantillonnage des colonnes par arbre de 0.6, régularisation (gamma) de 0, taux d'apprentissage de 0.08, profondeur maximale de l'arbre de 10, poids minimal des feuilles de 5 et nombre d'arbres de 50. Le modèle est entraîné et inclue 32 paramètres environnementaux, contextuels et sociologiques. Les résultats montrent que le modèle parvient à prédire correctement l'état des fenêtres dans 77% des cas. Cependant, il tend à surestimer la proportion globale de fenêtres ouvertes (60% de FO prédit contre 56% réel) et la fréquence d'ouverture par jour (1,28 ouverture par jour prédite contre 0,95 réel). On considère

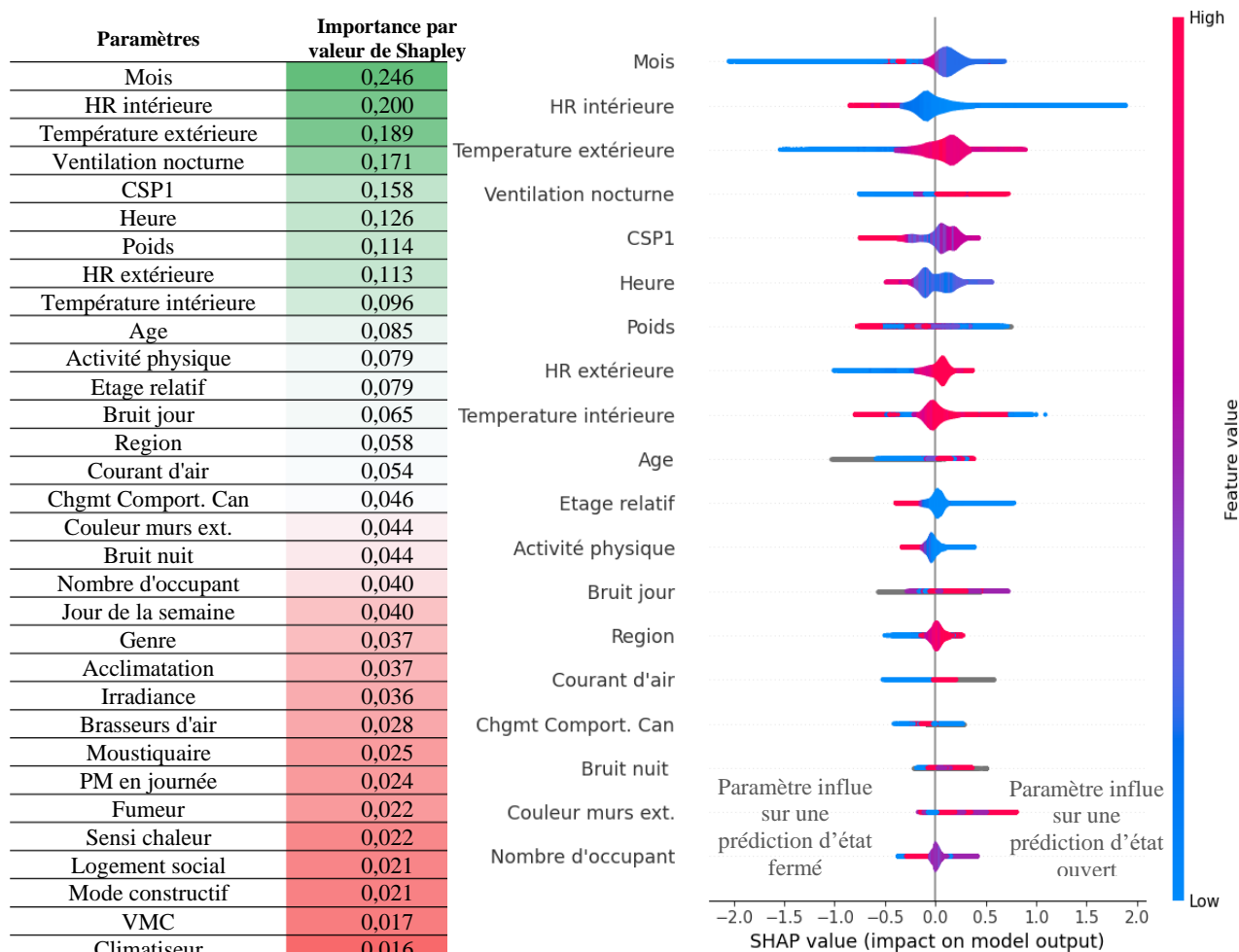


Figure 3 : Gauche : Tableau récapitulatif du classement des 32 paramètres selon les valeurs moyennes SHAP du modèle XgBoost de prédiction de l'état des fenêtres. Droite : Sens de l'influence des 19 premiers paramètres sur le modèle XgBoost de prédiction de l'état des fenêtres.

dans ce travail que le modèle prédit (70% du jeu de données) avec une précision correcte l'état des fenêtres sur les données de test (30% du jeu de données). Dans un travail futur, il sera nécessaire d'explorer plus en détail, grâce à l'utilisation de l'interprétabilité locale de la méthode SHAP les raisons des 23% d'erreurs du modèle, et pouvoir pour corriger les biais d'apprentissage possibles et avoir un modèle qui est à la fois plus performant et représentatif des données et de la réalité des comportements.

3.3. ETUDE DE L'IMPORTANCE DES DIFFERENTS PARAMETRES

Pour déterminer les paramètres les plus impactant, la méthode d'interprétabilité SHAP est utilisée sur le modèle XgBoost construit. Il est nécessaire de garder à l'esprit que les effets des différents paramètres sont représentatifs du modèle qui est, d'après l'évaluation, lui-même sensé être représentatif des données. Cependant, dans l'état actuel du modèle, celui-ci peut être sujet à des biais d'apprentissage, qui seront détectés et corrigés dans le futur à partir de la meilleure compréhension du modèle acquise à partir de l'analyse SHAP actuelle et future (voir Figure 1).

Dans le tableau à gauche de la Figure 3 se trouve le classement des 32 paramètres par ordre d'importance et à droite sont représentés l'influence (état fermé ou ouvert) des paramètres les plus importants. Voici un exemple d'interprétation des résultats : une température extérieure basse, représentée par du bleu, a une valeur SHAP négative, indiquant une prédiction plus encline à des fenêtres fermées, tandis qu'une température élevée représentée par du rouge a tendance à favoriser la prédiction des fenêtres ouvertes. La température, l'humidité extérieure et intérieure font partie des paramètres les plus importants, alors que l'irradiance globale horizontale semble beaucoup moins influente contrairement à ce qui avait été trouvé par Hostein et al. (2023). Cependant, ces résultats seraient sûrement différents si l'irradiance incidente à la fenêtre était considérée, sachant que de nombreuses études ont mis en évidence que l'orientation de la fenêtre était un paramètre important.

La catégorie socioprofessionnelle (CSP1) exerce une influence significative sur les prédictions du modèle. Les catégories intellectuelles (cadres, chefs d'entreprise...) ont un impact négatif (tendance à prédire des fenêtres fermées), tandis que les catégories associées dans le modèle à une valeur moyenne et faible, représenté par une couleur respectivement violette et bleu (resp. Ouvriers/artisans et retraités/chômeurs) ont un impact neutre ou positif sur le modèle (tendance à prédire des fenêtres ouvertes). Des hypothèses possibles sont que les catégories socioprofessionnelles induisent une différence d'occupation des logements, que les CSP sont corrélés à un type de logement, ou qu'ils impliquent des comportements différents. D'autres paramètres contextuels influencent également les prédictions du modèle, tels que l'heure de la journée, le mois de l'année, la ventilation nocturne et le bruit. Des paramètres comme la région et le bruit font partie des paramètres influents, mais ne sont pas dans le haut du classement, il serait intéressant d'étudier ces paramètres en se focalisant sur une période de forte chaleur ou la nuit avec l'explicabilité locale des valeurs SHAP.

4. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Les températures et l'humidité intérieures et extérieures influent sur le comportement des occupants vis-à-vis des fenêtres, notamment avec l'adoption de comportements adaptatifs tels que la ventilation nocturne en période de fortes chaleurs, absente en période plus fraîche au cours de l'été. D'après notre connaissance de la littérature du comportement des occupants vis-à-vis des fenêtres, notre étude est certainement celle considérant le plus de paramètres contextuels et sociologiques. Cela a permis de

confirmer le résultat d'études de la littérature indiquant que le mois, l'heure et l'âge étaient des paramètres influençant le comportement des occupants. Cela a aussi permis de déterminer des paramètres sociologiques et contextuels comme la catégorie socio-professionnelle ou le bruit comme des paramètres influençant significativement les comportements. L'identification de ces paramètres est un premier pas vers la généralisation des modèles de comportement des occupants.

Pour approfondir la recherche des paramètres influençant le comportement des occupants vis à vis des fenêtres et construire un modèle de prédiction de comportement des occupants avec les fenêtres généralisable, il sera important d'incorporer plus de paramètres concernant la physique du bâtiment comme le niveau d'isolation ou le caractère traversant des logements. Il est aussi nécessaire d'explorer l'influence locale de chaque paramètre sur une unique prédiction ou un groupe de prédiction (région, nuit/jour, périodes de chaleurs...) en utilisant les valeurs de Shapley. Ensuite, pour améliorer la performance du modèle de prédiction il serait intéressant d'utiliser et de comparer d'autres méthodes de modélisation, telles que les modèles d'action, ainsi que d'autres types d'algorithmes et les modèles actuellement utilisés en STD. De plus, poursuivre l'analyse de clustering des profils d'ouverture et comprendre l'évolution des clusters au fil du temps serait pertinent. Enfin, incorporer d'autres actions adaptatives comme la gestion des protections solaires ou l'utilisation des brasseurs d'air et d'étudier leur impact sur le confort thermique des occupants, permettrait de mieux comprendre la diversité des comportements adaptatifs mis en place pour lutter contre les fortes chaleurs.

5. REMERCIEMENT

Ce travail a bénéficié d'une aide de l'État gérée par l'Agence Nationale de la Recherche au titre du programme d'Investissements d'Avenir (réf. ANR-18-EURE-0016 – Solar Academy).

6. BIBLIOGRAPHIE

- Balvedi, Bruna Faitão, Enedir Ghisi, et Roberto Lamberts. 2018. « A review of occupant behaviour in residential buildings ». *Energy and Buildings* 174 (septembre): 495-505. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.06.049>.
- Banihashemi, Farzan, Manuel Weber, et al. 2023. « Window state or action modeling? An explainable AI approach in offices ». *Energy and Buildings* 298 (novembre): 113546. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113546>.
- Berndt, Donald J, et James Clifford. 1994. « Using Dynamic Time Warping to Find Patterns in Time Series ». *AAAI Technical Report*.
- Clevenger, Caroline M, et John Haymaker. 2006. « The Impact of the Building Occupant on Energy Modeling Simulations ». *Joint International Conference on Computing and Decision Making in Civil and Building Engineering*, 1-10.
- D'Oca, Simona, H Burak Gunay, Sara Gilani, et William O'Brien. 2019. « Critical Review and Illustrative Examples of Office Occupant Modelling Formalisms ». *Building Services Engineering Research and Technology* 40 (6): 732-57. <https://doi.org/10.1177/0143624419827468>.
- Dong, Bing, Yapan Liu, Wei Mu, Zixin Jiang, Pratik Pandey, Tianzhen Hong, Bjarne Olesen, et al. 2022. « A Global Building Occupant Behavior Database ». *Scientific Data* 9 (juin). <https://doi.org/10.1038/s41597-022-01475-3>.
- Dong, Bing, Romana Markovic, et al. 2022. « A guideline to document occupant behavior models for advanced building controls ». *Building and Environment* 219 (juillet): 109195. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109195>.
- Gondian, Léa. 2019. « Application de l'analyse de sensibilité temporelle pour la description de la réponse thermique d'un bâtiment aux actions des habitants. » Chambéry: Université Savoie Mont Blanc.
- Haldi, Frédéric, et Darren Robinson. 2008. « Stochastic / Probabilistic Modelling of Multiple Adaptive Processes: Some Subtle Complexities » 5th IBPSA-Canada Conference.
- Hostein, Mathilde, Bassam Moujalled, Marjorie Musy, et Mohamed El. 2023. « A Study of Indoor Environment and Window Use in French Dwellings Monitored during a Summer with Heatwaves ».
- Lundberg, Scott, et Su-In Lee. 2017. « A Unified Approach to Interpreting Model Predictions ». arXiv. <http://arxiv.org/abs/1705.07874>.
- Mo, Hao, Hejiang Sun, Junjie Liu, et Shen Wei. 2019. « Developing window behavior models for residential buildings using XGBoost algorithm ». *Energy and Buildings* 205: 109564. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109564>.
- Yan, Da, William O'Brien, et al. 2015. « Occupant behavior modeling for building performance simulation: Current state and future challenges ». *Energy and Buildings* 107 (novembre): 264-78. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.08.032>.

Evaluation methodology of Model Predictive Controllers for building's energy systems

Ali CHOUMAN^{*1,2}, Peter RIEDERER¹, Frédéric WURTZ²

¹ Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB),
F-06904 Sophia Antipolis, France

² Univ. Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP, G2Elab,
F-38000 Grenoble, France

*ali.chouman@cstb.fr

ABSTRACT. Climate change poses a serious threat to the Earth's ecosystems, fueled primarily by escalating greenhouse gas emissions. Among the main contributors, the building sector stands out due to its significant energy demand. Addressing this challenge requires innovative techniques in the control of energy systems in buildings. This paper deals with the formulation of a methodology designed to evaluate the performance of these controllers. The evaluation process involves the establishment of a comprehensive test protocol and a diverse set of scenarios to evaluate the controllers. Key performance indicators are used to quantify their effectiveness based on the test results. A practical case study is presented as an application to introduce this methodology, focusing on the integration of Model Predictive Controllers (MPCs) with the Dimosim thermal simulation platform. The digital twin of the Greener building in Grenoble is used as a model for emulation. The paper demonstrates the ability of the proposed methodology to test and rank MPCs in different test scenarios, providing valuable feedback on their performance capabilities. The paper highlights the importance of the developed approach in systematically evaluating and ranking MPCs for optimized building energy management.

KEYWORDS: Optimisation, Evaluation, Model Predictive Controller.

1. INTRODUCTION

One of the most critical challenges facing society today is climate change, which underscores the urgent need for substantial energy savings, particularly in terms of fossil resources. Global concern regarding the environmental impact of energy consumption has significantly grown in recent years. And since buildings account for about 38% of global final energy use (GSR for Buildings and Construction 2020), energy-efficient building control can have an important contribution. To enhance energy efficiency and adaptability in building energy systems control, advanced control devices have emerged, incorporating techniques like AI (artificial intelligence) and machine learning (Schreiber et al. 2021). These techniques lead towards the optimal management of energy systems aiming to optimize energy consumption, thermal comfort, and energy flexibility. Among the innovative energy management modules, our focus will be more on the predictive innovative control algorithm, or the MPC (Model predictive Controllers). This type of device or control algorithm aims to optimize energy management and meet the specific thermal requirements of building zones by accurately predicting and selecting optimal control strategies. In this article, we introduce a methodology for evaluating the performance of energy control systems in buildings. Through a comprehensive case study involving the coupling of control algorithms with a dynamic simulator, we utilize performance indicators to quantify the benefits of employing these algorithms and establish the first step of a ranking system for comparative analysis.

2. STATE OF ART FOR EXISTING EVALUATION METHODOLOGIES

Many reviews such as the one done by (Afram et Janabi-Sharifi 2014) compare the classical control approaches to MPC in different applications. The classical control examples shown in this study consist of the most commonly used control techniques, such as on/off control and P, PI, and PID control (Process Controllers - P, PI & PID, s. d.). In this comparative literature study, the authors expose several use cases of classical and innovative control approaches. Their findings robustly support the superiority of the MPC approach in numerous applications.

Nonetheless, translating this potential into quantifiable and comparable benefits remains a complex task. In most cases, the evaluation is done according to a predefined scenario of the test. In many cases, researchers gauge performance through metrics for a specific case of test, such as the percentage variance in energy consumption as in the study realized by (Goyal, Ingley, et Barooah 2012), or by quantifying the optimized operation costs and some thermal comfort indicators such as predicted percentage of dissatisfied (PPD) as in the study of (Huang et al. 2021).

Considering our specific focus on methodologies employed for MPC evaluation, this section provides an overview of some existing research in this domain. It is worth noting that there's a relative scarcity of research dedicated to the development of comprehensive evaluation methods. Our ultimate objective is to propose a robust methodology for assessing MPC's true potential, factoring in real-world complexities and variables, in the form of a standardized, reference evaluation method. One of the proposed methodologies in the literature is the Building Optimisation Testing Framework (BOPTTEST), established by (Blum et al. 2021) and focused on the benchmarking of control strategies in buildings. This framework presents an interesting highlight of the evaluation concepts used in the case studies of the advanced control systems in buildings' HVAC implementation. According to this review, the existing literature evaluates advanced controllers individually through case studies that differ in building types, evaluation metrics, and comparative benchmarks. The framework in BOPTTEST offers a standardized set of test cases, including building emulators, a Run-Time Environment (RTE) where the controller is coupled to the emulator, and common calculations of key performance indicators (KPIs). This facilitates the testing and evaluation of advanced controllers. One more interesting work that we will refer to is the methodology established by (Huang et al. 2021). This paper proposes a protocol used to evaluate the performance of MPC over different choices of modeling and control parameters and provides a simulation routine to achieve this evaluation. The evaluation routine proposed in this paper is based on simulation and it is automated and consists of four consecutive steps. It begins by generating the test scenario of MPC parameters, then a model identification, a control implementation of the MPC, and in the last step, metric evaluation.

Following this review of the relevant work for MPC evaluation, it is observed that a significant challenge lies in the heavy reliance on a set of predefined or case-specific tests for performance evaluation. This approach might not fully capture the controller's effectiveness across diverse and unpredictable operational scenarios. We will present in the next section our proposed approach for the evaluation followed by a case study involving the coupling of control algorithms with a dynamic simulator. Using this methodology, we propose a protocol and a set of tests for evaluation and a case study application for some scenarios of test to demonstrate the results of benchmarking two MPCs and a reactive controller.

3. METHODOLOGY FOR MPC EVALUATION

3.1 SPECIFICATIONS OF THE NEW METHODOLOGY

The evaluation of controllers for building energy systems requires a global approach that considers their operating principles, adaptability, and operation scenario. Key aspects include evaluating the learning period of the controllers, especially for algorithms with historical data training models, the prediction horizon for MPC algorithms, their performance in different building types, climates, and internal conditions, and their robustness to uncertainties. Performance metrics such as energy savings, occupant comfort, and cost-effectiveness are critical, as is an examination of user interaction and the potential for manual overrides. This comprehensive evaluation ensures that controllers are effectively evaluated for their ability to optimize building energy use, maintain occupant comfort, and adapt to changing environmental and operational conditions.

3.2 FORMULATION OF THE EVALUATION METHODOLOGY

To effectively evaluate building energy system controllers, a methodology integrating the controller with either a physical building or a detailed thermal simulation model of a building is essential. First, the methodology involves choosing a suitable building model for testing and establishing a baseline scenario for the test. Key steps include outlining the testing protocols, specifying data requirements for predictive controllers, and detailing the analysis approach for interpreting results. Objectives and key performance indicators (KPIs) like energy efficiency and comfort must be defined. In the last step, the evaluation methodology ends with the creation of a comprehensive test package that includes various scenarios capable of simulating the possible internal and external environmental conditions, building characteristics, and potential disturbances. This approach ensures that the robustness of controller performance is thoroughly evaluated against a baseline scenario and in varied conditions. In addition, a critical validation step confirms the accuracy of the evaluation outcomes. Through this methodology, controllers can be effectively ranked and compared on a multi-criteria basis, providing valuable conclusions about their efficacy.

3.3 TEST PROTOCOL AND SCENARIOS

The proposed evaluation process of control algorithms involves several steps as shown in Figure 1:

- Select the thermal zone where the control algorithm will be implemented, which could be either a real building or a numerical thermal model, as in our case study;
- Determine the scenario of the test by selecting the periods of training and operation, the duration of the test, and the horizon of predictions, in case of using a predictive controller. This step ensures that the test conditions are accurately defined and consistent across all tested algorithms;
- Select the control algorithm to be coupled with the thermal model. In our case study, we have the two developed MPC algorithms and a reactive controller for illustration purposes;
- Couple the algorithms to the model where the algorithm will have complete control over the energy systems of the thermal model during the operation duration, by imposing the set-point temperature on those systems.

- Once the coupling process is completed, a simulation is launched, and the algorithm takes control of the energy systems of the model for the test duration;
- After the simulation is completed, the results necessary for the key performance indicators (KPIs) calculations are collected and used to determine the numerical values of the indicators;
- The final step is to rank the algorithms based on their performance, a radar chart plot is used to visualize the field of domination of each controller among the evaluation indicators. This method ensures that the evaluation process is objective (no ponderation used for the indicators) and can be easily understood. The results obtained from the evaluation of multiple algorithms are used to rank the controllers based on their scores for each KPI.

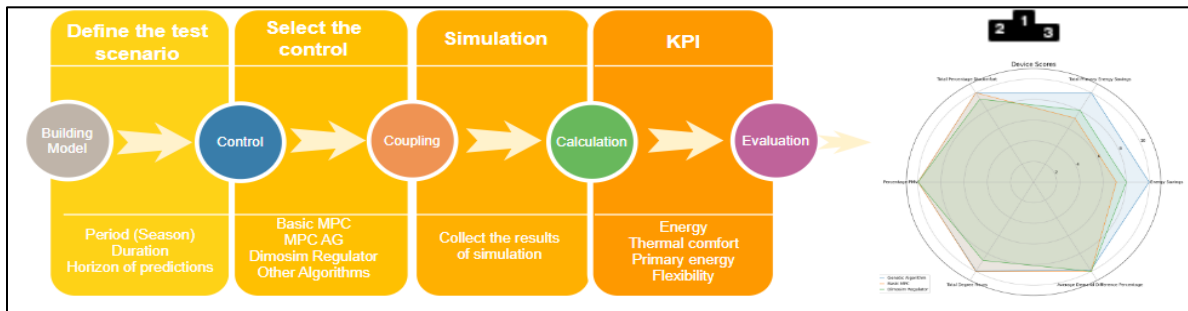


Figure 1: A flowchart for the protocol proposed in the methodology of evaluation.

The described protocol will be systematically applied across a range of crucial scenarios for validating the effectiveness of the controllers. This approach involves a comprehensive examination of the algorithms across a diverse set of conditions. A battery of possible scenarios of testing is defined for this purpose. The scenarios consider different internal conditions (internal gains and occupancy profiles), external conditions (weather scenarios), and building characteristics (envelope, usage type, etc.), besides different possible disturbances and occupants' actions. This testing process aims to ensure that the algorithms are not only effective in a single, specific scenario, but are also robust under a wider range of different conditions. And thus, ensuring that our approach applies generally and isn't limited to specific situations or scenarios.

Depending on the control variable being controlled by the algorithm of control (air temperature, air quality, DHW, etc.), our methodology outlines various scenarios that affect these control variables. In this section, we will present examples of scenarios tailored to room temperature control within a specific zone. These examples will serve as the basis for further testing of algorithmic aimed at optimizing indoor air temperature, as will be presented in the following case study section.

The scenarios outlined are designed to test temperature control algorithms within buildings, focusing on how different variables influence energy systems' performance and indoor environment quality. The scenarios include two categories of variables: static and dynamic. Static variables include characteristics that do not change over time, such as the building's envelope U-value (both opaque and transparent elements), the percentage of external facades, building inertia, floor position, zone orientation, window-to-wall ratio (for solar gains scenarios), insulation positioning, building type, and heating or cooling system efficiency. On the other hand, dynamic variables are subject to change and are mostly stochastic. These include occupancy profiles, internal gain profiles, operation of openings (doors and windows), use of blinds (whether manually controlled or left to occupant discretion), occupant-modified settings (temperature, humidity, CO2 levels), uncontrolled ventilation rates, and weather conditions.

By testing control algorithms against combinations of static and dynamic variables, we are considering both the predictable aspects of building performance and the unpredictable nature of human behavior and environmental conditions. Thus, this approach identifies a wide range of conditions to test the algorithms.

3.4 KEY PERFORMANCE INDICATORS (KPIs)

Key Performance Indicators (KPIs) are a set of measurable parameters that are used to evaluate the performance of a control algorithm or product regarding the results of its implementation. The selection of KPIs for a specific MPC is based on the objectives and requirements of the energy management system. Therefore, KPIs play a crucial role in evaluating the performance of the MPC by providing quantitative measurements of its effectiveness in meeting the desired objectives. These KPIs can be further broken down into sub-KPIs such as peak demand, setpoint deviations, and temperature fluctuations. The KPIs defined in this methodology are derived from the European project Collectief (COLLECTiEF 2021), which leads to implementing innovative control technologies in buildings to improve building energy performance and contribute to global climate and energy goals. The selected KPIs can be classified into four main categories, with some sub-KPIs for each category. The four main categories of KPIs are energy savings, primary energy savings, comfort analysis, and flexibility analysis. For each KPI, a set of sub-KPIs are defined such as the percentage of energy saved, cost savings, percentage of time outside the comfort temperature range, peak power reduction during demand response event, etc. Other qualitative KPIs could be also used such as the amount of historical data required to train the optimization model in the algorithm, and the time needed for computation.

4. CASE STUDY : AN INTRODUCTION TO THE USE OF DEFINED METHODOLOGY IN ALGORITHMS EVALUATION

This section's case study showcases the ability of our developed protocol to evaluate and comparatively rank various controllers through a multi-criteria approach. The case study presents a baseline evaluation scenario for the controllers under review, leading to an initial ranking presented in the form of a radar chart. It's important to note that the rankings displayed are preliminary and will be validated against a series of defined scenarios in subsequent studies, which will lead to the final evaluation of the algorithms. This approach underscores the importance of robustness in controller performance across varying operational conditions.

4.1 BUILDING MODEL

The selection of a case-study-building model is crucial in ensuring that the results of the study are relevant and accurate. In this context, the Predis-MHI zone of the Electrical Engineering Lab at Grenoble University (G2ELab) was chosen due to its suitability as a testbed for evaluating different control strategies. This studied zone is a living lab and it is situated on the fourth floor of the Green'ER building, which is located in Grenoble, France (Delinchant et al. 2016). In a related article, we presented the procedure adopted to create and calibrate a thermal model of the building, using the interesting amount of data and measures available due to its monitoring system. The calibration ensures that the model reflects the thermal behavior of the building. The simulation would be ruled by Dimosim (Garreau et al. 2021), which is a bottom-up dynamic simulation platform for energy systems in buildings and districts developed since 2013 by the CSTB (www.cstb.fr). This tool is built on an object-oriented structure.

4.2 CONTROL ALGORITHMS

The case study involves developing MPC algorithms that produce a control strategy leading to minimizing energy consumption while maintaining thermal comfort levels in a given zone. The algorithms are coupled to Dimosim emulator to test their performance. The outdoor temperature and solar gains that can affect the temperature evolution in the zone are anticipated by the algorithms within the prediction horizon, offering the algorithms the flexibility to pre-react regarding the predicted variable impact, while satisfying optimization constraints. Anticipated occupant profiles are also considered to prevent thermal discomfort during the operation. The algorithms were developed to optimize the value of the temperature set point and manage the energy systems of the zone. The interaction between the algorithm and the emulator is bi-directional, with the controller receiving the initial states of the thermal zone from the emulator at the beginning of each prediction horizon, and sending the control strategy after data treatment.

In our case study, we developed two MPC algorithms that will be compared to the reactive controller already implemented in Dimosim simulation platform. For developed algorithms, the first is a basic predictive combinatorial algorithm. The algorithm predicts the internal and external conditions in the thermal zone for a horizon of time. Then, it proceeds to test various combinations of temperature set-point vectors over the predicted time horizon. The algorithm identifies after that the optimal solution that minimizes energy consumption without compromising thermal comfort within the thermal zone. The second controller is based on a genetic algorithm to overcome the limitations of the combinatorial approach in generating and testing control possibilities. This algorithm uses a genetic algorithm to minimize an objective function as the optimization is described as a mathematical problem. The optimization problem involves minimizing an objective function that takes into account both energy consumption and thermal comfort while dealing with flexibility signals. To achieve this optimization, the algorithm perfectly predicts the state variables of the controlled system, thus, the algorithm has full access to the emulator's data, ensuring that the MPC has complete knowledge of the parameters and internal conditions in the emulator, to which it is expected to provide a control strategy.

4.3 SCENARIO OF TEST

For this first application of the methodology, the baseline scenario used for the test is defined as follows, a week of operation in the heating season. Real weather data are used for the test, and the baseline model of the building is coupled with the MPCs. For both developed MPCs, the horizon for predictions is set to be 6 hours with hourly time step for operation. This scenario is a baseline scenario and its results of evaluation will be validated using a set of scenarios including different weather, building envelopes, and operation periods scenarios, to test the robustness of the controller with the variation of the test conditions.

4.4 RESULTS AND DISCUSSION

As shown in the proposed methodology, after choosing the model and the scenario test, besides the algorithms to be tested and ranked, each algorithm is coupled with the DIMOSIM emulator to assess its performance. The results of the baseline scenario are shown in Figure 2.

The results of both algorithms are used to calculate performance indicators based on optimization objectives to quantify the gains of their implementation. The results are compared to the results of the reactive regulator implemented in the emulator (Dimosim), which serves to maintain the temperature

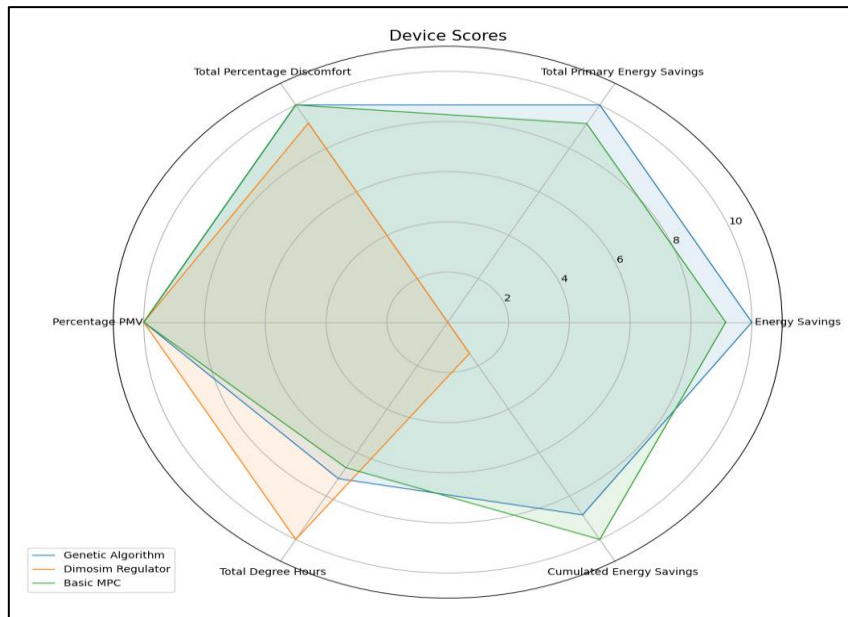


Figure 2: Radar chart shows the scores of the evaluated devices according to some KPI for the baseline scenario.

around its set point, without any way to predict future behavior. Our method involves rating KPIs on a scale of 0 to 10 in the radar chart. The highest performance achieved is set at 10, and all other values are normalized relative to this top score, representing their scores between 0 and 10. The results of the baseline scenario underline that the developed Model Predictive Controllers (MPCs) outperform the reactive control in terms of both energy savings and comfort, in addition to their responsiveness to flexibility signals, except for Total Degree Hours sub-KPI which represent the time and magnitude of temperature deviation outside of the comfort range ($^{\circ}\text{C}\cdot\text{hour}$). The importance of these results lies in the ability of the introduced protocol to evaluate and rank several controllers under the same conditions using a multi-criteria approach. It's important to note that the ranking provided in this study is primarily intended to demonstrate the effectiveness of the method in evaluating and classifying controllers. Future work will involve testing these controllers in different scenarios, as previously discussed, to accurately confirm their rankings. This upcoming phase will focus on creating a comprehensive set of scenarios that include a wide range of profiles and variables for the validation of calculated performance.

5. FUTURE WORK

As mentioned before, the next phase is to validate the results of the baseline scenario by conducting further testing with the various scenario combinations outlined in Section 3.3. Given the large number of possible scenario combinations, a critical future direction is to optimize the testing process. This involves conducting a detailed analysis to identify the parameters that have the most significant impact on the scenarios. The goal is to identify a refined set of scenarios to test, optimizing the validation process for the calculated performance metrics. This approach not only ensures the robustness of the performance evaluation but also increases the efficiency of the methodology by focusing on the most influential variables. Future work includes also introducing additional methods for ranking and analysis such as Pareto graphs to see the interaction between the KPIs when evaluating the performance of controllers.

6. CONCLUSION

This study presents an introduction to a methodology for evaluating innovative energy management systems and control strategies in building environments, a case study is presented also to show the adopted protocol application mechanism for a baseline scenario. The primary objective is to establish a robust evaluation protocol and a comprehensive set of tests. These measures are critical to accurately assess performance levels and facilitate multi-criteria comparison to effectively rank different control systems. The variety of tests in the proposed method prevents that control algorithms may be tuned to detect and perform optimally only under certain test conditions, and thus may not reflect true operational performance (analogy to the "Dieselgate" scandal (Palmer et Schwanen 2019)). Our methodology is designed to ensure a transparent and fair assessment by covering a wide range of operational scenarios.

7. REFERENCES

- Afram, Abdul, et Farrokh Janabi-Sharifi. 2014. « Theory and Applications of HVAC Control Systems – A Review of Model Predictive Control (MPC) ». *Building and Environment* 72 (février): 343-55. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.11.016>.
- Blum, David, Javier Arroyo, Sen Huang, Ján Drgoňa, Filip Jorissen, Harald Taxt Walnum, Yan Chen, et al. 2021. « Building Optimization Testing Framework (BOPTTEST) for Simulation-Based Benchmarking of Control Strategies in Buildings ». *Journal of Building Performance Simulation* 14 (5): 586-610. <https://doi.org/10.1080/19401493.2021.1986574>.
- COLLECTiEF. 2021. « COLLECTiEF ». 2021. <https://collectief-project.eu/>. Horizon H2020-LC-SC3-EE-2020-2, n° 101033683.
- Delinchant, Benoit, Frédéric Wurtz, Stéphane Ploix, Jean-Luc Schanen, et Yves Marechal. 2016. « GreEn-ER Living Lab - A Green Building with Energy Aware Occupants ». In *Proceedings of the 5th International Conference on Smart Cities and Green ICT Systems*, 316-23. Rome, Italy: SCITEPRESS - Science and Technology Publications. <https://doi.org/10.5220/0005795303160323>.
- Garreau, Enora, Yassine Abdelouadoud, Eunice Herrera, Werner Keilholz, G.-E. Kyriakodis, Vincent Partenay, et Peter Riederer. 2021. « District MODeller and SIMulator (DIMOSIM) – A Dynamic Simulation Platform Based on a Bottom-up Approach for District and Territory Energetic Assessment ». *Energy and Buildings* 251 (novembre): 111354. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111354>.
- Goyal, Siddharth, Herbert A. Ingley, et Prabir Barooah. 2012. « Effect of Various Uncertainties on the Performance of Occupancy-Based Optimal Control of HVAC Zones ». In *2012 IEEE 51st IEEE Conference on Decision and Control (CDC)*, 7565-70. Maui, HI, USA: IEEE. <https://doi.org/10.1109/CDC.2012.6426111>.
- GSR for Buildings and Construction. 2020. « 2020 Global Status Report for Buildings and Construction | Globalabc ». 2020. <https://globalabc.org/resources/publications/2020-global-status-report-buildings-and-construction>.
- Huang, Sen, Yashen Lin, Venkatesh Chinde, Xu Ma, et Jianming Lian. 2021. « Simulation-Based Performance Evaluation of Model Predictive Control for Building Energy Systems ». *Applied Energy* 281 (janvier): 116027. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.116027>.
- Palmer, James, et Tim Schwanen. 2019. « Clearing the Air after “Dieselgate”: Time for European Regulators to Experiment with Participatory Governance ». *The Geographical Journal* 185 (2): 237-42. <https://doi.org/10.1111/geoj.12294>.
- Process Controllers - P, PI & PID. s. d. « Process Controllers - P, PI & PID ». Consulté le 30 octobre 2023. https://www.engineeringtoolbox.com/process-controllers-d_499.html.
- Schreiber, Thomas, Christoph Netsch, Marc Baranski, et Dirk Müller. 2021. « Monitoring Data-Driven Reinforcement Learning Controller Training: A Comparative Study of Different Training Strategies for a Real-World Energy System ». *Energy and Buildings* 239 (mai): 110856. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.110856>.

Thermal modeling and calibration of Greener building in Grenoble

Ali CHOUMAN^{*1,2}, Etta GROVER-SILVA¹, Enora GARREAU¹, Muhammad Salman SHAHID², Peter RIEDERER¹, Frédéric WURTZ²

¹ Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB),
F-06904 Sophia Antipolis, France

² Univ. Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP, G2Elab,
F-38000 Grenoble, France

*ali.chouman@cstb.fr

ABSTRACT. In the evaluation of advanced building management and control systems, the accuracy and reliability of the building's thermal simulations are very important. They are key to developing and testing new energy management strategies. The study presents the modeling process for the Greener building in Grenoble, including the numerical thermal model creation, and calibration of the numerical model with measured data. The main objective of this study is to accurately simulate the thermal dynamics of the building, allowing the evaluation of efficient energy management and control strategies. The numerical model creation requires the collection and analysis of various types of data, all of which are essential for achieving a realistic and functional model. These data include local weather conditions, thermal properties of the building materials, measured energy consumption profiles, recorded temperature data, etc... To enhance the model's accuracy, a calibration process is undertaken using a tool developed by the CSTB using data collected from a large set of measurement sensors and energy meters in the living lab zone of the Greener building. The calibration tool allows the adjustment of model parameter values through comparison with measured data, ensuring that the model accurately reflects the actual thermal behavior of the building.

KEYWORDS: Thermal Modeling, Data Collection, Model Calibration.

1. INTRODUCTION

This research highlights the importance of data collection and data precision for calibration in the development of a reliable thermal model, and its importance for testing predictive control algorithms. The coupling of a calibrated model with simulated energy management algorithms provides an effective methodology for evaluating and ranking various control algorithms according to their performance criteria. It also opens new perspectives for improving building energy efficiency and contributes to the development of innovative control techniques.

The study focuses on the Greener building in Grenoble (Delinchant et al. 2016), a benchmark for sustainable architecture, to present a comprehensive thermal modeling process encompassing model creation, calibration, and application of the model to evaluate predictive control algorithms. The primary goal is to simulate the building's thermal dynamics with high accuracy and ensure that simulations align closely with real-world measurements. This research underscores the significance of collecting and analyzing diverse data sets, including local weather conditions, thermal characteristics of building materials, energy consumption patterns, and recorded temperature data.

The calibration process is an essential part of the study. It uses the Caliente tool (**CAL**ibration for **EN**rgy consump**T**ion in **EX**isting buildings) created by CSTB. This tool uses data from many sensors in the Greener building to calibrate the model and make sure it accurately matches the building's real thermal activity. Overall, this research highlights the importance of data collection and their precision for the calibration of a reliable thermal model.

2. CALIBRATED MODELS IN CONTROL ALGORITHMS TESTS

The calibration of models to accurately represent the thermal behavior of buildings has drawn considerable attention in recent academic studies, particularly for the evaluation of control algorithms. For instance, (Ma et al. 2012) explored the efficiency of Model Predictive Controllers (MPC) when applied to HVAC systems to reduce energy and demand costs in simulated commercial buildings. The approach involves a simulated multi-zone commercial building with a variable air volume (VAV) cooling system built in EnergyPlus. A significant part of the research is dedicated to system identification to establish accurate thermal models. This step is critical for the performance and reliability of the MPC algorithm, as it ensures that the model closely reflects the real-world performance of the building's HVAC system.

Similarly, a study by (Široký et al. 2011) concentrates on minimizing energy consumption in building heating systems by integrating advanced control techniques like MPC. The study outlines two approaches to building modeling: statistical and RC (Resistance-Capacitance) modeling. The choice of modeling approach depends on data availability and building physics knowledge. The article suggests that large measurement data sets lend themselves to a statistical approach for building modeling, which is preferred for creating MIMO (multiple-input multiple-output) system models. In a related context, (Wetter et al. 2020) explored building energy simulation through the Spawn project, integrating Modelica and the Functional Mockup Interface for detailed co-simulation. This project enhances model predictive control by linking control models with EnergyPlus for comprehensive building analysis.

Building on these foundational studies, the current research aims to create a use case by applying several innovative control strategies to the Greener building in Grenoble, to quantify their performance and evaluate them in terms of effectiveness. Therefore, the present study, while drawing inspiration from these previous works, aims to establish its specific use case by creating and calibrating a building thermal model.

3. GREENER BUILDING: CASE STUDY BUILDING OVERVIEW

3.1. BUILDING PROFILE

3.1.1. Overview: An architectural synopsis

The building selected for this study is the “Greener” building located in Grenoble (Delinchant et al. 2016). Greener is a five-floor building, built in June 2015, with a floor area of 22717 m², and a capacity of accommodating about 2000 occupants. The building hosts the electrical engineering lab in Grenoble, G2ELab, and INP ENSE3 university. It also includes a library and a university restaurant.

G2ELab is the Electrical Engineering Laboratory of Grenoble-Alpes University, and it is located on the southern side of the fourth floor of Green-er. The total surface of the lab is 357 m², and it consists of six offices, an experimentation area, a student hall, and corridors.

3.1.2. Data availability

The Greener building selected for our thermal modeling study stands out for the extensive availability of detailed plans and technical documentation. These resources are valuable in constructing a comprehensive thermal model. The building's plans provide precise footprints and layouts, essential for accurately modeling the spatial dynamics of thermal behavior. Additionally, the technical reports accompanying the building offer a wealth of information on the construction specifics, including the characteristics of the building envelope, walls, and windows. This data is crucial in understanding the

heat transfer properties and insulation qualities of the structure. After the creation of the model using the footprints of the building, the selection has been refined and concentrated on the lab (G2ELab) thermal zone.

3.2. THERMAL CHARACTERISTICS AND ENERGY SYSTEMS

3.2.1. Building envelope

Regarding the building envelope, the interior walls consist of lightweight interior partitions formed by an air gap surrounded by two layers of plaster. For the exterior walls, the composition includes cladding, an air gap, insulation, and a layer of heavy concrete (from external to internal surface). The ground floor is constructed with insulation and heavy concrete. The exterior roof is composed of polyurethane insulation and heavy concrete. In terms of the windows, double-glazed Argon-filled windows are utilized.

3.2.2. Energy systems

To maintain thermal comfort in the laboratory, a combination of ventilation, heating, and cooling systems is implemented. Ventilation is provided by fresh air delivered through a central Air Handling Unit (AHU), located on the building's rooftop and supplemented with a central water coil for air preconditioning (Figure 1). For temperature control, there are two primary sources:

1. **Air Preconditioning:** At the AHU level, a coil system preconditions the air, serving both heating and cooling purposes. This preconditioned air is then distributed throughout the lab.
2. **Room-Specific Temperature Adjustment:** Each room is fitted with a terminal coil, that allows for the adjustment of the room temperature.

Additionally, a reversible hydronic ceiling system is installed in each room. This system connects to the district heating network for heating in the winter and to local chillers for cooling in the summer, ensuring a comfortable environment year-round.

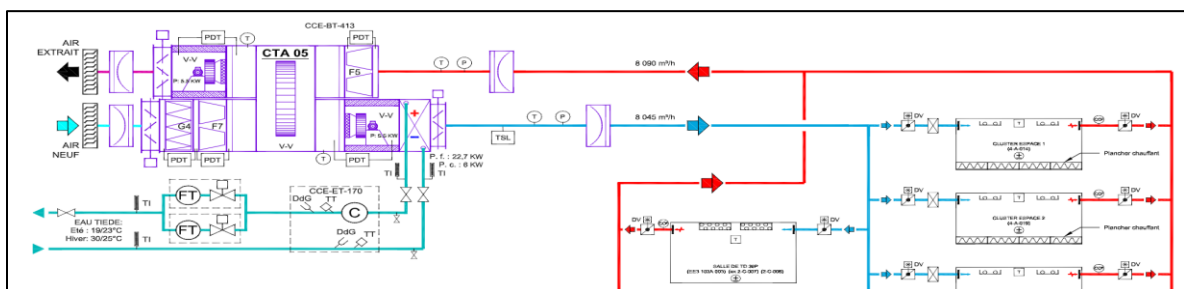


Figure 1: The Air Handling Unit (CTA 05) layout and its connection to the rooms in the living lab zone.

4. METHODOLOGICAL FRAMEWORK FOR THERMAL MODEL CREATION AND CALIBRATION

4.1. DIMOSIM MODEL AND ZONING

The simulations are carried out using DiMoSim (District Modeller and Simulator) (Garreau et al. 2021), which is a bottom-up dynamic simulation platform for energy systems in buildings and districts developed since 2013 by the CSTB (www.cstb.fr). This tool is built on an object-oriented structure. The building and energy component (production, storage, networks) models are based on physical description. The necessary input data for the Dimosim model encompasses several key elements. This includes a weather data file (in .epw format), which provides detailed meteorological information. Additionally, simulation parameters are required. In addition, a Geojson-type file detailing key building

characteristics, such as opaque and transparent envelope properties, along with the building's energy system type and geometry, is essential for model creation.

The building model was divided into four main thermal zones as shown in Figure 2: the principal one, which is the lab (G2elab), three other zones representing the rest of the floor containing the lab, the floor above the study zone, and the last one is the zone presenting the three floors below the lab zone (Greener 0, 1, 2). The focus of the study, the G2ELab zone, comprises a total of eight distinct areas, including six shared offices, a specialized experimental zone for laboratory activities, and a university classroom. To effectively analyze the thermal dynamics of the lab zone, an aggregated modeling approach is adopted: all eight zones into a single, unified thermal zone.

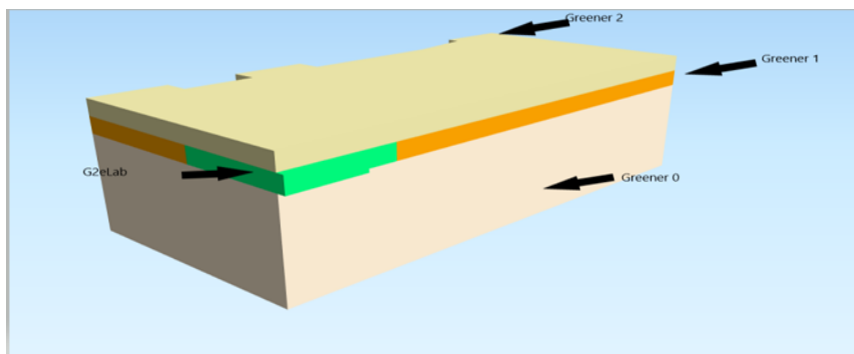


Figure 2: Qgis 3D building model view (<https://www.qgis.org/fr/site/>).

4.2. EMPIRICAL CALIBRATION

4.2.1. Data collection

The essential data for the Geojson file, including the building's footprints and the thermal attributes of its walls and windows, are extracted from the building's technical documentation. Additionally, a new meteorological (Meteo) file is created using data gathered from the meteorological station situated on the roof of the building. This incorporation of actual weather data ensures that the building's environmental conditions are accurately reflected and utilized in the analysis.

Furthermore, to accurately calibrate the model, it's important to quantify both the total heating and cooling consumption of the lab and the individual energy consumption of each office. To facilitate this, an extensive dataset was collected from the lab's database, recording energy and temperature sensor readings from June 2015 to 2022. We note that all of the data used in the study from the lab sensors will be published soon in Open Source.

4.2.2. Calibration scenarios and simulation results

Our initial evaluation of the newly developed thermal model concentrated on a mono-zone model, treating the entire laboratory as a single thermal zone. The procedure adopted is to improve the data input for the thermal model to more accurately reflect the actual building's conditions. To accomplish this, we initiated a series of simulation scenarios, starting with a basic set of hypotheses. As we progressed and observed discrepancies between the simulation results and the actual recorded data, both in terms of dynamic behavior and absolute thermal consumption, we progressively improved the quality of the model's input data, trying to accomplish a manual calibration benefiting from the certain values of parameters provided from the lab database. This process of improvement continued until we used all available data to reduce the gap between simulated and observed results, in this process, one scenario corresponds to a set of input variants. In this section, we will present the best results we get for the

empirical calibration. The scenario providing those results is outlined as follows: Information regarding the building's envelope, such as insulation and thermal properties, is derived from technical reports. For the air change rate, we've adopted the actual hourly values measured during the study period. We collected the actual recorded airflow for each room in the study zone from the local airflow meters and then aggregated these individual measurements. The weather file is created using exterior temperature, with global, diffuse, and direct solar radiations recorded in the local weather station. Actual temperature readings from meters within the zone are used to create dynamic setpoint profiles, rather than using fixed profiles for economy and comfort setpoints. This approach incorporates the maximum amount of data available and refines the model to better reflect the actual conditions in the building. The results of the simulations are shown in Figure 3.

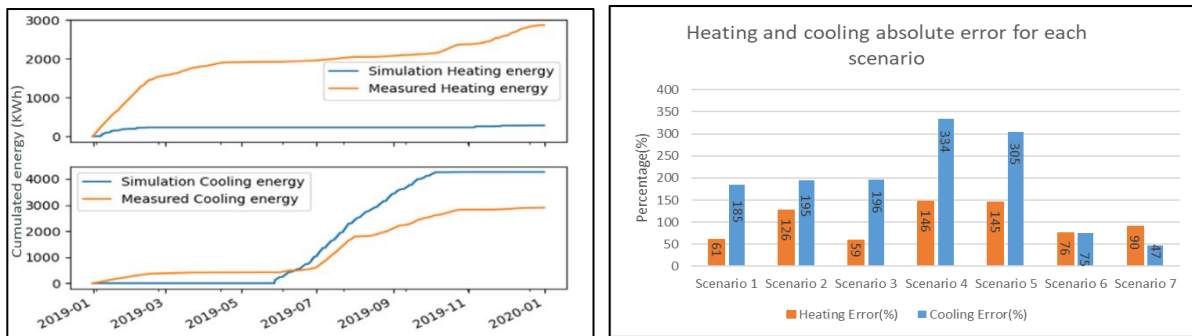


Figure 3: To the left: Monozone simulation calibration results for the year 2019, with the maximum amount of data available for model input (scenario 7).

To the right: Errors calculated between nominal values of heating and cooling energy for each scenario of inputs.

In concluding the simulation of various scenarios as shown to the right in Figure 3, we have drawn two main conclusions from the analysis. First, having access to a large amount of data was generally advantageous, sometimes leading to a reduction in the discrepancy between simulated and actual consumption, as we can see, for scenario 7 with the maximum use of data, the absolute error between simulated and measured energy consumption reached 90% for heating and 47% for cooling. However, introducing all available data as input parameters can increase the complexity of the problem. We observed that in some cases, scenarios with less data input resulted in lower discrepancy errors during the heating season (scenarios 1 and 6), and similar results were noted for the cooling season when compared to scenarios using a full available data set. This suggests that the interplay and individual impact of various data on heating and cooling can add complexity to the simulation. Second, data quality is a significant challenge in our efforts to align simulation outcomes with actual measurements. An example of a potential issue is the performance of cumulative energy meters, which log data upon reaching a specific threshold rather than at consistent time intervals. This characteristic could have influenced the discrepancies between our simulated results and the recorded energy consumption. Furthermore, in our study, as mentioned earlier, the data has been resampled to a one-hour time step, a process that carries the risk of data loss, having the raw data time step different from one hour.

Based on these conclusions, we will present "Caliente", a tool developed by the CSTB to calibrate Dimosim models using baseline consumption data as in our study. The intricacies of this tool and its application to our model calibration will be explained in the following section of the article.

4.3. CALIENTE CALIBRATION TOOL

In the second part of our study, we will use a different method to calibrate our model by using a specific calibration tool named "Caliente", created by CSTB. An article describing in details this tool will be published soon. In this article, we will explain briefly and in general how to use this tool on our Greener thermal model for calibration.

4.3.1. General overview about calibration methodology in Caliente

Caliente is a generic calibration package (Python) for the calibration of building energy simulation tools. In this case study, this package has been adapted and updated for the Dimosim simulation tool. The calibration can be done with measured energy data, at an aggregated level (annual results) or dynamic level (monthly, hourly or sub-hourly time series)

The calibration of buildings parameters can be done using the following mechanism: Initially, it details the building's thermal properties and occupancy. Next, baseline data such as building conditions and energy consumption are supplemented with weather data. A sensitivity analysis then identifies critical parameters and their uncertainties, which are finally used in the calibration phase, where uncertainties and baseline errors are fine-tuned to create a calibrated input file for simulations.

4.3.2. Greener model calibration using Caliente

As stated before, the living lab zone is equipped with a huge number of sensors and meters, for single zones and also for groups of zones. Measured data to be used includes the total heating and cooling load of the centralized air-handling unit (AHU) as well as the heating and cooling loads of reversible hydronic ceiling panels in each zone. The calibration was performed dynamically on the total thermal heating and cooling load of the building. The model has considered the G2ELAB building but also surrounding buildings to properly calculate the solar irradiation exposure due to the shading of surrounding buildings. A sensitivity analysis was performed to identify the modeling parameters with the most significant impact on calibrating the heating and cooling demand.

4.3.3. Model calibration performance

As stated before, the objective of the calibration is to reduce the uncertainty in the input parameters and tune them to have simulation results close to the baseline reference data. For this purpose, different standardized statistical indices can be used for the calibration, depending on the type of results to be evaluated and the objectives of the calibration. In this case study, the index used for the calibration is the Normalized Mean Bias Error (NMBE). This error is applied to the entire time series of one year (2019) where the difference between measured and simulated values is calculated and averaged over the whole time series and then normalized. The simulations with different parameter combinations are analyzed to reduce this error by adjusting the input parameters. For the calibration model performance, the normal mean bias error for the heating demand was calculated to be 2.56% and -13.99% for the cooling demand. The best results obtained from using the calibration tool are shown in Figures 4 and 5.

4.3.4. Results discussion

The graphs in Figures 4 and 5 demonstrate that using the Caliente tool significantly narrows the gap between the actual measured data and the simulated data in the thermal model. Although the simulated model doesn't exactly match the reference in terms of energy used at each time step, its general trend closely follows the actual consumption. This similarity suggests that the calibrated model accurately represents the real building's thermal behavior, making it suitable for testing and assessing control algorithms. It is important to note that in this study, the calibration of another multi-zone model is realized. For this model, each room is considered a thermal zone, which complicates the calibration process when taking into account variables zones conditions, or consumptions. An energy consumption peak around autumn is poorly represented by the model. This could be an effect of a certain part of the building with minimal sun exposure needing to start heating their zones earlier than the rest of the zones in the building. Since only a single zone is modeled, these effects are not calculated by the model.

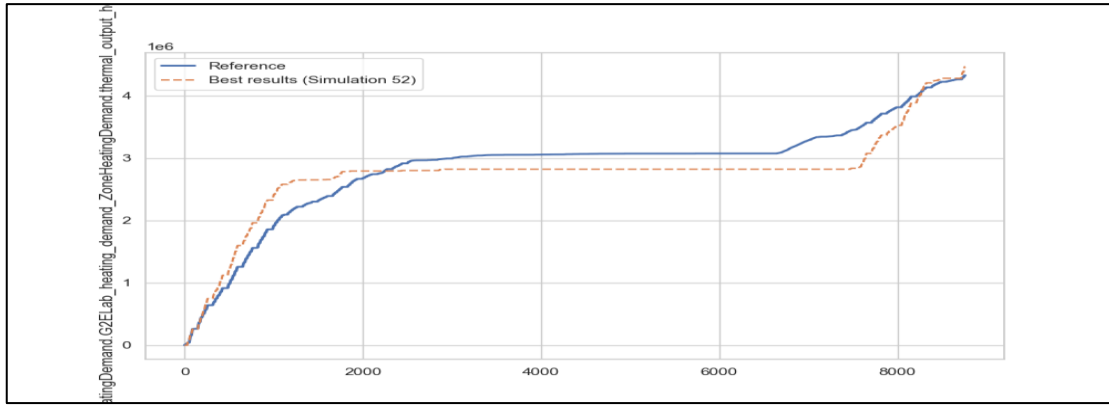


Figure 4: Best result of heating season calibration for one year period with 15 variants of parameter combinations.

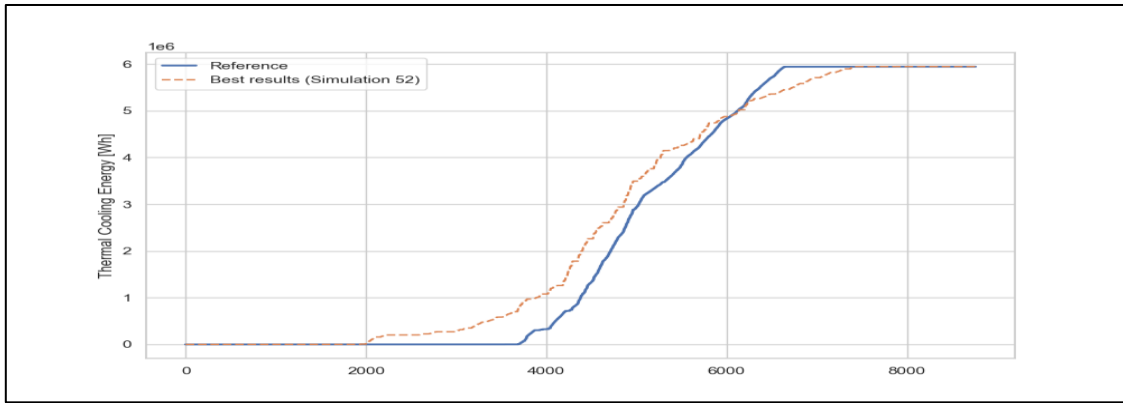


Figure 5: Best result of cooling season calibration for one year period with 15 variants of parameter combinations.

5. COUPLING CONTROL ALGORITHMS WITH CALIBRATED MODEL

In this section, we showcase how a model predictive controller (MPC) algorithm, when integrated with our calibrated model, helps maintain thermal comfort in the G2ELab zone while minimizing energy usage. This algorithm anticipates both external weather and internal conditions, optimizing temperature settings through a genetic algorithm to efficiently manage the zone's energy systems.

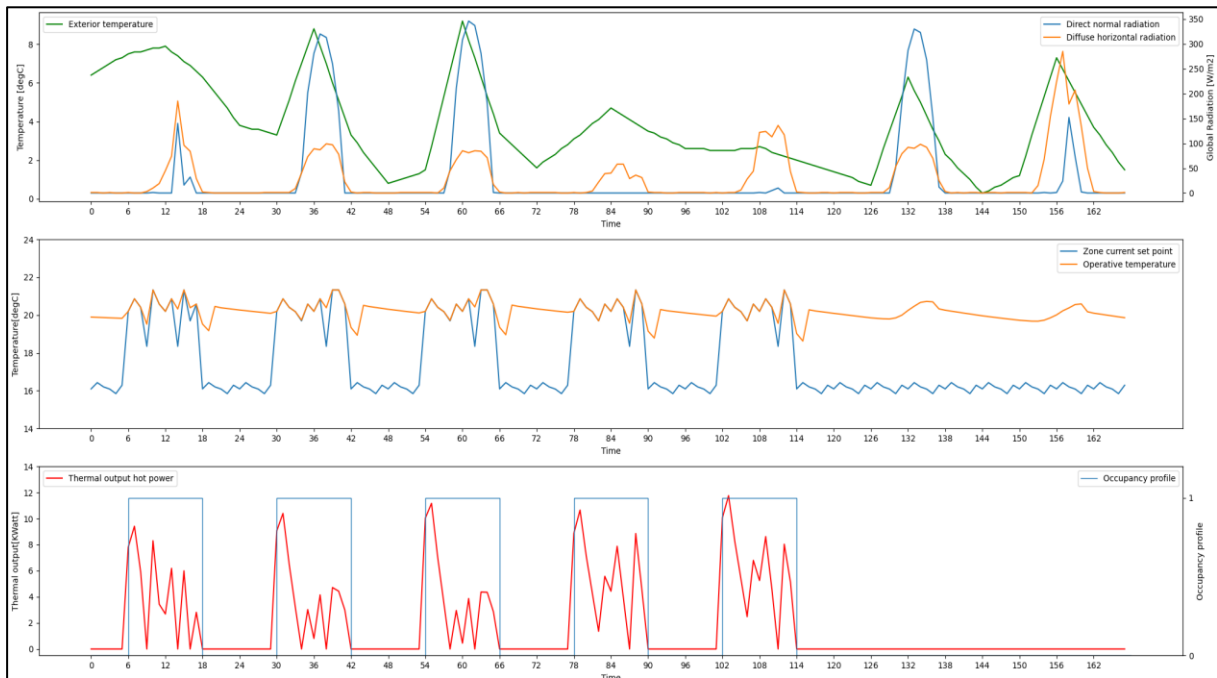


Figure 6: Example of using a Model Predictive Controller algorithm for the calibrated model.

Figure 6 illustrates the algorithm's role in creating comfortable conditions by predicting occupancy and weather changes. The upper chart presents the external environmental factors. The middle chart displays a one-week overview of the management decisions made by the MPC. This includes the desired temperature targets ('Zone current set points') that the MPC communicates to the building's heating system. The term 'operative temperature' refers to the calculated temperature within the building's zone (average between air and mean radiant temperature). The lower graph shows the amount of heat provided by the building's heating systems to meet the MPC's temperature set points. These set points are adjusted according to occupancy patterns; for example, heating is turned off when the building is unoccupied, as indicated by the end of the week period on the graph. The goal of integrating the MPC with the calibrated model is to assess the algorithm's effectiveness. This evaluation, including a detailed discussion of the methodology for testing the control algorithms, will be covered in a separate article at the conference.

6. CONCLUSION

In this article, we present the method we used to create and calibrate a thermal model for the Greener building in Grenoble, with a focus on the living lab zone. The article presents the usefulness of the data available in the lab in the creation of the model. The variety of sensors installed in the lab, providing data on energy consumption and temperature evolution, as well as the reports containing the thermal characteristics and the data from the weather station installed at the top of the building, was very useful in the creation of the model. A basic empirical calibration was applied first, aiming to reduce the difference between the measured energy consumption and the simulated one, by using the available data to improve the input of the models, this calibration has significantly reduced this difference. The high availability of data was very useful in improving the input of the model, but on the other hand, the interaction between the measured parameters and the uncertainties in some data made the problem more complex. In the other part of the study, a calibration tool is used to further reduce the difference and ensure that the calibrated model represents the real behavior of the building. This refined calibration process resulted in a thermal model that reflects better the actual energy consumption patterns, even though the exact energy values at each time step may differ. This result suggests that while the model may not be perfect in every detail, it serves as a valuable tool for testing and evaluating control algorithms. Through this work, we ensure that the model reflects the thermal behavior of the building.

7. REFERENCES

- Delinchant, Benoit, Frédéric Wurtz, Stéphane Ploix, Jean-Luc Schanen, et Yves Marechal. 2016. « GreEn-ER Living Lab - A Green Building with Energy Aware Occupants »: In *Proceedings of the 5th International Conference on Smart Cities and Green ICT Systems*, 316-23. Rome, Italy: SCITEPRESS - Science and Technology Publications. <https://doi.org/10.5220/0005795303160323>.
- Garreau, Enora, Yassine Abdelouadoud, Eunice Herrera, Werner Keilholz, G.-E. Kyriakodis, Vincent Partenay, et Peter Riederer. 2021. « District MODeller and SIMulator (DIMOSIM) – A Dynamic Simulation Platform Based on a Bottom-up Approach for District and Territory Energetic Assessment ». *Energy and Buildings* 251 (novembre): 111354. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111354>.
- Ma, Jingran, Joe Qin, Timothy Salsbury, et Peng Xu. 2012. « Demand Reduction in Building Energy Systems Based on Economic Model Predictive Control ». *Chemical Engineering Science* 67 (1): 92-100. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2011.07.052>.
- Široký, Jan, Frauke Oldewurtel, Jiří Cigler, et Samuel Prívará. 2011. « Experimental Analysis of Model Predictive Control for an Energy Efficient Building Heating System ». *Applied Energy* 88 (9): 3079-87. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.03.009>.
- Wetter, Michael, Kyle Benne, Antoine Gautier, Thierry S Nouidui, Agnes Ramle, Amir Roth, Hubertus Tummescheit, Stuart Mentzer, et Christian Winther. 2020. « Lifting the garage door on Spawn, an Open-Source Bem- Controls Engine ».

Évaluation de l'impact des matériaux bio/géosourcés sur le confort thermique d'été

Thibaut Colinart ^{*1}, Maxime Capp², Chi-Kien Nguyen², Unai Durañona²

¹ Univ. Bretagne Sud, UMR CNRS 6027, IRDL, F-56100 Lorient, France

² Saint-Gobain Recherche Paris, 39 quai Lucien Lefranc, F-93300 Aubervilliers, France

*thibaut.colinart@univ-ubs.fr

RESUME. Cette étude vise à quantifier l'impact des matériaux bio/géosourcés, de par leurs propriétés hygrothermiques, sur le confort à l'échelle du bâtiment par rapport à d'autres matériaux. A cet effet, des simulations hygrothermiques dynamiques sont réalisées à l'échelle d'un bâtiment modèle (de type Bestest) en tenant compte des transferts couplés de chaleur et d'humidité dans les enveloppes à l'aide du logiciel WUFI Plus. Plusieurs typologies de parois (ITI, ITE, MOB) sont testées pour des bâtiments résidentiel ou tertiaire soumis à différents climats (Brest, Nancy, Marseille). Différentes métriques de confort thermique sont analysées sur la période estivale. Les impacts des conceptions de parois sur le confort thermique d'été sont comparés aux mesures classiques du traitement du confort thermique d'été, comme la sur-ventilation nocturne ou la gestion des apports solaires.

MOTS-CLÉS : transferts hygrothermiques ; confort thermique ; matériaux biosourcés.

ABSTRACT. This study aims to quantify the impact of bio/geosourced materials, through their hygrothermal properties, on comfort at building scale, compared with other materials. To this end, dynamic hygrothermal simulations are carried out at the scale of a model building (Bestest type), taking into account coupled heat and moisture transfers in the envelopes, using WUFI Plus software. Several wall typologies are tested for residential or tertiary building subjected to different climates (Brest, Nancy, Marseille). Various thermal comfort metrics are analyzed over the summer period. The impact of wall designs on summer thermal comfort is compared with conventional summer thermal comfort measures, such as night-time over-ventilation or solar gain management.

KEYWORDS: hygrothermal behavior; thermal comfort; biobased materials.

1. INTRODUCTION

Garantir le confort hygrothermique des occupants d'un bâtiment à un coût énergétique minimal est la préoccupation des ingénieurs thermiciens du bâtiments. Derrière cette simple injonction se cache toutefois de nombreuses difficultés. Premièrement, bien qu'une définition générique soit proposée dans le Standard 55 de l'ASHRAE, évaluer le confort thermique reste complexe. En effet, il dépend de nombreuses variables (températures, humidité, vitesse d'air), elles-mêmes influencées par des facteurs et paramètres relatifs au bâtiment, aux conditions extérieures et aux activités humaines, mais également de facteurs physiologique et psychosociologique (Rupp et al. 2015). Deuxièmement, il existe une multitude d'indicateurs de confort thermique qui ont été construit durant les dernières décennies avec une logique de construction bien définie. A titre d'exemple, Attia et al. (2023) recensent différents indicateurs de surchauffe utilisés en Europe et notent que l'indicateur DH proposé dans la RE2020 est l'un des plus avancé et pertinent pour évaluer le confort thermique d'été. Ces indicateurs sont fréquemment évalués à la suite de simulations thermiques dynamiques (STD) de bâtiments réalisées

avec des logiciels dédiés (qui possèdent leur propre limite). Ces outils offrent une flexibilité accrue pour évaluer l'impact de la conception de l'enveloppe (niveau d'isolation et d'inertie thermique, vitrages et protections solaires, etc.) et/ou de l'exploitation du bâtiment (scénarii de ventilation, d'occultation, etc.) sur le confort thermique (Alrasheed et Mourshed 2023 ; Verbeke et Audenaert 2018 ; Guo et al. 2019 ; Evola et al. 2013). Dans le cas du confort thermique d'été, ces études confirment l'importance de la limitation des apports de chaleur et la gestion de ces apports dans le temps.

Récemment, les matériaux bio/géosourcés sont de plus en plus utilisés dans le secteur du bâtiment (tant pour la construction neuve qu'en rénovation), du fait notamment de leur faible impact environnemental, mais également d'un argumentaire en faveur de ces matériaux sur le confort thermique d'été en lien avec des notions d'inertie et de transferts hygrothermiques. Cependant, les études de confort thermique d'été sur des bâtiments contenant des matériaux bio/géosourcés dans l'enveloppe sont rares et parfois imprécises ou irréalistes (Barclay et al. 2019 ; Hema et al. 2020 ; Ben-Alon et Rempel 2023). Aussi, cette étude vise à éclaircir l'impact des matériaux bio/géosourcés sur le confort thermique d'été (par rapport à des solutions plus conventionnelles) sur un bâtiment géométriquement simple.

2. PRESENTATION DU CAS D'ETUDE

L'étude porte sur un bâtiment de type BESTEST avec une géométrie simple (6 m de long, 8 m de large et 2,7 m de haut). Le plancher et le plafond (composés de pare-vapeurs très fermés, de 10 cm de béton et d'une isolation extérieure) possèdent des résistances thermiques de 3,8 et 6,3 $\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$ respectivement. Trois types de parois latérales opaques ($R = 5 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$) sont étudiées :

- ITI : des parois en béton enduit sont isolées par l'intérieur soit avec un isolant (laine de verre LdV ou Fibre de bois FdB) sous un frein vapeur ($S_d = 1 \text{ m}$), un vide technique et une plaque de plâtre, soit avec de la terre allégée (TA) recouverte d'un enduit terre paille.
- ITE : une isolation par l'extérieur sous bardage est appliquée sur deux types de mur : du béton associé à un vide technique et une plaque de plâtre ou des briques de terre crue (BTC) non recouvertes pour potentiellement maximiser les échanges d'humidité.
- MOB : les murs à ossature bois se composent d'un bardage, d'une lame d'air ventilée, d'un pare-pluie, d'un panneau de contreventement, d'un isolant (LDV ou FDB) sous frein vapeur, d'un vide technique et d'une plaque de plâtre.

La Figure 1 rappelle les designs des parois, les épaisseurs d'isolant et les principales caractéristiques thermiques et hydriques, dont les facteurs d'amortissement et les déphasages calculés selon la norme ISO 13786. Du fait d'une plus grande conductivité thermique de la TA, la paroi ITI TA est la plus épaisse. Même si les masses thermiques surfaciques des parois lourdes (ITI/ITE) sont environ 2 fois supérieures à celles du plafond et du plancher, les parois verticales et horizontales contribuent de manière équivalente à l'inertie du bâtiment en considérant leurs surfaces respectives. Le déphasage et l'amortissement sont étroitement corrélés à la masse thermique : plus elle augmente, plus le facteur d'amortissement est faible et le déphasage est important. Enfin, toutes les parois incluant du béton sont fermées au transfert de vapeur en comparaison aux autres parois.

Conformément au design des bâtiments Bestest, deux fenêtres double vitrage ($U_w = 2,7 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$, $g = 0,6$) de 6 m^2 sont intégrées à la façade Sud. De base, elles ne possèdent pas de protections solaires, ni de casquette pour limiter les apports solaires en été.

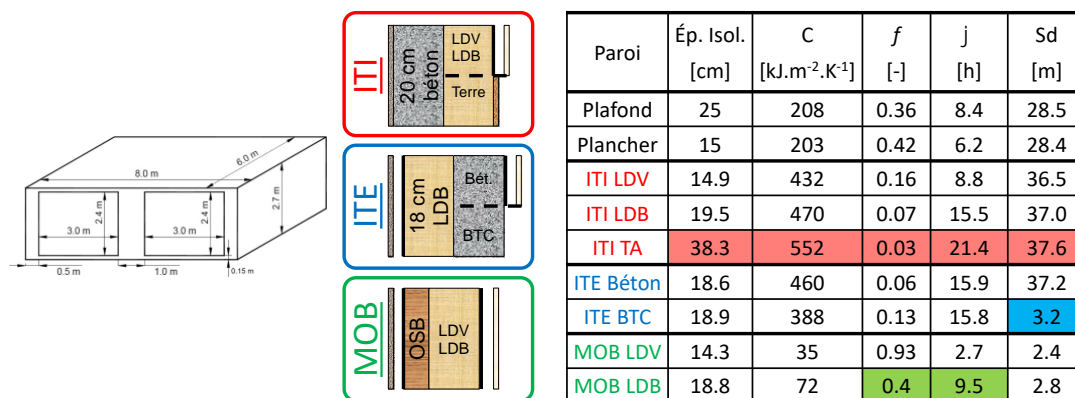


Figure 1 : Aperçu du bâtiment et des parois opaques considérés dans l'étude.

Des scénarios d'occupation de type résidentiel (maison individuelle) ou de type tertiaire ont été défini pour 2 personnes en accord avec la réglementation thermique en vigueur (sans autre charges thermiques intérieures). Le renouvellement d'air est assuré par les infiltrations (calculées pour une perméabilité de $0,6 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$) et par une VMC (dont le débit est fixé par défaut à $50 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, soit $0,38 \text{ vol} \cdot \text{h}^{-1}$). Un système de chauffage idéal de forte puissance permet de maintenir une température minimale de $20 \text{ }^\circ\text{C}$ dans le bâtiment. En revanche, il n'y pas de restrictions sur la température maximale, ni sur l'humidité relative.

Les simulations ont été effectuées avec le logiciel WUFI Plus (v3.3). Ce logiciel de simulation thermique dynamique des bâtiments présente la particularité de résoudre les équations de transfert hygrothermique dans les parois. Les propriétés hygrothermiques des matériaux sont soit mesurées au laboratoire (Colinart et al. 2020), soit issues de la base de données du logiciel. Pour s'affranchir de l'effet des conditions initiales, les simulations sont réalisées sur 5 années consécutives. Le comportement du bâtiment est évalué pour trois climats : Brest (climat océanique, zone climatique H2a), Nancy (climat semi-continentale, zone climatique H1b) et Marseille (climat méditerranéen, zone climatique H3). Les fichiers météo TMY disponibles par défaut dans le logiciel et utilisés pour les simulations ne possèdent pas d'épisodes caniculaires, notamment en raison de leur ancienneté (Nancy : 1996 ; Marseille : 1999).

Quatre indicateurs d'inconfort thermique sont évalués en occupation à partir des résultats de simulation (Lauzet et al. 2021) :

1. Le cumul d'heures où la température opérative est supérieure à $28 \text{ }^\circ\text{C}$. Ce critère est retenu dans des programmes de conception ou dans « Guide A: Environmental design » du CIBSE.
2. Le cumul d'heures passées en dehors d'une zone de confort de Givoni définie sur le diagramme psychrométrique pour un air immobile (correspondant à une température maximale de $27 \text{ }^\circ\text{C}$).
3. Le cumul d'heures passées en dehors d'une zone de confort adaptatif définie selon la norme EN 16798-1 (bâtiment de catégorie II). Cet indicateur permet de tenir compte de l'adaptabilité des usagers dans l'évaluation du confort.
4. Le cumul d'heures passées en dehors d'une zone de confort adaptatif définie dans la RE2020 et le nombre de degré-heures DH .

Ces indicateurs d'inconfort thermique sont évalués sur une année entière ou sur la période estivale (du 1^{er} juin au 30 septembre), ainsi que sur les heures d'occupation d'une journée entière ou que de la nuit (de 22h à 6h).

3. RESULTATS ET DISCUSSIONS

3.1. ANALYSE D'UN CAS DE REFERENCE NON OPTIMISE EN REGARD DU CONFORT D'ETE

Le cas d'un bâtiment avec des parois isolées par l'intérieur avec de la terre allégée (ITI TA) sous le climat de Nancy est présenté de manière exhaustive. La température et l'humidité relative intérieure varient entre 20 et 32 °C et 20 et 58 % respectivement, quand les grandeurs extérieures varient entre -13 et 32 °C et 15 et 100 % respectivement. Ces données intérieures sont analysées par le prisme des indicateurs d'inconfort thermique d'été représentés sur la Figure 2. Plusieurs constats peuvent être fait :

- Les indicateurs d'inconfort varient de quelques heures d'une année à l'autre, compte tenu du décalage des jours au fil des années (l'Année 1 commence un lundi, l'Année 5 un samedi). Dans la suite de l'étude, les résultats de l'Année 5 seront analysés. Par ailleurs, l'inconfort se produit quasi exclusivement durant la période estivale (du 1er juin au 30 septembre).
- Les différents indicateurs conduisent inévitablement à des niveaux d'inconfort différents du fait même de leur construction. Ils varient entre 557h et 806h sur toute la période estivale et entre 159h et 426h sur les périodes nocturnes. Pour cette dernière, on observe : $RE\ 2020 > Givoni > Adaptatif$, du fait des seuils de température nocturne de 26, 27 et 28 °C respectivement.
- Ramené au nombre d'heures d'occupation du logement sur l'année, l'inconfort est compris entre 5 % et 15 %. En revanche, vu que l'inconfort se produit uniquement durant la période estivale, il convient de le ramener au nombre d'heure d'occupation du logement sur cette période. Dans ce cas, l'inconfort est compris entre 24 et 35 % sur l'ensemble de la journée et entre 16 et 44 % la nuit uniquement. Enfin, l'inconfort se produit entre 23 % et 54 % du temps durant la nuit. L'indicateur $RE\ 2020$ présente un niveau d'inconfort important durant la nuit du fait d'une température seuil plus basse que pendant le jour (26 °C contre température adaptative). Cela conduit à un DH élevé de 1240 °C.h.

Ces périodes d'inconfort ne se produisent pas nécessairement au même moment. Toutefois, de l'inconfort est prédit par tous les indicateurs à hauteur de 490h (soit 21% de l'occupation estivale), dont 155h durant la nuit (soit 16% de l'occupation nocturne estivale). Ces périodes d'inconfort se situent sur quelques jours en juin et surtout en juillet et en août, principalement en fin de journée, et jusqu'au début de la nuit. A de rares exceptions, l'inconfort n'est pas continu tout au long d'une journée.

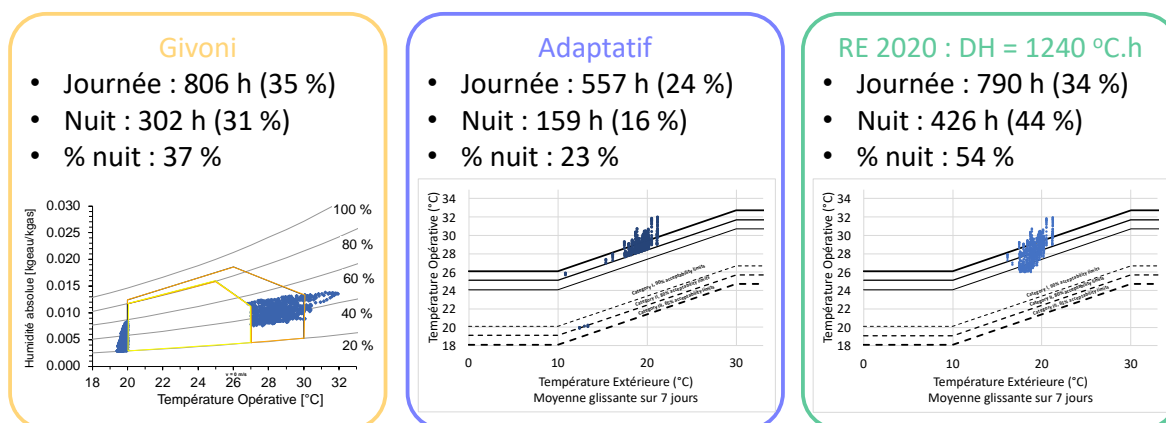


Figure 2 : Analyse des périodes d'inconfort thermique d'été dans un bâtiment isolé par l'intérieur avec de la terre allégée sous un climat de Nancy.

Ces chiffres d'inconfort sont largement au-delà des seuils fréquemment définis/tolérés. Aussi, des simulations complémentaires ont été réalisées en appliquant des mesures usuelles de maîtrise du confort d'été, à savoir une occultation de 40 % des fenêtres de 14h à 19h et une surventilation nocturne de $150 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ de 22h à 7h sur la période estivale. Comme le montre la Figure 3, ces deux mesures conduisent à une réduction drastique de l'inconfort thermique d'été (tant le jour que la nuit) et le DH atteint une valeur de $216 \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{h}$. Ces mesures seront retenues dans la suite de l'étude.

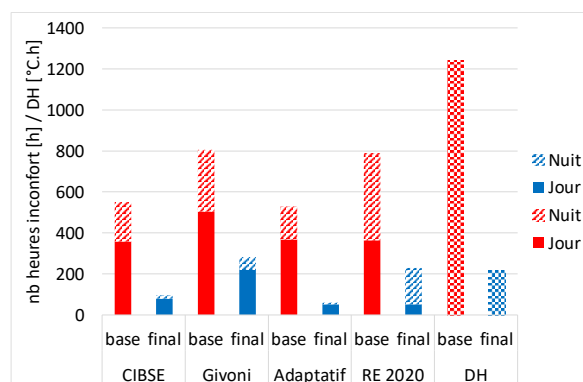


Figure 3 : Nombre d'heures d'inconfort thermique d'été et DH avant (en rouge) et après (en bleu) amélioration dans un bâtiment isolé par l'intérieur avec de la terre allégée sous un climat de Nancy.

3.2. INFLUENCE DU TYPE DE PAROI

Les indicateurs d'inconfort thermique d'été ont été évalués pour différents bâtiments incluant les parois présentées sur la Figure 1. L'indicateur *Adaptatif* et le DH de la RE 2020 sont présentés sur la Figure 4. Plusieurs constats peuvent être fait :

- Pour les parois ITI, changer un isolant thermiquement léger (LDV, FDB) par un isolant plus inertiel (TA) conduit à une diminution d'environ $1 \text{ }^\circ\text{C}$ des variations de température intérieure, en raison d'effets latents associés aux échanges d'humidité : un flux d'humidité de la paroi vers la zone est constaté et cette désorption en surface s'accompagne d'une baisse de la température de surface, donc de la température opérative. Par conséquent, l'inconfort diminue au maximum de 26 h (soit une différence en occupation de l'ordre de 1%) et le DH de $38 \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{h}$. Une variante a consisté à ramener l'épaisseur de terre allégée à 19,5 cm, conformément aux pratiques actuelles (soit une diminution d'environ 50 % de la résistance thermique de la paroi). Le confort s'en trouve alors amélioré : la température intérieure étant majoritairement supérieure à la température extérieure en été, les déperditions au travers de cette paroi sont plus importantes, permettant ainsi de décharger le bâtiment tant le jour que la nuit. La réduction de l'inconfort est comprise entre 27 et 40 %.
- Isoler les parois par l'extérieur permet de réduire l'inconfort d'environ 50h en journée et 10h la nuit (soit une différence en occupation de l'ordre de 2,5%) et de diminuer significativement le DH (par rapport à ITI FDB). Ramener de l'inertie à l'intérieur permet d'amortir la sollicitation en température, mais les possibilités de décharge de l'enveloppe peuvent être également plus longue en été. Comparativement, un mur en béton conduit à un meilleur confort qu'une maçonnerie en BTC, du fait d'une plus grande effusivité thermique (qui permet de décharger l'enveloppe sur les périodes nocturnes). En revanche, même si les réponses en humidité sont légèrement différentes, leur impact sur les indicateurs de confort est du second ordre.

- Les parois légères de type MOB conduisent à des niveaux d'inconfort équivalents à ceux constatés pour les parois isolées par l'intérieur. La paroi LDV présente un niveau d'inconfort *Adaptatif* plus important que la paroi FDB : en raison d'une plus faible inertie thermique, elle conduit à des variations de température intérieure plus importante de 0,5 °C en moyenne et donc à des dépassements de seuil plus fréquents. Intégrés dans le temps, ces dépassements sont lissés, d'où des niveaux de *DH* équivalents entre les deux parois. Une variante (parois notées *) a consisté à intégrer dans le calcul une cloison interne en brique de terre crue de 15 cm pour apporter de l'inertie thermique (masse thermique = 246 kJ.m⁻².K⁻¹). L'effet est bénéfique sur le confort, même si, d'un point de vue calculatoire, sa présence diminue légèrement le volume d'air de la pièce (de 2,43 m³) et donc son inertie thermique ainsi que les débits d'infiltration, rendant l'analyse de cette variante plus complexe. Enfin, une simulation supplémentaire avec de la terre allégée (avec une même épaisseur d'isolant que FDB) conduit également à des niveaux d'inconfort plus faibles, en raison d'une résistance thermique plus faible (à l'instar de la variante sur la paroi ITI TA).

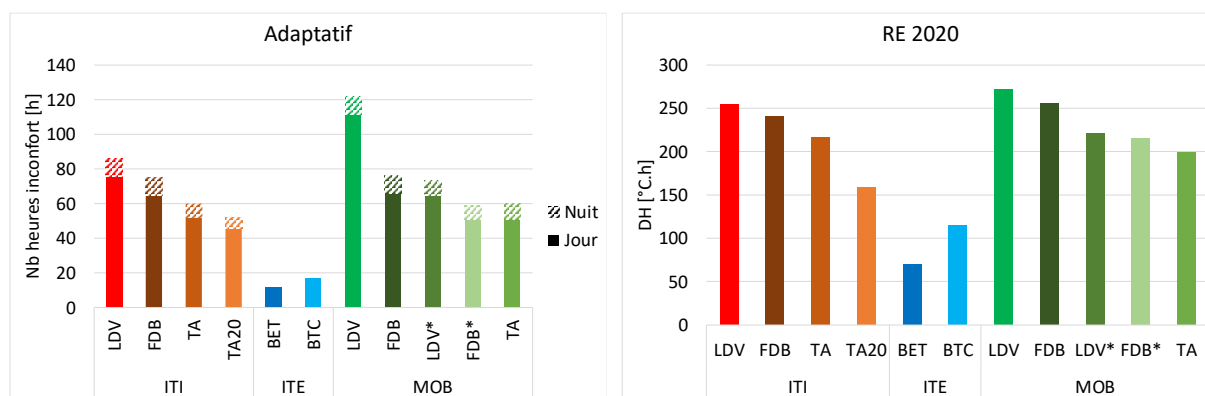


Figure 4 : Influence du type de paroi sur le nombre d'heures d'inconfort thermique d'été dans un bâtiment résidentiel sous un climat de Nancy.

3.3. INFLUENCE DU CLIMAT ET L'OCCUPATION

Ces analyses ont été reproduites pour le climat océanique de Brest et le climat méditerranéen de Marseille. Pour le premier, aucun inconfort thermique d'été n'est à constater, les températures extérieures étant modérées. Pour le second, l'inconfort excède fréquemment les 1000h et le *DH* les 5000 °C.h du fait de fortes températures extérieures. Cela signifie que les mesures d'amélioration du confort thermique d'été proposées pour un climat de Nancy ne sont pas suffisantes pour un climat de Marseille. En dépit de cette observation, une analyse relative de l'inconfort est réalisée pour 4 typologies de paroi incluant de la fibre de bois comme isolant thermique : pour chaque indicateur, l'inconfort relatif présenté sur la Figure 5 est calculé par rapport à la paroi la plus défavorable vis-à-vis du confort. A titre d'exemple pour le climat de Nancy et l'indicateur *Adaptatif*, la paroi MOB est la plus défavorable (inconfort relatif = 1), suivi des parois ITI, MOB + BTC et ITE. Cet effet bénéfique de l'inertie thermique se retrouve pour tous les indicateurs pour un bâtiment optimisé vis-à-vis du confort thermique d'été sous le climat de Nancy. *A contrario*, l'inertie joue un rôle moindre pour un bâtiment sous le climat de Marseille. Aussi convient-il d'abord d'optimiser les mesures d'amélioration du confort d'été (occultation des parois non opaques, gestion de la ventilation) avant d'agir sur le niveau et la localisation de l'inertie thermique.

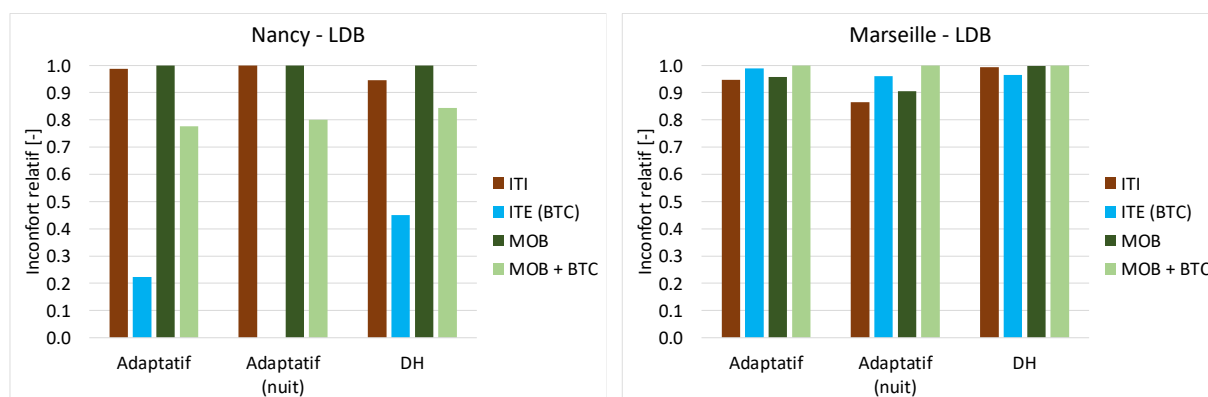


Figure 5 : Influence de l'inertie thermique sur le nombre d'heures d'inconfort thermique d'été dans un bâtiment résidentiel sous les climats de Nancy et de Marseille.

Ces premiers constats ont été réalisés pour des bâtiments résidentiels. L'analyse est poursuivie pour des bâtiments tertiaires : les résultats sont présentés sur la Figure 6. Premièrement, le nombre d'heures d'inconfort est plus important pour les bâtiments tertiaires, du fait d'une occupation (et donc de charges internes) plus importante en journée et nulle la nuit. Ramené au nombre d'heures d'occupation (792h), l'inconfort peut excéder 20%. Deuxièmement, le bénéfice de l'inertie thermique coté intérieur est confirmé.

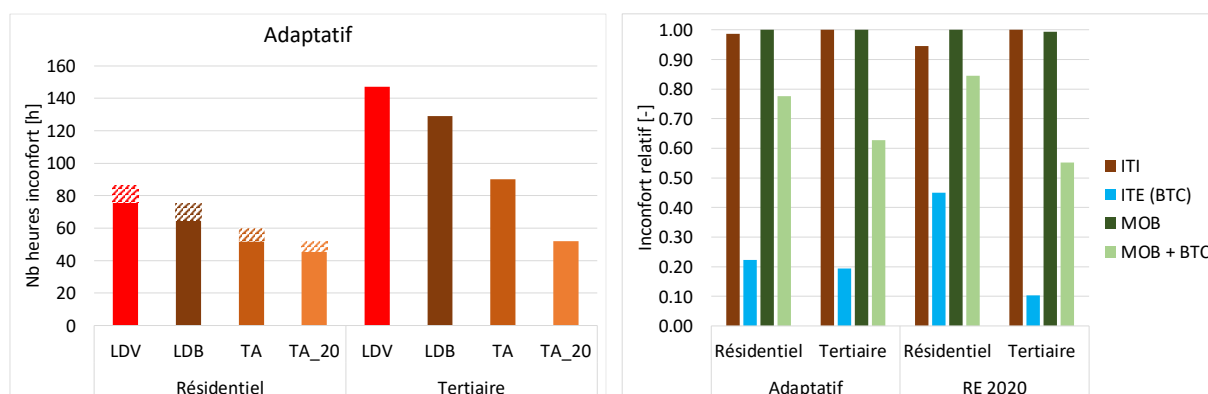


Figure 6 : Influence du type d'occupation sur le nombre d'heures d'inconfort thermique d'été dans un bâtiment tertiaire sous un climat de Nancy.

4. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Cette étude a évalué à l'aide du logiciel Wufi Plus le confort thermique d'été dans un bâtiment modèle pouvant inclure des matériaux bio/géosourcés dans son enveloppe. Il en ressort que les facteurs agissant en premier lieu (et très significativement) sur la prédiction du confort thermique d'été sont les actions limitant et gérant les apports solaires (occultation des surfaces vitrées, surventilation nocturne, etc.). Dans un second temps, la conception de parois joue également un rôle important : ajouter de l'inertie thermique à l'intérieur du bâtiment (ITE, MOB + BTC) est plus bénéfique vis-à-vis du confort thermique d'été, à condition uniquement que le bâtiment soit déjà « optimisé » (faute de quoi l'inconfort sera alors accentué). Enfin, en dernier ressort, les parois incluant des matériaux isolants bio/géosourcés (qui présentent généralement une plus grande inertie thermique) sont faiblement bénéfiques au regard du confort d'été par rapport des parois plus conventionnelles.

Cette première étude mérite d'être poursuivie pour étendre la portée de ces premières conclusions. Tout en conservant la simplicité du bâtiment Bestest, d'autres variantes peuvent être d'abord testées pour évaluer l'influence de la conception du bâtiment (orientation/dimensions du vitrage, inertie du plancher/plafond, etc.), du climat (actuel/futur) ou des matériaux (formulation de la terre allégée et des enduits, conception de parois, etc.). L'enjeu est d'identifier et de classer les différents paramètres agissant sur le confort thermique d'été, et en particulier les effets des transferts hydriques et des transferts latents associés sur les bilans thermiques journaliers ou saisonniers, ainsi que sur les indicateurs de confort. Toutefois, pour répondre aux attentes de la profession, il conviendra de confirmer ces résultats pour des bâtiments plus réels (pavillon, immeuble, etc.), voire de les valider expérimentalement.

5. BIBLIOGRAPHIE

- Alrasheed, Mousa, et Monjur Mourshed. 2023. « Domestic overheating risks and mitigation strategies: The state-of-the-art and directions for future research ». *Indoor and Built Environment* 32(6):1057-1077. doi:10.1177/1420326x231153856.
- Attia, Shady, Caroline Benzidane, Ramin Rahif, Deepak Amaripadath, Mohamed Hamdy, Peter Holzer et al. 2023. « Overheating calculation methods, criteria, and indicators in European regulation for residential buildings ». *Energy and Buildings* 292:113170. doi:10.1016/j.enbuild.2023.113170.
- Barclay, M., N. Holcroft et A. D. Shea. 2014. « Methods to determine whole building hygrothermal performance of hemp–lime buildings ». *Building and Environment* 80:204–12. doi: 10.1016/j.buildenv.2014.06.003.
- Ben-Alon, Lola, et Alexandra R. Rempel. 2023. « Thermal comfort and passive survivability in earthen buildings ». *Building and Environment* 238:110339. doi:10.1016/j.buildenv.2023.110339.
- Colinart, Thibaut, Théo Vincelas, Hélène Lenormand, Arthur Hellouin De Menibus, Erwan Hamard et Thibaut Lecompte. 2020. « Hygrothermal properties of light-earth building materials ». *Journal of Building Engineering* 29:101134. doi:10.1016/j.job.2019.101134.
- Evola, Gianpiero, Luigi Marletta, Fabio Sicurella, et Vladimir Tanasiev. 2013. « Combining thermal inertia, insulation and ventilation strategies for improving indoor thermal summer comfort ». In *Proceedings of the 34th AIVC*. Athens.
- Guo, Rui, Yue Hu, Mingzhe Liu et Per Heiselberg. 2019 « Influence of design parameters on the night ventilation performance in office buildings based on sensitivity analysis ». *Sustainable Cities and Society* 50:101661. doi:10.1016/j.scs.2019.101661.
- Hema, Césaire, Adamah Messan, Abdou Lawane et Geoffrey Van Moeseke. 2020. « Impact of the Design of Walls Made of Compressed Earth Blocks on the Thermal Comfort of Housing in Hot Climate ». *Buildings* 10(9):157. doi:10.3390/buildings10090157.
- Rupp, Ricardo Forgiarini, Natalia Giraldo Vásquez et Roberto Lamberts. 2015. « A review of human thermal comfort in the built environment ». *Energy and Buildings* 105: 178–205. doi:10.1016/j.enbuild.2015.07.047.
- Lauzet, Nicolas, Thibaut Colinart, Marjorie Musy et Karine Lapray. 2021. « Selecting extreme weather file to assess overheating in residential building ». *Journal of Physics: Conference Series* 2069(1): 012231. doi:10.1088/1742-6596/2069/1/012231.
- Verbeke, Stijn, et Amaryllis Audenaert. 2018. « Thermal inertia in buildings: A review of impacts across climate and building use ». *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 82: 2300–2318. doi:10.1016/j.rser.2017.08.083.

Inertie des isolants : mythe ou réalité ?

Lisa Combes^{1,*}, Edouard Walther^{1,2}

¹ INSA Strasbourg, 24 Boulevard de la Victoire - 67000 Strasbourg

² Université de Strasbourg, INSA Strasbourg, CNRS, ICube Laboratory UMR 7357, Strasbourg, France

*lisa.combes@insa-strasbourg.fr

RESUME. Les documentations commerciales de certains isolants vantent les mérites du déphasage et de l'inertie thermique de tels matériaux (e.g. la laine de chanvre ou la laine de bois). Le travail présenté ici vise à établir l'impact de la capacité thermique plus importante de ces matériaux sur l'inertie globale d'un bâti. Pour ce faire, une comparaison quantitative entre différents isolants disponibles est présentée, tout en tenant compte d'autres paramètres liés aux systèmes constructifs tels que le taux d'infiltration et l'inertie des autres composants du bâti, pour deux structures typiques. L'étude montre que les isolants dits biosourcés n'engendrent pas de températures plus basses en période chaude. En revanche l'analyse du cycle de vie menée en conclusion de l'étude montre un net avantage par rapport aux solutions traditionnelles.

MOTS-CLÉS : inertie, isolant biosourcé

ABSTRACT. Sales documentation of some bio-based insulation claim the advantage of thermal inertia and delay of such materials, such as wood and hemp wool insulation. The present work deals with the truthfulness of this claim and aims at characterizing the impact of a higher thermal capacity on the indoor thermal comfort. Retrofitting scenarios of typical heritage buildings of Alsace serves as a base for a quantitative comparison between different bio-based and classical insulation materials. The study shows that bio-based insulation does not lead to lower indoor temperatures during the hot season. Regarding the carbon life cycle analysis however, they exhibit a large advantage compared to traditional insulation materials.

KEYWORDS: inertia, bio-based insulation

1. INTRODUCTION

Les documentations commerciales de nombreux fabricants de matériaux isolants biosourcés ou classiques vantent le “déphasage” de leurs produits, généralement en quantifiant cette grandeur à l'aide d'une durée en heures. Sans être à charge contre ce type d'isolation, ce travail vise à évaluer la réalité de l'argument en établissant une base de comparaison quantitative.

S'agissant de déphasage, on peut considérer soit le flux transmis à travers la paroi depuis l'extérieur, soit la capacité de la couche intérieure à limiter la rapidité de l'échauffement lorsqu'il est soumis à un flux, représentée par son inertie thermique et son effusivité (Chahwane, 2011). Ces phénomènes sont également connus sous le nom d'inertie de transmission et d'inertie d'absorption (Izard, 2006).

Pour le cas du flux extérieur, un rapide calcul flux dans le cas 1D avec une paroi comportant 20 cm d'isolation extérieure et 20 cm de béton, soumise à une variation périodique des conditions limites en température et en flux montre que le déphasage existe mais n'a pas d'utilité pratique car l'amortissement

sur le flux transmis est très important. On ne détaille pas ici le calcul numérique dont les résultats sont représentés sur la Figure 1 et qui montre le flux solaire arrivant sur la paroi extérieure (courbe grise) ainsi que le flux transmis sur la paroi intérieure, qui est une sinusoïde d'amplitude 0.8 W/m^2 (courbe rouge), ce qui représente un amortissement d'un facteur ~ 100 . Ainsi le déphasage existe mais l'amortissement est tel qu'en pratique le flux transmis est négligeable dans ce cas.

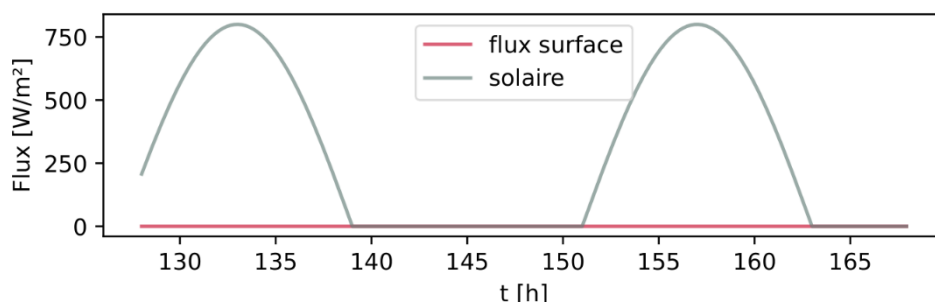


Figure 1 : Illustration du déphasage

L'épaisseur d'isolant intérieur mise en œuvre rend l'inertie par transmission négligeable devant l'inertie par absorption. Il s'agit donc de savoir si les biosourcés occasionnent un déphasage plus important vis-à-vis du flux provenant de l'intérieur, charges internes ou flux solaires incidents. On s'intéresse ici au cas de la rénovation du bâti traditionnel alsacien et aux structures en voile béton. Après une étude bibliographique fournie qui aura servi à déterminer les caractéristiques des isolants biosourcés choisis, notamment en termes de masse volumique et de capacité thermique massique, des simulations thermiques dynamiques ont été réalisées à l'aide du logiciel Pléiades-COMFIE afin de quantifier l'inconfort pour plusieurs variantes constructives représentatives du bâti existant.

2. CONDITIONS D'ETUDE

2.1. DESCRIPTION DES CAS D'ETUDE ET INDICATEURS

Afin de se positionner dans des cas représentatifs du bâti existant et dans une optique de rénovation, on se base sur deux cas typiques de structure (CEREMA et Atelier ODM, 2014) :

- Structure « légère » : Pan de bois et remplissage en torchis, bâti ancien (alsacien). Composition (extérieur vers intérieur) : enduit chaux 2 cm, pan de bois (chêne radial) et torchis 15 cm, enduit plâtre 2 cm
- Structure « lourde » : Voile béton, bâti moderne. Composition (extérieur vers intérieur) : enduit ciment 2 cm, voile béton 20 cm, enduit plâtre 2 cm

Les épaisseurs de maçonneries ont été établies à partir de confrontation de sources sur le bâti local de la région Grand Est (DREAL, 2018). Les compositions des différentes parois sont indiquées dans le Tableau 1.

TYPE DE PAROI	BATI ANCIEN	BATI MODERNE
Plancher bas	Non modélisé (adiabatique)	Non modélisé (adiabatique)
Plancher intermédiaire	Bois massif – 2,5 cm Hourdis briques pleines – 15 cm	Bois léger – 2,5 cm Béton armé – 15 cm

Plancher de combles	Ouate de cellulose – 21 cm Hourdis briques pleines – 15 cm	Ouate de cellulose – 21 cm Béton armé – 15 cm
Toiture	Non modélisé (adiabatique)	Non modélisé (adiabatique)
Refend	Torchis – 15 cm	Parpaings – 20 cm
Cloisons distributives	Torchis – 10 cm	BA 13 – 0,125 cm Lame d'air – 5 cm BA 13 – 0,125 cm
Vitrages	Double vitrage	Double vitrage

Tableau 1 : récapitulatif des propriétés des parois

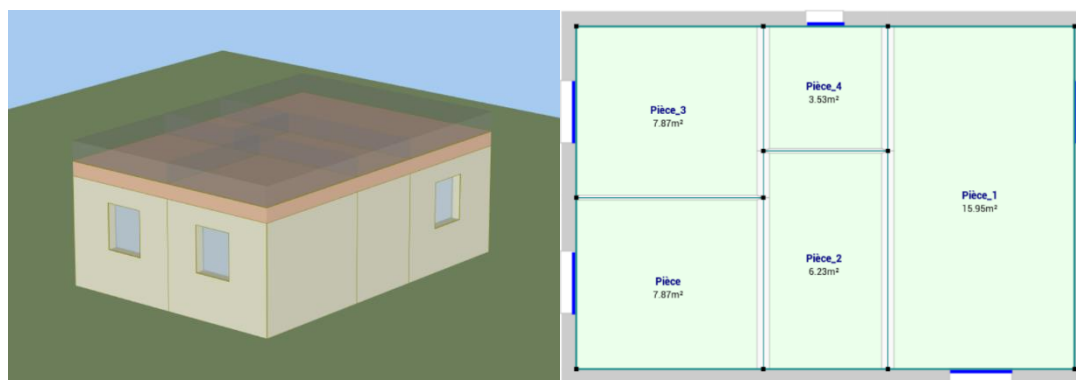


Figure 2 : Vue en perspective du modèle Pléiades (gauche) et plan des zones étudiées (droite)

Le renouvellement d'air est considéré de manière simplifiée : on suppose $\tau = 0.6$ [vol/h] en continu de mi-septembre sauf durant les périodes d'inoccupation du logement dans la semaine en journée où $\tau = 0.2$ [vol/h]. Ces valeurs supposent une ventilation hygiénique et des infiltrations maîtrisées, par exemple après avoir suivi une démarche de qualité de la perméabilité à l'air. Une variante de simulation consiste en l'ajout d'un scénario d'occultation durant les heures chaude de la journée en été (70% en journée).

Les épaisseurs des isolants ont été déterminées pour atteindre les valeurs de résistances thermiques « R » minimales imposées par la Prime CCEE¹ et le Label BBC rénovation résidentielle 2024 (JORF, 2023) pour une isolation thermique par l'intérieur (ITI), à savoir $R \geq 3,7 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ (les conductivités thermiques et les épaisseurs des isolants sont données dans le Tableau 2). L'hypothèse a été faite que l'isolant permet à lui seul d'atteindre cette valeur minimale.

En termes de conditions limites météorologiques, on se base sur un climat futur à l'horizon 2100 avec le fichier de la ville de Nancy et le scénario RCP 4.5 issu du logiciel Meteonorm. On utilisera les degrés-heures d'inconfort comme indicateur de comparaison des résultats entre variantes, ainsi que des comparaisons des maxima de températures.

2.2. PROPRIETES DES ISOLANTS BIOSOURCES

Si les tables de la réglementation thermique (RT, 2005) donnent les propriétés thermophysiques des matériaux de construction usuels, il est souvent délicat de trouver une valeur consolidée pour les matériaux qui nous intéressent ici, notamment du fait de leur hygroscopicité marquée qui modifie la valeur de la capacité thermique massique et de la masse volumique. La détermination des propriétés des

¹<https://www.ecologie.gouv.fr/coup-pouce-renovation-dampneur-des-maisons-et-appartements-individuels>

isolants biosourcés a donc été réalisée en croisant plusieurs sources, afin de déterminer une valeur consolidée de chaque paramètre notamment avec la très complète (Fraunhofer IBP, 2024), la documentation du logiciel WUFI, les résultats issus de (Hygroba, 2013) et (Moya, 2018).

Isolant	λ [W/(m.K)]	ρ [kg/m ³]	C_p [J/(kg.K)]	e pour $R \geq 3.7 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}$ [cm]
Laine de bois	0,038	60	2100	0,145
Laine de chanvre	0,04	40	1800	0,140
Laine de mouton	0,03897	20	1650	0,145
Ouate de cellulose	0,042	55	2544	0,160
Laine de coton	0,039	20	1600	0,145
Béton de chanvre	0,0796	325	1600	0,300
Terre-chènevotte	0,0893	319	1500	0,330
<i>Laine de roche</i>	0,035	36	1030	<i>0,130</i>
<i>Laine de verre</i>	0,032	30	840	<i>0,120</i>

Tableau 2 : Caractéristiques utilisées pour les isolants évalués

Les courbes de température des variantes constructives sont données sur les Figures 1 et 2 respectivement pour le voile béton et le pan de bois. Elles présentent l'évolution de la température de la zone durant la semaine la plus chaude, du 13 au 20 août. L'analyse du graphique montre que :

- L'ordre de grandeur des températures atteintes dans les cas du voile béton et du pan de bois non isolés est le même, avec toutefois ~ 1 K d'écart pour le voile béton.
- Les variantes d'ITI permettent toutes d'abaisser le niveau de température par rapport à la situation non isolée.
- On constate de plus qu'un scénario d'occultation, représenté en pointillés permet d'abaisser les niveaux de température atteints.

Les courbes ont été regroupées car leur degré de similarité ne permet pas de discerner les variantes constructives ainsi deux types « ITI 1 » et « ITI 2 » se dégagent :

- L'appellation « ITI 1 » regroupe les isolants suivants : laine de bois, laine de chanvre, laine de mouton, ouate de cellulose en vrac, laine de coton, laine de roche et laine de verre. On constate que les températures suivent une évolution quasi-identique.
- L'appellation « ITI 2 » regroupe le béton de chanvre et le mélange terre-chènevotte, qui présentent 1 à 2 [K] d'écart avec le groupe ITI 1 et montrent donc un meilleur comportement en période estivale.

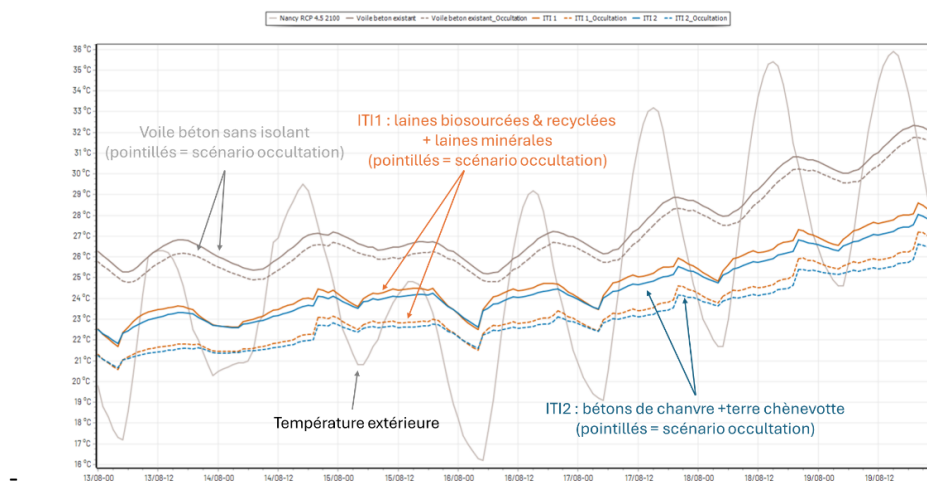


Figure 1 : Voile béton - Températures intérieures durant la semaine la plus chaude (13-20 août)

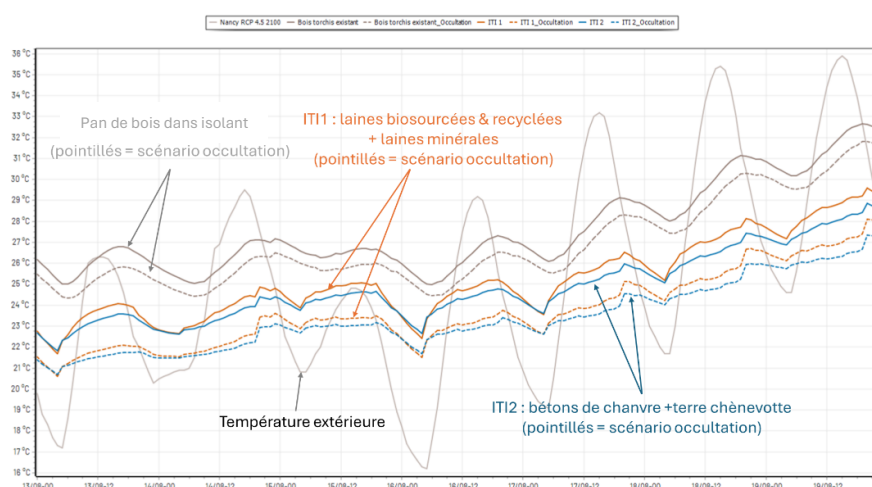


Figure 2 : Pan de bois, remplissage torchis - Températures intérieures durant la semaine la plus chaude (13-20 août)

2.3. RESULTATS QUANTITATIFS

La comparaison en termes de degrés-heures d'inconfort (somme des écarts positifs entre l'intérieur et 27°C) est résumée dans la Figure 3 qui suit pour les deux variantes de structure, avec un scénario de ventilation de 0.6 vol/h constant durant les périodes d'occupation, sans occultation des vitrages. On constate que le voile béton présente globalement un niveau d'inconfort plus faible que la structure en pan de bois-torchis. Le comportement des isolants biosourcés (laine de chanvre, de bois, de mouton, de coton, ouate de cellulose) est similaire aux isolants classiques (laine de verre, de roche) : les résultats ne montrent pas de différence en termes d'inconfort d'été. Le béton de chanvre et de terre-chènevotte sont quant à eux plus lourds et présentent un nombre de degrés-heures légèrement moins élevés avec ~150 K.h de moins pour environ 2300 K.h d'inconfort pour les autres isolants, soit ~6% de moins.

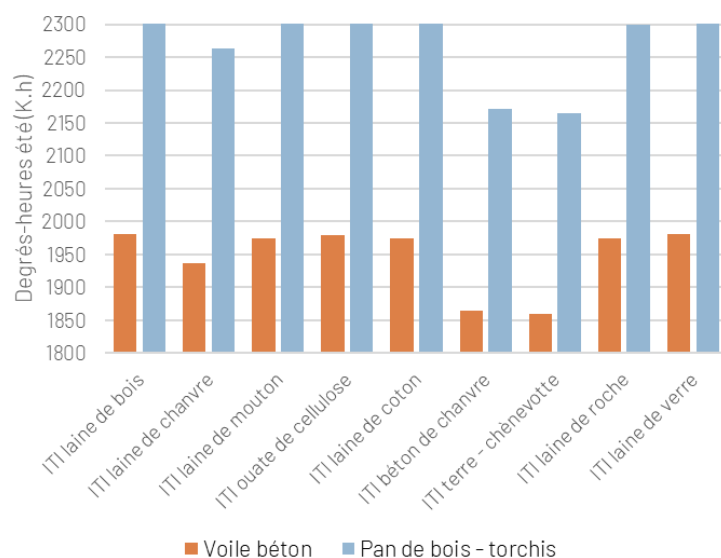


Figure 3 : Degrés-heures par variante d'ITI pour le voile béton et le pan de bois – Scénario 0,6 vol/h sans occultation.

L'ajout du scénario d'occultation permet de diviser par environ quatre le nombre de degrés-heure d'inconfort, comme l'indique la Figure 4. On constate également que le voile béton est moins inconfortable que le pan de bois-torchis. Les variantes d'ITI classiques montrent le même niveau d'inconfort que les biosourcées, à l'exception du béton de chanvre et de la terre chènevotte.

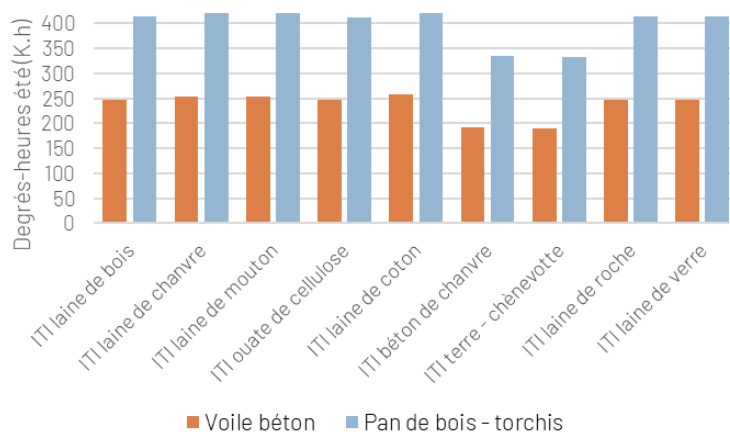


Figure 4 : Degrés heures par variante d'ITI pour le voile béton et le pan de bois – Scénario 0,6 vol/h avec occultation.

Ainsi les isolants biosourcés présentent le même degré d'inconfort que les isolants classiques lorsqu'ils sont sous forme de laine et on ne distingue pas de comportement particulier.

Il est à noter que d'autres variantes ont été testées, notamment avec de la surventilation nocturne estivale et permettent d'atteindre des valeurs négligeables de degrés-heures d'inconfort : ainsi la rénovation en ITI n'est pas gage de surchauffe.

Si l'on juge souhaitable de faire le lien entre paramètres physiques des isolants et performance pour le confort d'été, il peut être utile de comparer les résultats obtenus dans cette étude avec l'effusivité de l'isolant utilisé. La Figure 5 met en relation l'effusivité $e = \sqrt{\lambda \rho C_p}$ du matériau isolant et le nombre de degrés-heures d'inconfort. On constate qu'il n'est pas possible de dissocier l'inertie thermique et la

conductivité et d'autre part que les isolants biosourcés ont un comportement similaire aux isolants classiques, à l'exception des bétons de chanvre et de terre-chènevotte.

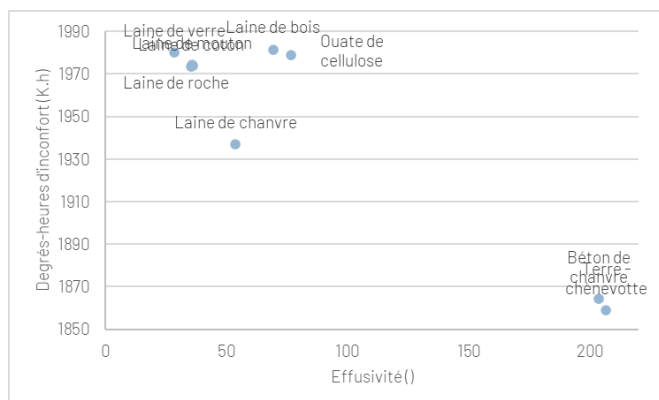


Figure 5 : Relation entre l'effusivité de l'isolant et degrés-heure d'inconfort pour les ITI étudiées.

2.4. UN MOT SUR L'ANALYSE DU CYCLE DE VIE (ACV)

Afin de comparer les différentes d'ITI sur le plan de l'ACV, les hypothèses suivantes ont été faites :

- Une paroi de dimensions 2.5 m × 2.45 m en hauteur a été choisie. Elle permet de conserver un nombre fixe de montants pour la mise en place des systèmes d'ITI.

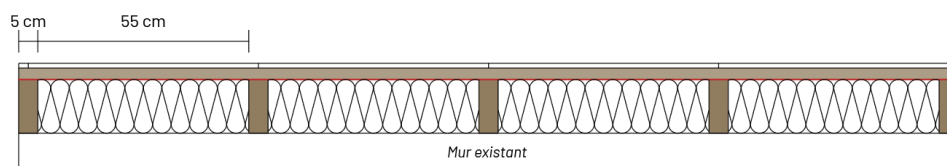


Figure 6 : Croquis de la trame choisie pour le cas des montants en bois

- Concernant les montants on se conforme aux usages de mise en œuvre. Des montants en bois sont utilisés pour les isolants biosourcés tandis qu'une ossature métallique sert à la fixation des laines de verre et de roche.
- Les FDES des fabricants ont servi à déterminer le contenu carbone. Lorsqu'une épaisseur n'était pas couverte par une FDES, on a procédé à une règle de proportionnalité à défaut, ainsi cette analyse ne revêt pas un caractère réglementaire. La laine de mouton n'a pas été étudiée car seule la donnée environnementale par défaut (DED) était disponible et sa valeur pénalisante ne permet pas de mener de comparaison avec fiabilité.

Le détail des calculs est accessible en ligne dans (Combes, 2024). La Figure 7 montre l'impact carbone de chaque système constructif. On notera que les deux bétons dits de chanvre sont en première et dernière position en matière d'impact carbone, avec le même ordre de grandeur en positif et en négatif ($\sim 250 \text{ kgCO}_2/\text{trame}$). L'usage d'un liant à partir de chaux engendre un bilan carbone important et la conductivité plus élevée de tels isolants implique d'utiliser une quantité de matière supérieure pour obtenir un R de paroi équivalent. Le béton « terre-chènevotte » a, quant à lui, l'impact carbone le plus bas (sous les hypothèses d'utilisation de terre et chènevotte locales) et présente ainsi un intérêt certain du fait de sa meilleure performance en été. Les laines de verre et laine de roche atteignent $\sim 100 \text{ kgCO}_2/\text{trame}$, tandis que les autres isolants biosourcés sont plus intéressants sur le plan ACV.

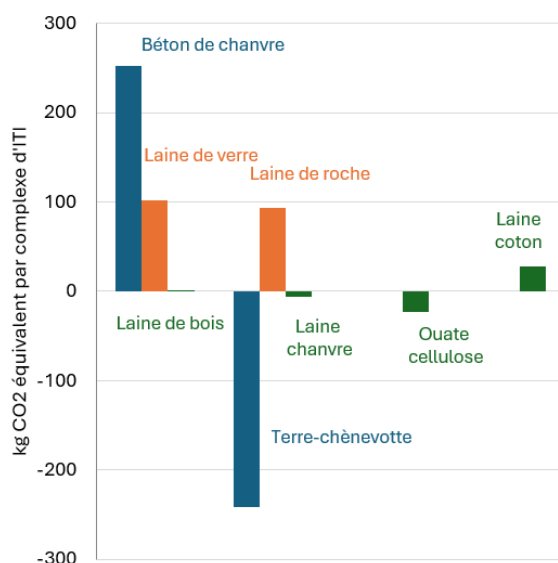


Figure 7 : Comparaison de l'impact carbone des complexes d'ITI pour une trame de $2.45 \times 2.5 \text{ m}^2$

3. CONCLUSION

L'étude menée ici traite d'un comparatif du niveau de confort estival dans le cadre de la rénovation en isolation thermique intérieure pour plusieurs variantes constructives avec des matériaux classiques et biosourcés, en se basant sur des cas représentatifs du bâti ancien alsacien. Ces travaux montrent qu'il n'y a d'écart remarquable entre isolants classiques et biosourcés ni sur le « déphasage » ni sur l'inconfort d'été, hormis pour les bétons de chanvre et béton de terre-chênevotte. D'autre part, la rénovation avec de l'ITI permet d'atteindre des niveaux acceptables de confort durant l'été.

Une analyse du cycle de vie en complément de l'étude thermique montre des disparités importantes selon le type d'isolant choisi : l'impact de la chaux comme liant dans le béton de chanvre est particulièrement élevé, tandis que les autres biosourcés sont plus performants que les isolants classiques.

L'étude a montré que le voile béton et la structure en pan de bois avaient un comportement relativement similaire pour le cas de base sans isolation (voir les courbes de températures intérieures Figures 1 et 2). Il serait cependant intéressant de mener un complément d'étude avec une structure plus « lourde » sur le plan de l'inertie thermique afin de consolider les résultats obtenus.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient la DREAL Grand-Est pour leur contribution à ce travail, effectué dans le cadre du projet de fin d'étude de L. Combes à la DREAL Grand Est pour le compte du Collectif Biosourcés Grand Est ainsi que D. Burger et B. Flament de l'INSA de Strasbourg pour leur encadrement et conseils sur la structure de l'article.

BIBLIOGRAPHIE

- CEREMA et Atelier ODM. (2014). *Habitat ancien en Alsace*. Récupéré sur <https://www.culture.gouv.fr/Regions/DRAC-Grand-Est/aides/fiches-conseils-udap/Bas-Rhin-et-Haut-Rhin/Etude-Habitat-ancien-en-Alsace-amelioration-energique-et-preservation-du-patrimoine>
- Chahwane, L. (2011). *Valorisation de l'inertie thermique pour la performance énergétique des bâtiments*. Université de Grenoble.

- Combes, L. (2024). *Quels outils pédagogiques pour permettre de développer les solutions biosourcées dans le bâtiment ?* INSA de Strasbourg.
- DREAL. (2018). *Habitat ancien en Alsace : amélioration énergétique et préservation du patrimoine.*
- Fraunhofer IBP. (2024). *Material Datensammlung für die energetische Altbausanierung.* Récupéré sur MASEA geprüfte Datenbank: <https://www.masea-ensan.de>
- Hygroba. (2013). *HYGROBA : Etude de la réhabilitation hygrothermique des parois anciennes.* Récupéré sur <https://www.rehabilitation-bati-ancien.fr/espace-documentaire/hygroba-etude-la-rehabilitation-hygrothermique-des-parois-anciennes>
- Izard, J. (2006). *L'inertie thermique dans le bâtiment.* Envirobat-Méditerranée.
- JORF. (2023, octobre 3). BBC rénovation résidentiel. *Article 2 de l'Arrêté du 3 octobre 2023 relatif au contenu et aux conditions d'attribution du label prévu à l'article R. 171-7 du code de la construction et de l'habitation.* Journal officiel de la République Française n°0237.
- Moya, J.-P. (2018). *Isolation thermique durable du bâti ancien.* Le Moniteur Editions.
- RT. (2005). *Règles Th-U Fascicule 2/5 Détermination des caractéristiques thermiques « utiles » des matériaux.*

Un modèle physique pour la prédiction de la hauteur de couche limite nocturne dans Urban Weather Generator

Damien David*¹, Solène Revol²

¹ Université Claude Bernard Lyon 1, CETHIL, UMR5008, CNRS, INSA Lyon, Villeurbanne, F-69100, France

² INSA de Lyon

*damien.david@insa-lyon.fr

RESUME. Un modèle physique permettant l'évaluation de la hauteur de couche limite urbaine nocturne a été implémenté dans l'outil de simulation d'îlot de chaleur urbain Urban Weather Generator, pour constituer le modèle UWG dynamique. Les prédictions du modèle UWG dynamique ont été comparées à des données de mesures. Les comparaisons montrent que les performances du modèle UWG dynamique étaient comparables aux meilleurs résultats qui pouvaient être obtenus avec le modèle Urban Weather Generator non modifié.

MOTS-CLÉS : Ilot de chaleur Urbain, Simulation, Hauteur de couche limite urbaine.

ABSTRACT. A physical model for the evaluation of the nighttime urban boundary layer height was implemented in the urban heat island simulation tool Urban Weather Generator, to constitute the dynamic UWG model. Predictions from the dynamic UWG model were compared to measurement data. Comparisons show that the performances of the dynamic UWG model are comparable to the best results that could be obtained with the unmodified Urban Weather Generator model.

KEYWORDS : Urban heat island, simulation, Urban boundary layer height.

1. INTRODUCTION

Cette étude porte sur l'outil de simulation Urban Weather Generator (UWG) (Bueno et al. 2013). Cet outil permet de prédire l'élévation de température d'air entre un milieu rural et un emplacement urbain, causée par le phénomène d'îlot de Chaleur Urbain (ICU), avec des ressources informatiques limitées. UWG a été utilisé à diverses reprises dans la littérature. Il a par exemple été utilisé pour évaluer les effets de l'ICU sur des performances de bâtiments (Palme et al. 2017), ou pour évaluer les performances de stratégies urbaines d'atténuation de la chaleur (Kim, Gu, et Kim 2018).

Lorsqu'une simulation est réalisée avec UWG, les conditions limites de la simulation sont des données météorologiques rurales. UWG prédit la température de l'air dans le milieu urbain à l'aide d'un jeu de paramètres d'entrée. Une partie des paramètres d'entrée fournissent une description statistique du tissu urbain d'intérêt (densité de bâtiments, matériaux de parois, etc.). Les autres paramètres d'entrée régissent le comportement de l'algorithme de simulation. Cette étude porte sur un paramètre d'entrée problématique : la hauteur de couche limite urbaine nocturne, notée h_{CLU_n} .

La Couche Limite Urbaine (CLU) est la couche basse de l'atmosphère qui est influencée par les échanges thermiques avec le milieu urbain. La hauteur de couche limite urbaine nocturne correspond à

l'épaisseur de la CLU pendant la nuit. Il a été montré que la valeur de ce paramètre avait une influence considérable sur les prédictions d'UWG (Bueno et al. 2014; Mao et al. 2017). Or il n'existe pas de méthode à la fois rigoureuse et rationnelle pour estimer la valeur de la hauteur de couche limite urbaine nocturne. De plus, UWG suppose que cette hauteur est constante dans le temps, et prend la même valeur chaque nuit. Or des analyses de simulations météorologiques ont montré qu'elle pouvait varier en fonction des conditions météorologiques (Le Bras et Masson 2015). Dans cet article, un modèle dynamique d'évaluation de la hauteur de couche limite nocturne pour UWG est proposé.

La première section de cet article sera dédiée à des aspects théoriques : elle comprendra une description du modèle physique d'UWG et du modèle d'évaluation de h_{CLU_n} . La seconde section décrira les données de mesures utilisées pour évaluer la qualité des prédictions d'UWG, et la campagne de simulation qui a été réalisée pour permettre une comparaison des prédictions d'UWG, avec et sans le modèle d'évaluation de h_{CLU_n} . La troisième section présentera les résultats de simulation.

2. MODELE UWG

2.1. MODELE DE BASE

La Figure 1 montre une représentation schématique des éléments du modèle d'UWG qui sont nécessaires pour comprendre les effets de la hauteur de couche limite urbaine sur les prédictions d'UWG. Le rectangle rose représente le volume de la CLU. C'est un volume parallélépipédique dont la longueur, dans le sens du vent, est égale à une longueur caractéristique L renseignée par l'utilisateur, et dont l'épaisseur est égale à la hauteur de couche limite urbaine nocturne h_{CLU_n} .

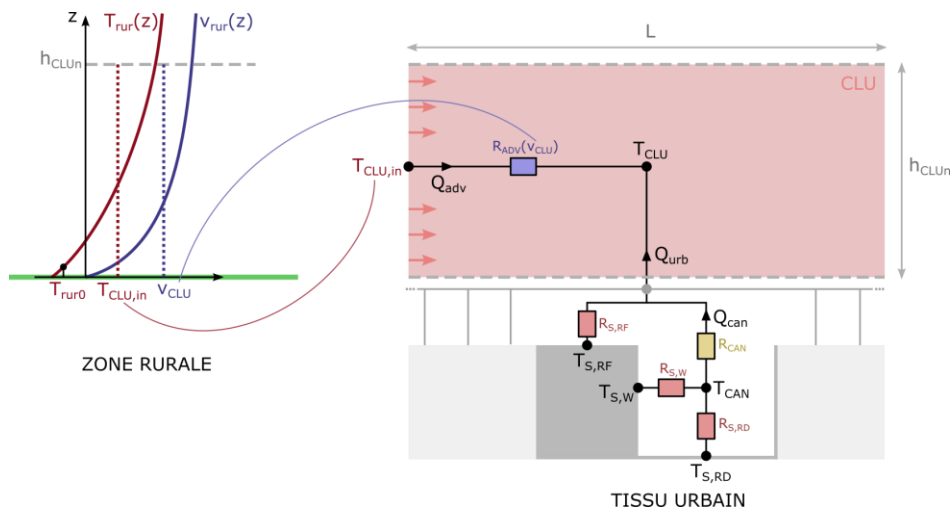


Figure 1 : Modèle UWG de base

UWG résout le bilan de chaleur dans la CLU pour obtenir la température moyenne dans la couche limite urbaine T_{CLU} . Ce bilan de chaleur fait intervenir deux composantes de flux : le flux sensible provenant du milieu urbain Q_{urb} et le flux par advection horizontale Q_{adv} , causé par le transport de la chaleur dans l'écoulement qui traverse la CLU. Le flux de chaleur sensible provenant du tissu urbain est calculé avec un modèle de canopée urbaine. Ce modèle représente le tissu urbain comme une répétition d'un motif élémentaire de canyon urbain anisotrope. Le modèle thermique de ce motif comprend trois nœuds de température de surface (pour les toits, les murs, et le sol), et un nœud de température d'air dans le canyon T_{CAN} . La température d'air dans le canyon constitue la donnée de sortie principale d'UWG.

A partir des données météorologiques rurales, UWG prédit des profils de vitesse $v_{rur}(z)$ et de température $T_{rur}(z)$ dans le milieu rural. La vitesse moyenne de l'air qui traverse la CLU, notée v_{CLU} , est estimée en calculant la moyenne du profil de vitesse rural entre $z = 0$ et $z = h_{CLU_n}$. La température moyenne de l'air qui entre dans la CLU, notée $T_{CLU,in}$, est estimée en calculant la moyenne du profil de température entre $z = 0$ et $z = h_{CLU_n}$, pondérée par la vitesse. L'air est supposé sortir de la CLU à la température T_{CLU} .

Ainsi, la valeur de h_{CLU_n} influence directement deux grandeurs : le débit volumique de l'écoulement d'air qui traverse la CLU, $Q_{V,CLU}$, et $T_{CLU,in}$. Plus h_{CLU_n} est élevé, plus $Q_{V,CLU}$ sera élevé, ce qui devrait avoir pour effet de rapprocher la température de couche limite urbaine T_{CLU} vers la température d'entrée d'air $T_{CLU,in}$. A priori, pendant la nuit, le profil de température rural est croissant, car c'est le sol froid qui rafraîchit l'atmosphère. Donc plus h_{CLU_n} est grand, plus $T_{CLU,in}$ devrait être élevé.

Le schéma de la Figure 1 montre que la température de l'air qui rentre dans la CLU est directement calculée à partir du profil de température en milieu rural. Cela soulève une ambiguïté sur la signification de la longueur L . Dans la documentation d'UWG, ce paramètre est présenté comme la « longueur caractéristique du quartier ». Or, tel qu'il est utilisé par UWG, ce paramètre pourrait représenter la longueur parcourue par l'air entre le milieu rural et le quartier d'intérêt.

2.2. MODELE DE PREDICTION DE LA HAUTEUR DE COUCHE LIMITE URBAINE

La stratégie d'évaluation de la hauteur de couche limite urbaine proposée dans cet article est inspirée des hypothèses du modèle de (Summers 1964). Ce modèle propose une structure simplifiée du profil de température dans les différentes couches de l'atmosphère situées juste au-dessus du tissu urbain. Cette structure est représentée schématiquement dans la Figure 2.

Dans la CLU, l'écoulement est nécessairement instable car cette couche de l'atmosphère est chauffée par le dessous. Or un écoulement instable favorise le transport vertical de la chaleur, et il en résulte un profil de température très homogène qui peut être estimé par un profil constant. Donc $T(z) = T_{CLU}$ dans la couche limite urbaine. Au-dessus de la couche limite urbaine, l'atmosphère n'est plus censée être perturbée par la présence du tissu urbain. On devrait alors retrouver le profil de température rural $T(z) = T_{rur}(z)$. Il devient alors possible de localiser la hauteur de la couche limite urbaine h_{CLU_n} à la jonction des deux profils. La hauteur de couche limite urbain h_{CLU_n} est estimée en résolvant l'équation $T_{rur}(h_{CLU_n}) = T_{CLU}$.

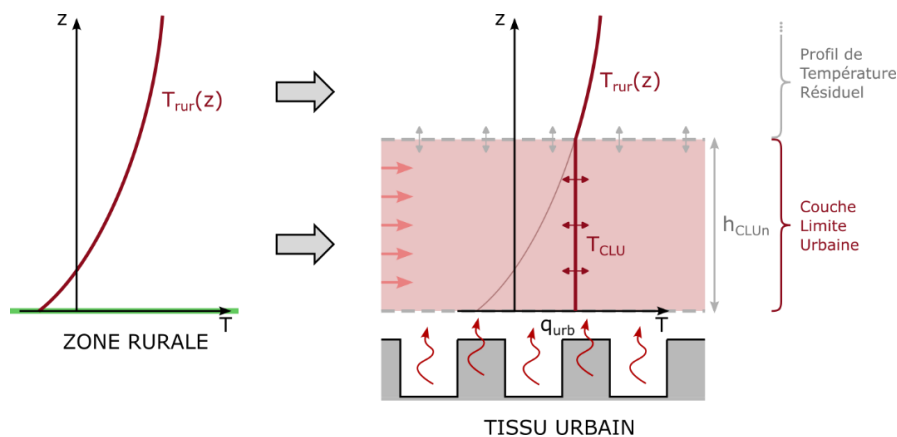


Figure 2: Prédiction de la hauteur de couche limite urbaine nocturne

Ce procédé d'estimation de h_{CLU_n} a été implémenté dans UWG. Dans la suite de ce document, le « modèle UWG de base » fera référence au modèle UWG avec une valeur de h_{CLU_n} fixée arbitrairement par l'utilisateur. Le « modèle UWG dynamique » fera référence au modèle UWG dans lequel le modèle décrit dans cette section a été implémenté.

3. DONNEES DE MESURE – CAMPAGNE DE SIMULATIONS

3.1. CAMPAGNE DE MESURES

L'évaluation de la qualité des prédictions d'UWG se fera à l'aide de données de mesures qui ont été collectées lors d'une campagne de mesures réalisée dans la ville de Lyon durant l'été 2020. Durant la campagne de mesures, la température de l'air extérieur a été mesurée en continu sur quatre sites de mesures identifiés par des points rouge dans la carte de la Figure 3. Les noms des quatre sites de mesure font référence à la période de construction des bâtiments aux alentours : Canut (19^{ème} siècle), Industriel (début du 20^{ème} siècle), Reconstruction (milieu du 20^{ème} siècle), et Contemporain (21^{ème} siècle). La carte indique aussi la position de la station Météo-France de Bron, dont sont issues les données météorologiques rurales. Les images contenues dans le Tableau 1 sont des photographies aériennes du tissu urbain autour des quatre points de mesure. Les sites Canut, Industriel et Reconstruction se trouvent dans le centre-ville dense de Lyon. Le site Contemporain est localisé en périphérie, proche de la Saône.

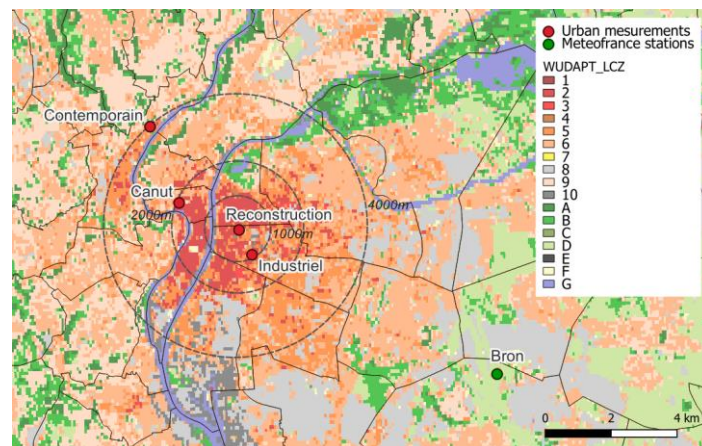
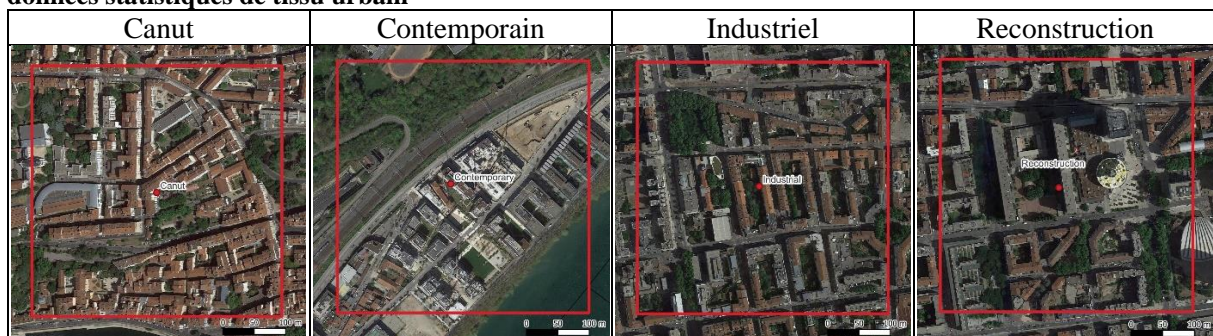


Figure 3: Localisation des points de mesure et de la station météorologique de Lyon Bron

Tableau 1 : Photographies aériennes du tissu urbain autour des points de mesure. Zone de collecte des données statistiques de tissu urbain



3.2. DONNEES MESUREES

Le graphique en haut de la Figure 4 montre les données de température mesurées en ville dans les quatre sites de mesure, et à la station météorologique rurale (en vert). Les données qui nous intéressent sont essentiellement les données mesurées pendant la nuit, car l'ICU est un phénomène essentiellement nocturne. Les périodes de journée sont donc légèrement grisées. Le graphique du bas montre les valeurs d'ICU correspondantes. On désignera dès maintenant avec le terme ICU la différence de température d'air entre un emplacement urbain donné et le milieu rural.

Les valeurs d'ICU mesurées dans le site Contemporain (courbe jaune) sont considérablement plus faibles celles mesurées dans les trois autres sites de mesures. Pour les trois sites, le graphique révèle que durant la période de mesure, les conditions météorologiques autour de la ville de Lyon sont passées par plusieurs séquences, qui ont résulté en des valeurs d'ICU très variées. On identifie alors les nuits avec un fort ICU, de l'ordre de 5°C (nuits identifiées h1 à h4), les nuits avec un ICU modéré, qui dépasse 3°C (nuits m1 à m3), les nuits à ICU faible (nuits l1 à l8), et les nuits durant lesquelles l'ICU est presque nul (nuits nn1 et nn2).

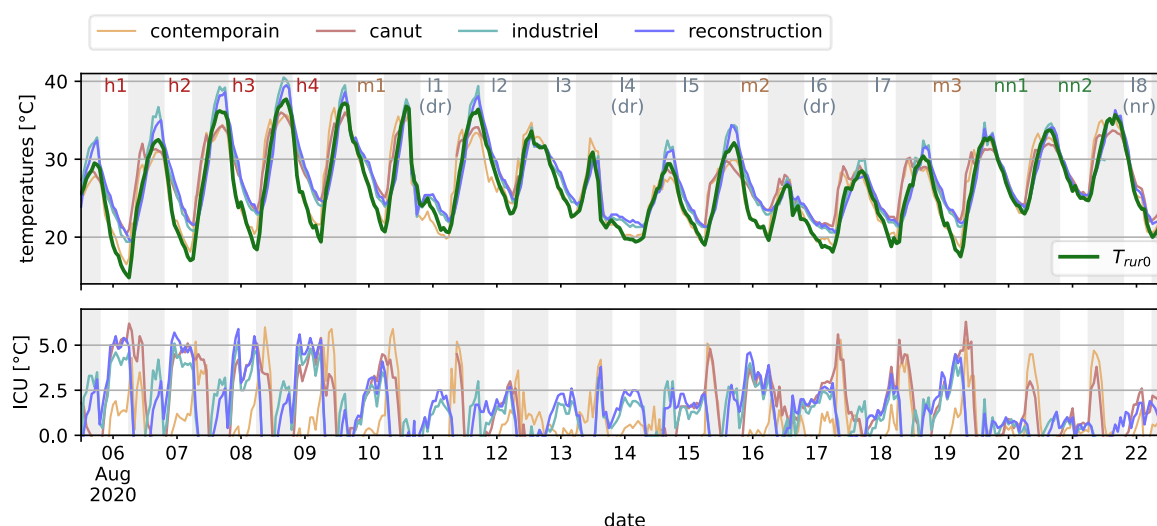


Figure 4 : Températures mesurées à la station météorologique et aux sites de mesure urbains. Valeurs d'ICU pour ces quatre sites.

3.3. CAMPAGNE DE SIMULATIONS

Pour permettre une comparaison des données de mesure avec les prédictions d'UWG, les simulations ont été réalisées avec des jeux de valeurs des paramètres descriptifs du tissu urbain correspondant aux quatre sites de mesure. Pour chacun de ces sites, différentes combinaisons de valeurs des paramètres h_{CLU_n} et L ont été testées. Les valeurs testées pour h_{CLU_n} sont : 150m, 100m (valeurs asymptotiquement élevées), 80m, 50m, 30m (valeurs couramment employées), 10m (valeur asymptotiquement basse) avec le modèle UWG de base, et le modèle UWG dynamique. Les valeurs testées pour L sont : 400m, 1000m (taille de petits quartiers), 2000m, 4000m et 6000m (distance entre un centre-ville et sa périphérie urbaine).

4. ANALYSE DES RESULTATS DE SIMULATION

4.1. ANALYSE QUALITATIVE

Les résultats de simulation obtenus pour le site Reconstruction sont affichés dans la Figure 5, pour trois valeurs de longueur caractéristique L : 400m, 1000m, et 4000m. Les résultats de simulation obtenus avec le modèle de base sont affichés avec des courbes en nuance de gris. Les résultats de simulations obtenus avec le modèle dynamique sont affichés en rouge. Les graphiques montrent également les températures mesurées. Plus les résultats de simulation se rapprochent de la température mesurée en milieu urbain (courbe bleu), meilleures sont les prédictions.

Lorsque des nuits d'ICU presque nul (nn1, nn2), les résultats de simulation ne dépendent presque pas des valeurs de h_{CLU_n} ni de L , et ils sont systématiquement proches des données mesurées. A contrario, lors des nuits avec un ICU élevé (h1 à h4), les prédictions d'UWG dépendent fortement des valeurs de h_{CLU_n} et de L . Sur chaque graphique, on voit que plus h_{CLU_n} est élevé, plus les températures prédites par UWG sont élevées. Il se pourrait que cela soit dû à des températures d'entrée d'air dans la CLU plus élevées, comme évoqué dans la section 2.1. Une comparaison des différents graphiques montre que lorsque h_{CLU_n} est élevé (courbes gris foncé, presque noir), les températures prédites ne dépendent presque pas de la longueur caractéristique L . Cette longueur n'a d'influence que lorsque h_{CLU_n} est faible (courbes gris clair). Dans ce cas, plus la longueur caractéristique est grande (graphiques du bas), plus la température prédite est élevée.

Durant certaines nuits avec un ICU faible ou modéré (m1 et 11-18), les prédictions d'UWG présentent des variations brutales de température, pour des combinaisons de paramètres mêlant une longueur caractéristique faible (400m ou 1000m, graphique du bas), et une hauteur de couche limite faible (10m ou 30m courbes en gris clair). Ces variations brutales ne semblent pas avoir d'explication physique.

Il semble, à la vue de ces graphiques, que les meilleurs résultats de simulations obtenus avec le modèle UWG de base correspondent aux combinaisons de paramètres ($h_{UBL_n} = 30m$, $L = 400m$) et ($h_{UBL_n} = 10m$, $L = 1000m$). Les meilleurs résultats sont donc obtenus avec une valeur plutôt faible de hauteur de couche limite urbaine nocturne.

Les évolutions de température obtenues avec le modèle dynamique (courbe rouge), suivent de très près les évolutions de température obtenues avec le modèle UWG de base pour $h_{CLU_n} = 10m$. Cependant, les variations brutales de température observées avec $h_{CLU_n} = 10m$ ne sont pas reproduites par le modèle dynamique. Le modèle dynamique semble produire de meilleures prédictions de température lorsque $L = 1000m$.

Le graphique du bas montre l'évolution de la hauteur de couche limite prédite par le modèle dynamique, pour les trois valeurs de longueur caractéristique correspondant aux trois graphiques du dessus. Les évolutions en palier sont dues au fait que, pour éviter des problèmes de non conservation de l'énergie, il ait fallu que les valeurs de h_{CLU_n} correspondent aux points de maillage du modèle utilisé pour estimer le profil de température rural. Durant les nuits avec un ICU élevé (h1-h4), la hauteur de couche limite prédite est systématiquement plus basse (entre 20m et 40m) que durant les nuits avec un ICU presque nul (au-dessus de 80m), mais elle n'atteint jamais 10m. Plus la longueur caractéristique augmente, plus la hauteur de couche limite prédite est élevée. En effet, plus la longueur caractéristique

est grande, plus la quantité de chaleur transmise à la CLU est grande, et plus la hauteur de couche limite doit s'élever afin d'absorber la chaleur dégagée par le milieu urbain.

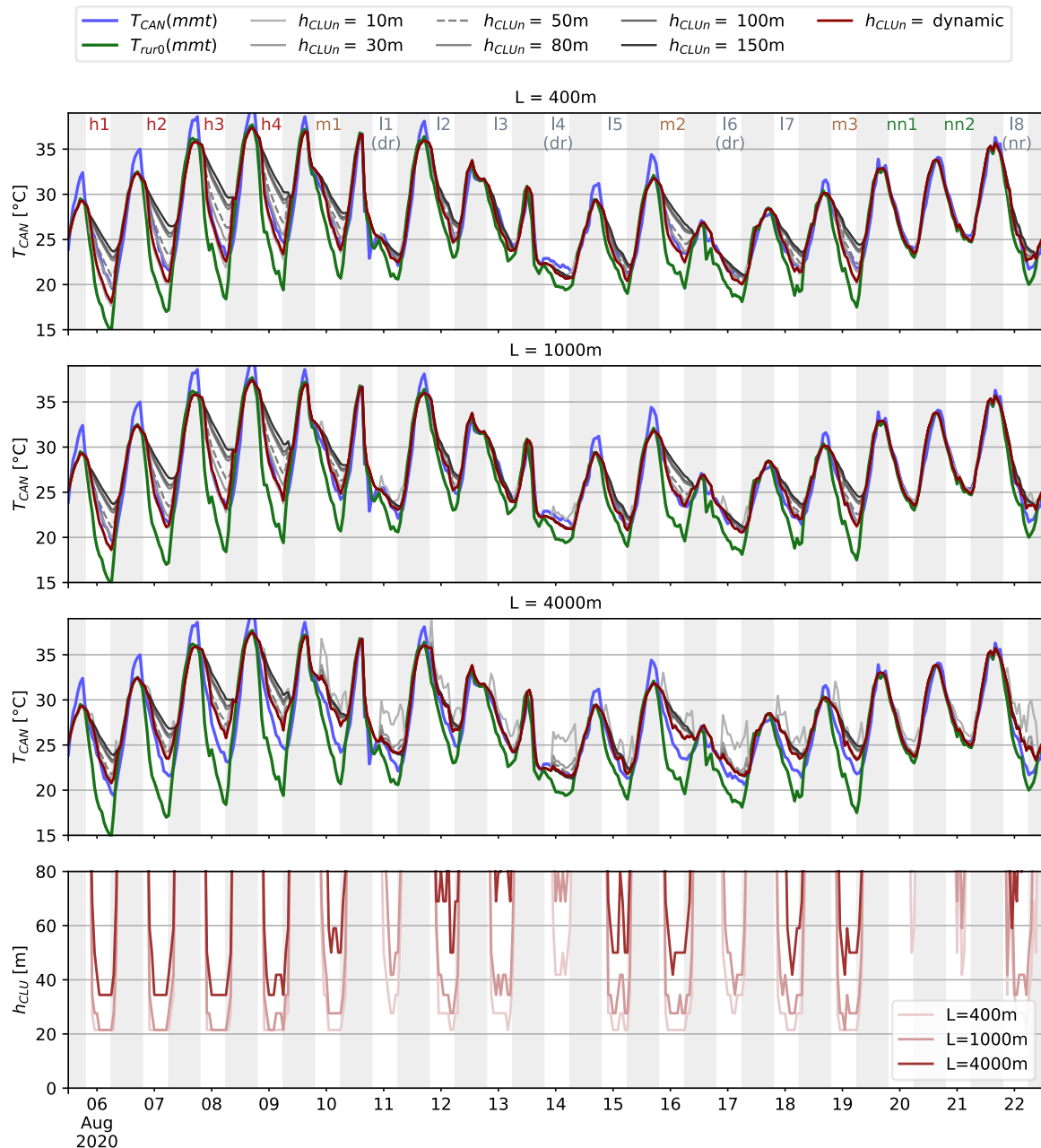


Figure 5 : Comparaison des résultats de simulation et des températures d'air mesurées sur le site Reconstruction. Valeurs de hauteur de couche limite urbaine prédite par le modèle dynamique.

4.2. EVALUATION DES ERREURS

La Figure 6 montre les valeurs des erreurs moyennes quadratiques (RMSE) entre les températures prédites par UWG et les températures mesurées en ville pendant la nuit (T_{CANn}), pour les quatre sites de mesure, et pour les différents paramétrages d'UWG explorés lors de la campagne de simulations. Les erreurs calculées sont beaucoup plus élevées pour le site situé en périphérie de ville et au bord de la Saône (Contemporain), que pour les sites situés en centre-ville (Canut, Industriel, et Reconstruction).

Pour ces derniers sites, les graphiques d'erreur confirment qu'avec le modèle de base, les erreurs sont plus faibles pour des combinaisons de valeurs basses de h_{CLU_n} et L . Les résultats du modèle

dynamique sont systématiquement meilleurs pour $L \geq 2000m$. Ils sont meilleurs pour $L = 1000m$ dans le site Industriel. Ces courbes montrent clairement que la précision des résultats obtenus avec le modèle UWG dynamique est comparable avec la précision des résultats obtenus avec un paramétrage optimal du modèle UWG de base, où h_{CLU_n} est laissé à l'appréciation de l'utilisateur.

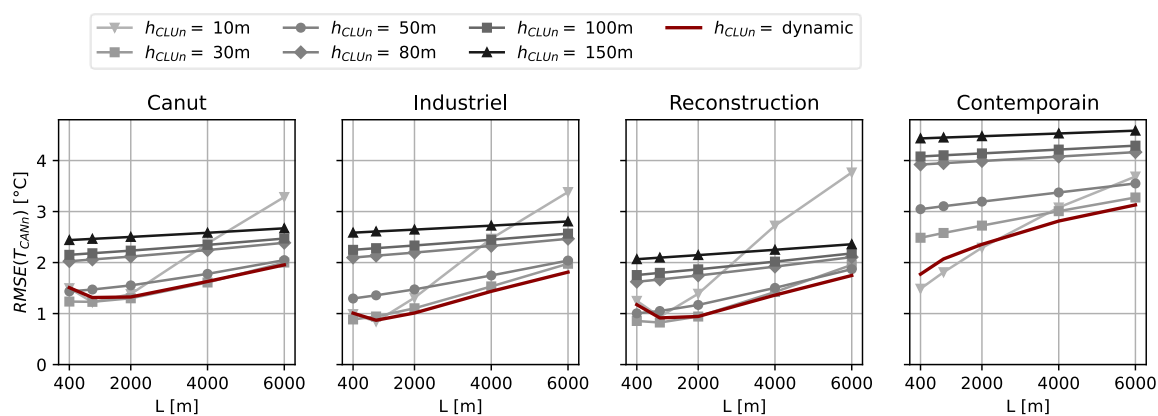


Figure 6 : Erreur quadratique moyenne entre les prédictions d'UWG et les résultats de mesures, pour les quatre sites de mesures, et pour toutes les combinaisons de valeurs de longueur caractéristique L et hauteur de couche limite h_{CLU_n} explorées durant la campagne de simulation.

5. CONCLUSION

Un modèle physique d'évaluation de la hauteur de couche limite urbaine a été implémenté dans UWG pour constituer le modèle UWG dynamique. L'analyse des évolutions de température et le calcul des erreurs ont montré que les performances du modèle UWG dynamique étaient comparables aux meilleurs résultats qui pouvaient être obtenus avec une paramétrisation optimale du modèle UWG de base.

Les résultats de simulation soulèvent néanmoins la question de la représentativité de la longueur caractéristique L . La manière dont ce paramètre est utilisé par le modèle laisserait supposer que ce paramètre pourrait représenter la distance entre la périphérie rurale et la zone urbaine d'intérêt, mais la longueur pour laquelle les meilleurs résultats ont été obtenus est beaucoup plus courte. Des analyses plus approfondies seront nécessaires pour clarifier la signification de ce paramètre.

6. BIBLIOGRAPHIE

- Bueno, Bruno, Leslie Norford, Julia Hidalgo, et Grégoire Pigeon. 2013. « The urban weather generator ». *Journal of Building Performance Simulation* 6 (4): 269-81. <https://doi.org/10.1080/19401493.2012.718797>.
- Bueno, Bruno, Matthias Roth, Leslie Norford, et Reuben Li. 2014. « Computationally efficient prediction of canopy level urban air temperature at the neighbourhood scale ». *Urban Climate* 9 (septembre): 35-53. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2014.05.005>.
- Kim, Hyounghsub, Donghwan Gu, et Hwan Yong Kim. 2018. « Effects of Urban Heat Island Mitigation in Various Climate Zones in the United States ». *Sustainable Cities and Society* 41 (août): 841-52. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.06.021>.
- Le Bras, Julien, et Valéry Masson. 2015. « A Fast and Spatialized Urban Weather Generator for Long-Term Urban Studies at the City-Scale ». *Frontiers in Earth Science* 3 (juin). <https://doi.org/10.3389/feart.2015.00027>.
- Mao, Jiachen, Joseph H. Yang, Afshin Afshari, et Leslie K. Norford. 2017. « Global Sensitivity Analysis of an Urban Microclimate System under Uncertainty: Design and Case Study ». *Building and Environment* 124 (novembre): 153-70. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.08.011>.

- Palme, M., L. Inostroza, G. Villacreses, Andrea Lobato-Cordero, et C. Carrasco. 2017. « From Urban Climate to Energy Consumption. Enhancing Building Performance Simulation by Including the Urban Heat Island Effect ». *Energy and Buildings* 145 (juin): 107-20.
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.03.069>.
- Summers, Peter William. 1964. « An urban ventilation model applied to Montreal ». McGill University. <https://escholarship.mcgill.ca/concern/theses/hx11xj31k>.

Potentiel solaire exploité par un bâtiment : Évaluation des composantes actives et passives de son enveloppe

Ali Derai^{1,4}, Monika WOLOSZYN^{1,4}, Amandine PIOT^{2,4}, Lamia BERRAH^{3,4}

¹ Univ. Savoie Mont Blanc, LOCIE, Le Bourget du Lac, France

² Univ. Grenoble Alpes, CEA, LITEN, INES, Le Bourget du Lac, France

³ Univ. Savoie Mont Blanc, LISTIC, Annecy-le-Vieux, France

⁴ Univ. Savoie Mont Blanc, Solar Academy Graduate School, Le Bourget du Lac, France

*Ali.derai@univ-smb.fr

RESUME. Cet article présente le concept de « potentiel solaire exploité » pour quantifier la partie effectivement utilisée du potentiel solaire disponible sur un bâtiment. La méthodologie développée permet d'évaluer le potentiel exploité à la fois par les stratégies passives de l'enveloppe et par les systèmes solaires actifs. Une étude de cas sur une maison individuelle modélisée avec EnergyPlus analyse l'application de cette approche. Les résultats obtenus soulignent l'utilité du potentiel exploité pour évaluer de façon exhaustive la contribution du solaire aux performances énergétiques du bâtiment.

MOTS-CLÉS : Bâtiments, Energie, Potentiel solaire.

ABSTRACT. This article introduces the concept of 'exploited solar potential' as a method for quantifying the portion of available solar potential actually utilized by a building. The methodology is developed to assess the exploited potential both through passive strategies of the envelope and active solar systems. A case study on an individual house modelled with EnergyPlus demonstrates the application of this approach. The results underscore the usefulness of the exploited potential for comprehensively evaluating the solar contribution to the building's energy performance.

KEYWORDS: Buildings, Energy, Solar Potential.

1. INTRODUCTION

Les environnements entourant les bâtiments constituent une source d'énergie gratuite, exploitable de manière active ou passive, pour répondre à leurs besoins en chauffage ou en rafraîchissement. Ces environnements incluent l'air, le ciel et le soleil (Smith and Gentle 2017; Yang, Yan, and Lam 2014). Leur exploitation par un bâtiment est limitée, notamment en raison de la surface de son enveloppe. Le potentiel solaire est défini comme la proportion de l'énergie solaire incidente sur l'enveloppe du bâtiment pouvant être utilisée pour répondre aux besoins du bâtiment (Wittmann et al. 1997). La mesure de ce potentiel se concentre généralement sur l'irradiance solaire, exprimée en W/m² (Kämpf et al. 2010). Cependant, cette définition ne tient pas compte de la quantité réelle d'énergie effectivement utilisée par le bâtiment. Pour combler cette lacune, nous étudions le concept de « potentiel exploité », un terme peu courant dans la recherche, qui quantifie la partie réellement utilisée du potentiel solaire ou environnemental (air et ciel) (Chesné et al. 2012). La méthode de calcul du potentiel exploité tire son inspiration de l'approche initiée dans les travaux de recherche de (Tittlein 2008). Dans ses travaux, une définition de l'efficacité solaire d'un bâtiment a été proposée, comme la fraction du rayonnement solaire atteignant la structure de bâtiment, qui est valorisée soit de manière passive (pour le chauffage,

l'éclairage), soit de manière active (pour la production d'eau chaude ou d'électricité) pendant une période donnée. Chesné 2012 a intégré cette définition dans une méthodologie plus structurée, pour quantifier l'indicateur qu'elle a nommé le "Potentiel exploité".

Dans cet article, nous présentons une évaluation de ce potentiel solaire exploité appliquée à une maison résidentielle. La méthode s'appuie sur des simulations numériques dynamiques réalisées avec le logiciel EnergyPlus. Une première étape consiste en une analyse à l'échelle du bâtiment afin d'évaluer les performances globales en termes de besoins de chauffage et de potentiel solaire exploité au niveau de l'enveloppe. Une deuxième étape se focalise sur l'examen des composants individuels constituant l'enveloppe du bâtiment, à savoir les murs et les fenêtres. Une troisième étape vise à adapter le calcul du potentiel exploité pour prendre en compte des systèmes actifs tels que le photovoltaïque et la pompe à chaleur. Cet article vise à affiner de nouveaux indicateurs de performance énergétique, en complément des méthodes classiques. Il s'agit d'analyser précisément la définition et l'utilisation de ces indicateurs, tout en identifiant leurs limites. L'objectif est également d'analyser les résultats quant à leur intégration dans l'évaluation des systèmes énergétiques passifs et actifs du bâtiment, afin d'obtenir une vision plus complète de leur performance.

2. DEFINITION DES INDICATEURS ET PRESENTATION DE LA MAISON.

Dans cette section de l'article, nous allons examiner la définition des indicateurs et présenter une description concise de notre cas d'étude.

2.1. DEFINITION DES INDICATEURS

La méthode d'évaluation du potentiel exploité se divise en deux étapes distinctes. La première consiste à calculer les besoins obtenus à partir de la simulation conventionnelle d'un bâtiment dans son environnement, prenant en compte toutes les ressources énergétiques. Ces besoins sont désignés comme les "besoins résiduels". Ensuite, il convient de calculer les besoins énergétiques en l'absence d'une des ressources, le soleil dans notre cas. C'est ce que l'on appelle les "besoins réels" par rapport à une ressource spécifique comme présenté sur la Figure 1.

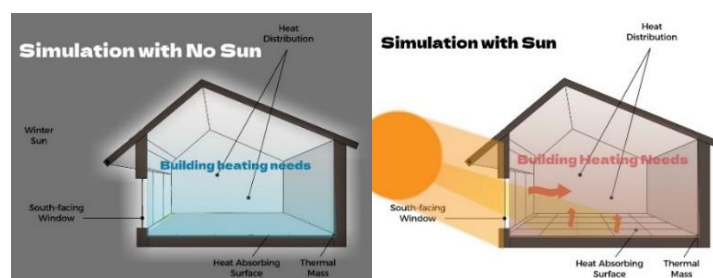


Figure 1: Les deux cas de simulation (a-Absence de soleil, b-Présence de soleil)

La différence entre les besoins du bâtiment dans les deux cas, permet de définir la partie de la ressource effectivement utilisée par le bâtiment, ce que l'on nomme le "Potentiel exploité" :

$$P_{exp}(t) = b_r(t) - b(t) \quad (1)$$

La formule (1) présente le potentiel exploité $P_{exp}(t)$ défini comme la différence entre les besoins réels $b_r(t)$, et les besoins résiduels $b(t)$. Le besoin réel $b_r(t)$, est calculé comme le besoin instantané relatif à l'usage pour le chauffage dans la simulation sans la ressource de soleil. À partir de la définition du potentiel exploité, il est possible de déduire deux indicateurs de performance, appelés taux de couverture et taux d'exploitation. Le taux de couverture représente la proportion des besoins

énergétiques réels du bâtiment qui sont couverts par la ressource. Tandis que le taux d'exploitation représente la part de l'énergie de la ressource qui est effectivement utilisée par le bâtiment.

$$\text{Le taux d'exploitation} = P_{exp}(t)/\text{Rayonnement solaire incident} \quad (2)$$

$$\text{Le taux de couverture} = P_{exp}(t)/b_r(t) \quad (3)$$

Cependant, à l'échelle d'une paroi, le concept de "besoins" ne devient pas pertinent. À la place, la notion de "flux utile" a été introduite initialement dans les recherches de Chesné 2012 pour évaluer précisément le potentiel exploité d'une ressource par un mur. Le "flux utile" représente l'échange de chaleur entre la surface du mur et le volume d'air à l'intérieur du bâtiment. Lorsqu'un mur est exposé au rayonnement solaire sur sa face extérieure, il absorbe une partie de l'énergie solaire incidente, entraînant une augmentation de sa température. Par la suite, le mur chauffé libère une partie de la chaleur accumulée dans l'environnement intérieur par des processus convectifs et radiatifs contribuant ainsi à la charge de chauffage intérieure. Ce paramètre, exprimé en (W) ou (W/m²), représente le flux thermique transférée de la face intérieure du mur vers l'environnement intérieur. L'évaluation de ce paramètre offre des informations sur la manière dont le mur exploite l'énergie solaire pour contribuer au chauffage.

Dans la simulation ce flux convectif est noté $\phi_c(t)$, il est égal à :

$$\phi_c(t) = h_{int}(T_s(t) - T_{int}(t)) \quad (4)$$

Pour calculer l'échange par rayonnement interne Energyplus utilise la méthode ScriptF et la méthode CarrollMRT, qui calcule le transfert de chaleur par rayonnement net pour chaque surface en utilisant l'équation (5) F'_r est la résistance au rayonnement du corps gris, T_r est la température radiante moyenne, et T_s est la température de la surface. Pour plus de détails regardés (US Department of Energy 2020)

$$\phi r_s = (T_s^4(t) - T_r^4(t)) \quad (5)$$

Le flux total $\phi t_s(t)$ égale de la somme de flux convectif et radiatif de la surface de parois, éq (6)

$$\phi t_s(t) = \phi c_s(t) + \phi r_s(t) \quad (6)$$

Le potentiel solaire exploité $P_{exp}(t)$ et alors défini comme la différence des deux flux (simulation en absence de soleil $\phi t_0(t)$ et présence de soleil $\phi t_s(t)$)

$$P_{exp}(t) = \phi t_0(t) - \phi t_s(t) \quad (7)$$

2.2. PRESENTATION DU BATIMENT

Dans cette étude, nous avons examiné la Maison INCAS I-DM, une maison expérimentale de 80 m² sur deux niveaux, située à INES Chambéry, en France. Nous avons choisi ce bâtiment en raison de la disponibilité d'informations bien documentées sur ses caractéristiques. Les résultats des études antérieures sur la Maison INCAS ont été rigoureusement comparés et validés par rapport à des mesures, ce qui garantit la fiabilité de la modélisation énergétique utilisée. Nous avons étudié deux versions de la maison : une non isolée avec un coefficient de transmission thermique des parois opaques de U=2,92 W/m²K, et une isolée avec U=0,304 W/m²K. Les proportions de surface vitrée par rapport à la surface opaque sont de 36 % pour le sud, 15 % pour l'ouest, 6 % pour l'est et 4 % pour le nord. La maison non isolée est équipée d'un simple vitrage et la maison isolée d'un double vitrage, sans protections solaires dans les deux cas. Des débordements prolongés orientés vers le sud sont présents au-dessus des fenêtres du rez-de-chaussée et de l'étage pour limiter le rayonnement solaire direct en été. Nous avons utilisé DesignBuilder comme logiciel de modélisation et EnergyPlus pour les simulations. Le modèle adopté

se compose de deux zones correspondantes à chaque niveau de la maison, sans tenir compte des ponts thermiques. Dans le premier cas d'étude, nous avons considéré un système de CVC idéal non modélisé où la température de consigne pour le chauffage a été fixée à 19 °C. Dans le deuxième cas, nous avons considéré un système de CVC comprenant une pompe à chaleur air-air et un système de production PV.

3. EVALUATION DES PERFORMANCES PASSIVES

Dans la prochaine section, notre attention se concentre sur l'évaluation de la performance globale du bâtiment, en mettant en lumière le potentiel exploité au niveau de son enveloppe dans son ensemble. Par la suite, nous analyserons les composants individuels de cette enveloppe, évaluant le potentiel solaire exploité par chaque élément de paroi séparément.

3.1. POTENTIEL EXPLOITE A L'ECHELLE DU BATIMENT

L'étude initiale se concentre sur l'évaluation de la performance globale du bâtiment en utilisant les indicateurs de besoin, et en mettant particulièrement en évidence le potentiel exploité au niveau de son enveloppe. Les résultats des besoins en chaleur et du potentiel exploité sont présentés dans la figure 2 pour les deux cas : le bâtiment non isolé et le bâtiment isolé. La période sélectionnée pour l'analyse, du 19 au 29 janvier 2021, est représentative de la saison hivernale où les besoins de chauffage sont les plus élevés.

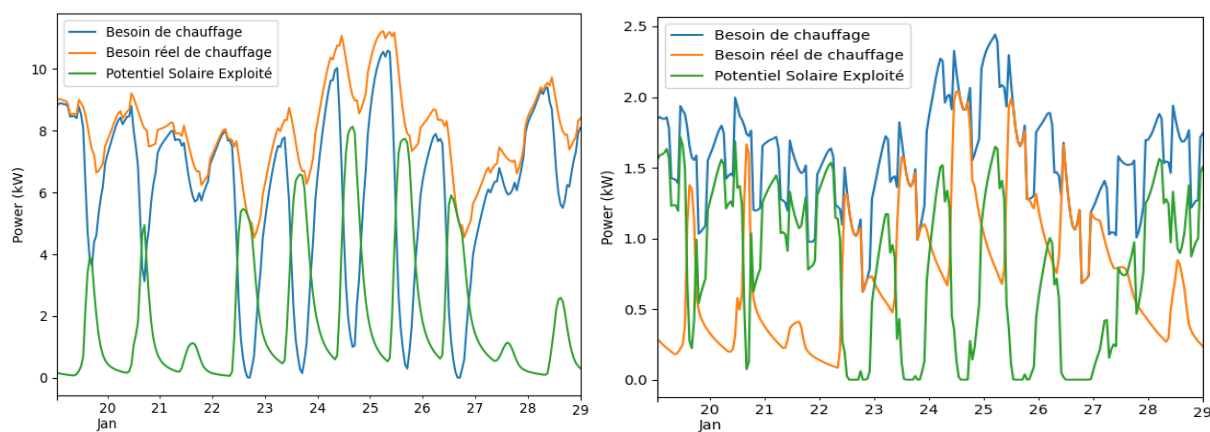


Figure 2 : Besoin de chauffage et potentiel exploité de bâtiment (a-maison non isolée, b-maison isolée)

La figure 2-a montre une maison sans isolation, où l'on observe des fluctuations périodiques de la demande de chaleur en fonction du temps extérieur. Le soleil peut partiellement chauffer la maison pendant la journée. En revanche, pour une maison isolée (figure 2-b), les variations de la demande de chaleur sont moins directement liées au temps extérieur et dépendent davantage des charges internes et de l'usage de la maison. L'isolation réduit le besoin de chauffage en conservant la chaleur à l'intérieur et en diminuant la dépendance aux conditions extérieurs. Cela se traduit par des courbes de potentiel exploité majoritairement positives, indiquant que le potentiel solaire peut couvrir une partie des besoins énergétiques de la maison. Cependant, le potentiel exploité diminue dans le cas d'une maison isolée en raison de l'effet isolant qui limite le potentiel solaire exploité par l'enveloppe.

Le taux de couverture et le taux d'exploitation sont calculés à partir des données d'analyse du potentiel solaire exploité pour une période de dix jours représentatifs de l'hiver (du 19 au 29 janvier), comme le montre la figure 3. Ce sont deux indicateurs dérivés de l'exploitation du potentiel solaire. Dans le cas d'une maison non isolée, le taux d'exploitation est d'environ 25 % et le taux de couverture est de

24 %. Cela signifie qu'environ un quart du potentiel solaire disponible est effectivement utilisé pour répondre aux besoins énergétiques du bâtiment. Lorsque l'isolation est améliorée, le taux d'exploitation diminue significativement à 10 %, confirmant que l'isolation réduit la capacité d'exploitation du potentiel solaire en isolant le bâtiment de son environnement.

Parallèlement, le taux de couverture pour un bâtiment isolé augmente, atteignant 48%. Cette augmentation est attribuable à la réduction significative des besoins énergétiques du bâtiment grâce à l'isolation. Malgré une utilisation moindre du potentiel solaire comparée à la maison non isolée, la part du potentiel solaire utilisée devient plus significative par rapport aux besoins réduits du bâtiment.

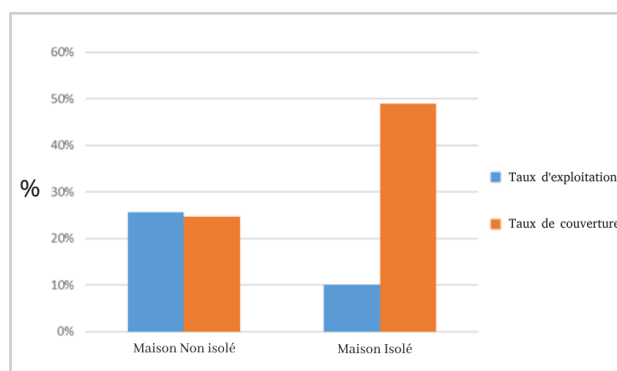


Figure 3 : Taux de couverture et taux d'exploitation

Ainsi, presque la moitié des besoins énergétiques d'une maison isolée peut être couverte par l'énergie solaire. Ceci souligne l'intérêt de considérer l'amélioration de l'isolation et l'exploitation du potentiel solaire comme des stratégies complémentaires pour augmenter l'efficacité énergétique des bâtiments.

3.2. POTENTIEL EXPLOITE A L'ECHELLE DES COMPOSANTS

Après avoir analysé l'ensemble du bâtiment, nous nous concentrons désormais sur les composants individuels de l'enveloppe. En considérant la surface d'un mur, nous déterminons l'irradiance solaire totale (rayonnement direct et diffus) reçue. Cela permet d'évaluer le potentiel solaire disponible pour chaque façade et constitue une étape préliminaire avant d'évaluer la capacité du bâtiment à exploiter ce gisement. L'évaluation de potentiel exploité repose sur les échanges thermiques entre la surface intérieure des parois et l'air intérieur de la maison, en absence et en présence de rayonnement solaire. La figure 4 présente le potentiel solaire exploité par la paroi sud de la maison étudiée durant la période s'étalant du 19 au 29 janvier.

Le potentiel exploité correspond à la quantité de chaleur supplémentaire apportée à l'air intérieur de la maison. Sur la courbe, en l'absence de soleil, on remarque que l'échange de chaleur est négatif, ce qui signifie que la surface reçoit de la chaleur du milieu intérieur de la zone (déperditions thermiques). En présence de rayonnement, on observe des échanges négatifs et positifs en relation avec les heures de la journée. Le potentiel exploité est la différence entre les deux courbes ; il est positif ou nul la nuit et représente la chaleur provenant de la source solaire traversant la paroi sud et fournissant à l'intérieur du bâtiment. Certains jours, on peut constater que le potentiel exploité est positif même la nuit, alors qu'il n'y a plus de rayonnement, ce qui démontre l'effet d'inertie. L'enveloppe du bâtiment absorbe le soleil le jour et le dégage lentement le soir. On remarque donc qu'en utilisant le potentiel exploité, on peut aussi avoir une information sur l'inertie des parois. Des études plus poussées sur ce sujet pourraient éclaircir davantage ses aspects.

La méthode employée permet ainsi de quantifier précisément le gain énergétique associé à chaque façade selon son orientation. Elle offre en outre la possibilité d'évaluer différentes configurations constructives au regard de leur capacité à tirer parti du rayonnement solaire.

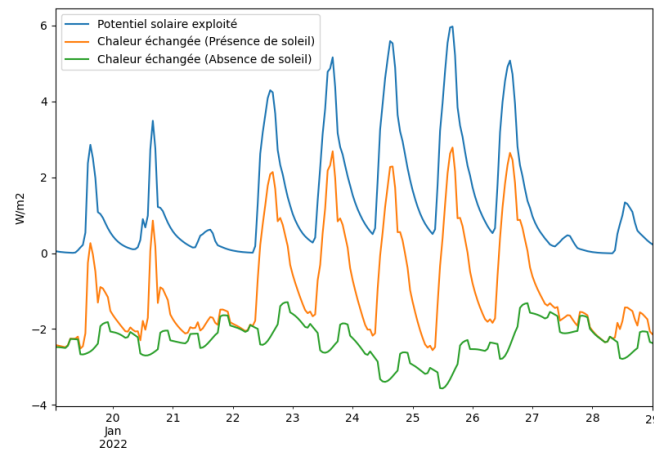


Figure 4 : Potentiel solaire exploité sur la paroi opaque sud

L'analyse du potentiel exploité par les parois peut être généralisée et utilisée pour comparer les performances d'autres parois de la maison en fonction de l'orientation. Cela permet de comprendre quelles parois sont les mieux placées pour utiliser passivement le rayonnement solaire pour le chauffage. Cela peut être utile pour guider les décisions concernant l'emplacement des fenêtres, les ombrages, la sélection des matériaux. La comparaison du potentiel exploité entre les parois révèle les domaines où l'exploitation de la chaleur solaire peut être améliorée.

4. EVALUATION DES SYSTEMES ACTIFS

Dans l'étude précédente, un système idéal non modélisé a été utilisé, le potentiel exploité avait été défini en fonction des besoins de la maison. La prochaine étape de cette recherche vise à examiner et à ajuster l'indicateur de potentiel exploité pour les systèmes actifs, transformant l'énergie solaire. Plus concrètement, nous modélisons un système composé d'une installation photovoltaïque de 2500Wc installée en façade et d'une pompe à chaleur air-air avec un coefficient de performance de 2,5.

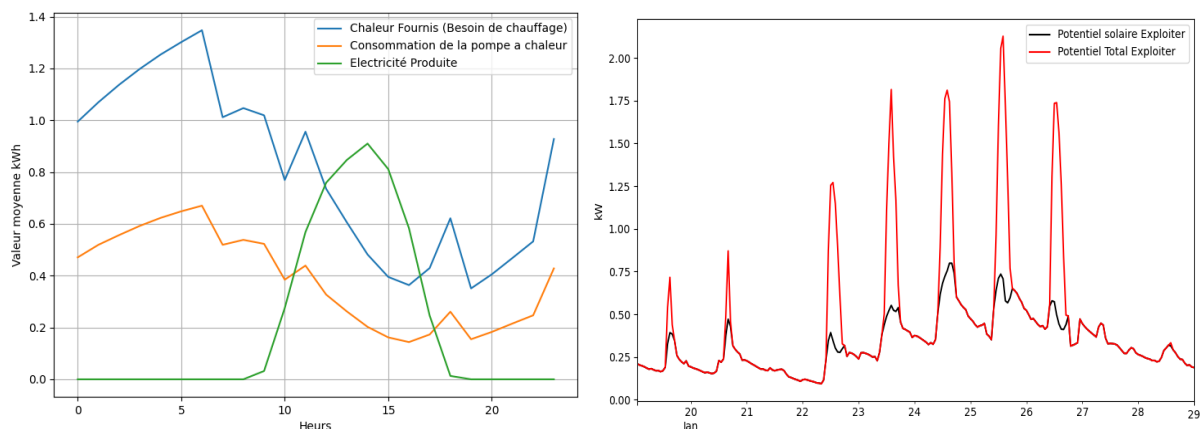


Figure 4 : a- Moyenne horaire de la consommation et production, b-Potentiel exploité et potentiel total exploité

La consommation correspond à l'énergie électrique requise par la pompe à chaleur pour fournir la quantité de chaleur nécessaire au maintien de la température de consigne dans le bâtiment à tout moment. Nous réappliquons la méthodologie utilisée dans la première partie de l'étude, en effectuant des

simulations avec et sans rayonnement solaire. Cela permet de calculer le potentiel exploité et d'évaluer l'impact total du rayonnement solaire. La figure 6a illustre les données moyennes de consommation et de production énergétique, recueillies heure par heure tout au long de la période hivernale. La production d'électricité par les panneaux photovoltaïques est également représentée. Sur la base de ces informations, nous calculons le potentiel exploité en fonction de la consommation électrique (figure 6b), autre que le besoin énergétique vu dans l'étude passive. Nous définissons également le potentiel exploité total, incluant à la fois le potentiel exploité et l'énergie générée par les panneaux photovoltaïques. Cela permet de quantifier de manière exhaustive la contribution du soleil, à la fois de manière active (via le PV) et passive (par la réduction de la consommation énergétique pour le chauffage), sur les performances énergétiques du bâtiment.

5. DISCUSSIONS

L'analyse sur l'enveloppe du bâtiment a permis de quantifier précisément le potentiel solaire exploité à l'échelle de la maison en entier et à l'échelle de la paroi sud. En comparant les besoins énergétiques du bâtiment avec et sans le rayonnement solaire, nous avons pu comprendre le rôle de l'énergie solaire dans la satisfaction des besoins énergétiques. Cela nous a permis d'analyser l'impact du potentiel solaire sur les performances énergétiques globales du bâtiment. L'analyse du potentiel exploité par un composant permet de comprendre l'influence des propriétés des murs sur le transfert des gains de chaleur solaire. L'analyse en série temporelle montre comment la chaleur solaire est distribuée dans le temps à l'intérieur du bâtiment. Cela aide à évaluer les charges et à élaborer des stratégies de confort intérieur. L'ajustement du potentiel exploité sur la deuxième partie de l'étude en incluant à la fois l'enveloppe (passive) et les systèmes (actifs) enrichit la méthodologie d'évaluation, donnant une mesure plus complète des performances énergétiques, qui tient compte de la réduction de la consommation et de la production d'énergie renouvelable. Cela met en évidence les avantages de l'intégration des technologies solaires actives et passives.

L'indicateur de potentiel exploité évalue la capacité d'un bâtiment à utiliser le potentiel énergétique de son environnement, ce qui le distingue des indicateurs énergétiques classiques tels que la consommation d'énergie. Il complète ces indicateurs en se concentrant sur l'utilisation effective du rayonnement solaire, qu'il soit actif ou passif, offrant ainsi une meilleure compréhension et amélioration de la performance énergétique. Cet indicateur dynamique permet d'analyser les variations de l'exploitation des ressources au fil du temps, mettant en évidence les déphasages entre ressources disponibles et leur exploitation. Les résultats peuvent être agrégés en moyennes horaires, journalières ou mensuelles pour faciliter l'analyse des tendances significatives.

Cependant, le potentiel exploité ne doit pas être considéré seul comme critère d'évaluation ou d'optimisation. Maximiser le potentiel exploité ne garantit pas nécessairement une minimisation des besoins et de la consommation. Il est essentiel de l'associer à d'autres indicateurs tels que les besoins ou la consommation énergétique globale pour avoir une vision complète de la performance énergétique du bâtiment. En analysant conjointement ces aspects, des solutions optimales, à la fois énergétiquement efficaces et favorisant l'exploitation du solaire, peuvent être identifiées. Le potentiel exploité peut également être utilisé pour dériver de nouveaux indicateurs liés à d'autres paramètres clés tels que les besoins ou la consommation énergétique. Par exemple, le taux d'exploitation et le taux de couverture sont deux indicateurs clés qui peuvent être calculés à partir du potentiel exploité. Ce dernier offre la

possibilité de définir d'autres grandeurs dérivées en fonction des besoins d'analyse. Sa richesse réside dans sa capacité à encapsuler la dynamique d'exploitation d'une ressource par un bâtiment, en faisant ainsi une base idéale pour le calcul d'indicateurs secondaires.

6. CONCLUSION

Cet article présente une méthodologie pour évaluer le potentiel solaire exploité d'un bâtiment, qui quantifie la partie du rayonnement solaire réellement utilisée pour répondre aux besoins énergétiques. Il présente le concept de potentiel solaire exploité et le met en application à travers une étude de cas détaillée, contribuant ainsi à l'évaluation des performances énergétiques des bâtiments combinant solutions passives et actives. Le potentiel exploité permet de quantifier précisément la part du rayonnement solaire utilisée pour répondre aux besoins du bâtiment, révélant le rôle complémentaire de l'isolation et de l'exploitation PV d'une façon passive à l'échelle de bâtiment ou bien au composant, ou d'une active par des systèmes solaires. Cependant, certaines limites doivent être notées. La méthode repose sur des simulations numériques avec des conditions non réalistes, telles que l'absence de soleil.

Le potentiel exploité ne constitue pas un indicateur complet en soi et doit être combiné avec d'autres indicateurs d'énergie. De plus, il ne peut pas être le seul critère d'optimisation et doit prendre en compte la réduction réelle de la consommation. Des indicateurs dérivés du potentiel exploité, tels que les taux d'exploitation et de couverture, sont très utiles pour affiner l'analyse. En intégrant des systèmes actifs, le potentiel exploité pourrait être étendu pour représenter à la fois la production thermique et photovoltaïque, offrant ainsi une vision globale de la contribution du solaire. Le couplage avec des mesures en temps réel ouvrirait des perspectives pour l'optimisation des pilotages énergétiques en fonction des fluctuations du potentiel solaire.

Remerciements : Ce travail a bénéficié d'une aide de l'État gérée par l'Agence Nationale de la Recherche au titre du programme d'Investissements d'Avenir (réf. ANR-18-EURE-0016 – Solar Academy)

7. BIBLIOGRAPHIE

- Chesné, Lou. 2012. "Vers Une Nouvelle Méthodologie de Conception Des Bâtiments, Basée Sur Leurs Performances Bioclimatiques," 1–217.
- Chesné, Lou, Thierry Duforestel, Jean Jacques Roux, and Gilles Rusaouën. 2012. "Energy Saving and Environmental Resources Potentials: Toward New Methods of Building Design." *Building and Environment* 58: 199–207.
- Kämpf, Jérôme Henri, Marylène Montavon, Josep Bunyesc, Raffaele Bolliger, and Darren Robinson. 2010. "Optimisation of Buildings' Solar Irradiation Availability." *Solar Energy* 84 (4): 596–603.
- Smith, Geoff, and Angus Gentle. 2017. "Radiative Cooling: Energy Savings from the Sky." *Nature Energy* 2 (9).
- Tittlein, Pierre. 2008. "Environnements de Simulation Adaptés à l' Étude Du Comportement Énergétique Des Bâtiments Basse Consommation . HAL Id : Tel-00350664."
- US Department of Energy. 2020. "Documentation Engineering Reference." *EnergyPlus™*
- Wittmann, H., P. Bajons, M. Doneus, and H. Friesinger. 1997. "Identification of Roof Areas Suited for Solar Energy Conversion Systems." *Renewable Energy* 11 (1): 25–36.
- Yang, Liu, Haiyan Yan, and Joseph C. Lam. 2014. "Thermal Comfort and Building Energy Consumption Implications - A Review." *Applied Energy* 115: 164–73.

Outil web paramétrique pour la rénovation de bâtiments résidentiels à destination des preneurs de décision

Antoine Dugué¹, Baptiste Durand Estebe¹, David Frédérique¹, Jérôme Lafréchoux¹, Pierre Bourreau¹

¹ NOBATEK/INEF4

67 rue de Mirambeau, 64600 Anglet,

*adugue@nobatek.inef4.fr

RESUME. La rénovation des bâtiments est notamment confrontée à la complexité de la prise de décision sur un projet en prenant en compte des critères variés, économiques ou environnementaux. L'approche proposée combine l'exploitation de données existantes avec un modèle de bâtiment résidentiel sous EnergyPlus. L'évaluation des coûts est basée sur une base de données ouvertes associée à des méthodes d'apprentissage. L'outil permet d'évaluer des milliers de scénarios en termes d'énergie, de confort et de coûts, avec un temps de calcul réduit grâce à des techniques de machine learning. L'ensemble est accessible via une interface web conviviale permettant aux non-experts de gérer le projet, de définir des objectifs, et d'explorer et de sélectionner les résultats de façon interactive.

MOTS-CLÉS : rénovation, aide à la décision, multicritère.

ABSTRACT. The renovation of buildings is confronted with a complex decision-making process. The approach proposed here combines the use of existing data with a residential building model in EnergyPlus. A user-friendly web interface enables non-experts to manage the project, define objectives and select possible energy improvements. Cost estimates are based on an open database combined with learning methods. Thousands of simulations are carried out for energy, comfort and costs, with reduced calculation time thanks to machine learning techniques. The interface enables interactive exploration of results and selection of relevant scenarios.

KEYWORDS : significant words, in english, will be separated as key words.

1. INTRODUCTION

Dans le contexte du réchauffement climatique, l'Europe comme la France fixent des objectifs ambitieux pour le secteur de la construction avec comme ambition la neutralité carbone à horizon 2050. La rénovation du parc existant reste le plus gros gisement d'économie d'énergie et d'émissions de carbone. En 2022, en France, 700.000 rénovations par an bénéficient d'aide, dont 10% sont jugées comme globales à comparer au parc de 37 millions de logements. Ce rythme peut être jugé comme insuffisant car correspondant à un taux de rénovation de moins de 1% quand un objectif de 3% est visé. La mise en place d'incitations économiques, de proposition d'accompagnement technique, d'entreprises dédiées à la rénovation énergétique peine pourtant à augmenter le taux, l'intensité et la qualité des rénovations. Parmi les freins, le trop long retour sur investissement, la difficile lisibilité des aides financières, la complexité des travaux à mener sont souvent mis en avant. Une autre barrière est la difficile prise de décision dans des contextes où les critères à considérer sont variés et les parties prenantes sont nombreuses. C'est le cas chez des bailleurs sociaux qui doivent concilier viabilité économique, objectifs environnementaux, caractère social de leur mission. Un autre cas est celui des

copropriétés : la prise de décision par vote nécessite un niveau de formation suivant, alors que la location de logements à l'étiquette DPE au-delà de F sera interdit à horizon 2030. Les méthodes les plus courantes pour évaluer et préparer les travaux de rénovation se basent sur l'audit mais laissent les décideurs dans une démarche relativement passive et ne favorisent pas l'ambition. Des méthodologies de présentation, et d'accompagnement existent. Ici nous proposons un support qui ambitionne de s'intégrer dans ce type de démarche, la particularité étant que l'outil même de simulation et d'exploitation de résultats est mis à disposition des parties prenantes avec un objectif de pédagogie.

Un ensemble de travaux porte sur la modélisation multicritère de rénovation de bâtiments, et souvent de logements, mais ils se centrent le plus souvent sur l'optimisation (MultiOpt par Pernodet Chantrelle *et al*), ou sur les méthodes avec parfois l'objectif de rendre le travail collaboratif (Serrano-Jiménez *et al*) la méthode et moins souvent sur l'outil lui-même comme un moyen d'impliquer les décideurs non experts.

2. PRESENTATION DE L'OUTIL

2.1. DEMARCHE GLOBALE

2.1.1. Du parc au bâtiment pour la construction de scénarios de rénovation simplifiés

L'approche proposée consiste à considérer un parc de bâtiment (étape 1 sur figure 1), et pour ces bâtiments de créer des projets de rénovation (2). A ce niveau se définissent les objectifs et contraintes de la rénovation (3), ainsi que les interventions désirées par les utilisateurs dans des listes prédéfinies dont le périmètre va au-delà de considérations énergétiques. Le bâtiment est décomposé comme une enveloppe (murs, fenêtres, toiture, plancher, portes et niveau d'infiltration) et des systèmes réglementaires (ventilation, chauffage, rafraîchissement, eau chaude sanitaire et éclairage). Sur cette base, la description de l'existant (type d'usage par appartements) est faite (5), et des améliorations sur les 10 éléments qui constituent un bâtiment sont à saisir (6). Chacun de ces composants peut être défini à partir d'une base de données ou nouvellement crée.

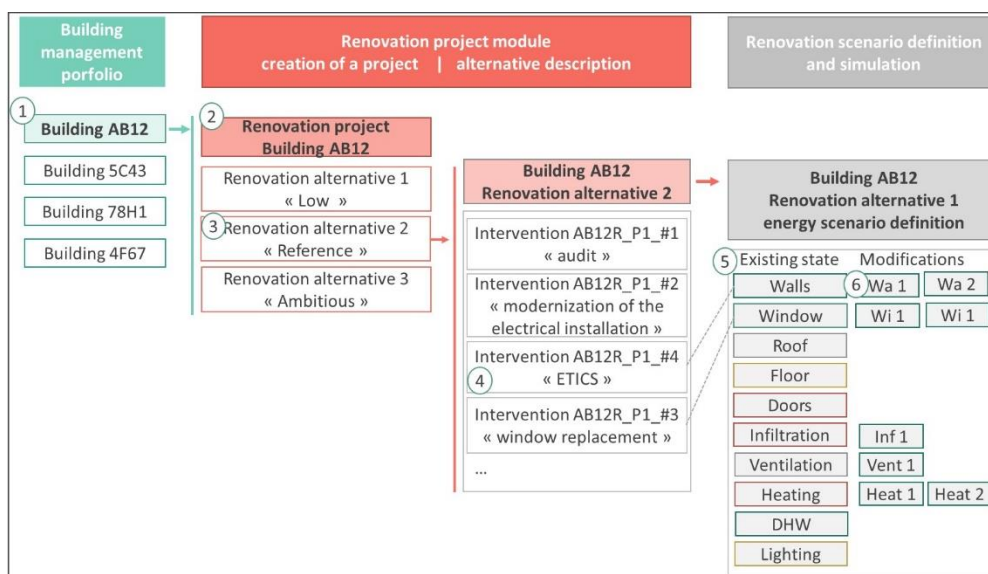


Figure 1: Illustration des modules de Renovation Manager et progression dans le workflow

La description des composants est simple et s'accompagne d'explications et tutoriels. Ces composants sont associés à des classes IFC dans un souci d'interopérabilité. En ce sens, l'outil dispose aujourd'hui d'une interface avec la librairie POBIM développée par le CSTB, permettant d'automatiquement intégrer les produits référencés dans cette dernière.

A partir de l'ensemble des améliorations potentielles à évaluer (6), l'outil va générer l'ensemble des combinaisons possibles d'actions de rénovation, résultant en un nombre important de scénarios qui sont tous évalués selon les critères de coût global de mise en œuvre (budget brut), d'indicateur de confort d'été, de consommation énergétique selon les postes réglementaires français, et d'émissions carbone selon l'indicateur de réchauffement climatique.

2.1.2. Modélisation

Pour la modélisation, nous utilisons comme base géométrique le format IDF associé au moteur de simulation EnergyPlus qui présente l'intérêt d'être ouvert, et facilement déployable sur un serveur. Ce choix permet notamment une modélisation fine des transferts radiatifs et de l'utilisation de la ventilation naturelle et des possibles protections solaires, clef pour évaluer le confort d'été, ici jugé comme primordial. Le modèle énergétique utilisé est analysé afin d'extraire les éléments de géométrie qui servent à calculer les métrés ; l'outil sert à paramétrer ce fichier IDF, chaque scénario de rénovation donnant lieu à un nouveau jeu de paramétrage.

Il est aussi possible d'exploiter une maquette BIM IFC. L'IFC est alors transformé en gbXML par l'outil BIM2BEM développé par EnerBIM. Ses fonctionnalités comprennent l'analyse du modèle BIM pour affecter les composants BIM à la modélisation thermique, l'analyse des volumes pour éviter les erreurs de « non fermeture » dans les volumes thermiques, l'analyse des murs pour affecter les bons composants au fichier gbXML exporté. Ensuite, grâce à l'algorithme de lancer des rayons, la détection et la correction des erreurs géométriques potentielles permet de corriger des erreurs de modélisation et enfin une analyse des ponts thermiques est faite pour les quantifier et caractériser.

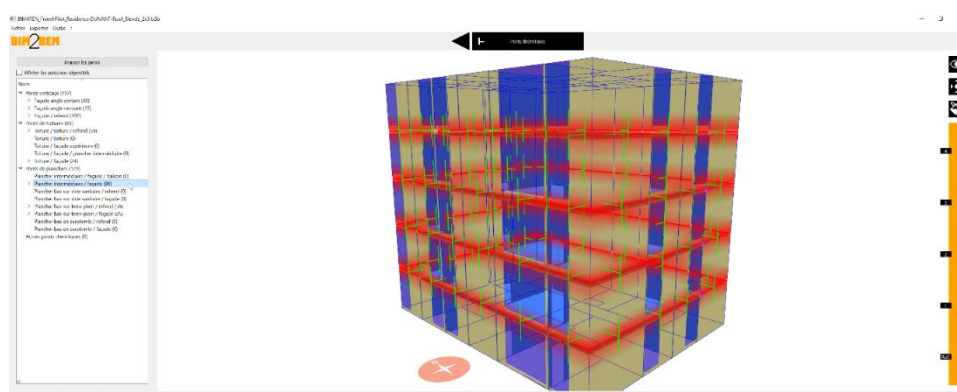


Figure 2: Vue d'un bâtiment analysé par l'outil BIM2BEM – étape d'analyse des ponts thermiques

2.1.3. Analyse de coût de rénovation

Un service web a été développé afin de permettre l'estimer du budget total nécessaire aux travaux de rénovation. Ce service web repose sur un modèle d'apprentissage automatique entraînée sur les données ouvertes de l'ADEME sur des coûts de rénovation énergétique entre 2017 et 2018¹. Afin de générer ce modèle, les jeux de données ont été analysés, nettoyés (certaines valeurs étant aberrantes, certaines

¹ Voir, par exemple, <https://data.ademe.fr/datasets/isolation> pour le jeu de données sur l'isolation

valeurs numériques n'étant pas homogène en termes d'unités utilisées...) puis numérisées (i.e. les données textuelles, en particulier les sous-catégories de produits ont besoin d'être transformées en valeurs numériques pour l'exécution d'un algorithme d'apprentissage automatique), et enfin normalisées (i.e. l'ensemble des données sont rééchantillonnées sur une échelle entre 0 et 1 afin de leur donner le même poids pour l'algorithme décisionnel). Une fois les données préparées, différents algorithmes d'apprentissage automatique ont été testés afin de déterminer le budget associé à l'installation d'un système donné, en fonction des attributs le caractérisant, et caractérisant le bâti : un réseau de neurones dense, un arbre de régression, une régression linéaire, une forêt aléatoire. Dans la majorité des cas, le modèle de forêt aléatoire donne les meilleurs résultats.

Ces résultats sont restent difficilement exploitables. D'une part, le jeu de données initial est de qualité insuffisante. Par ailleurs, les jeux de données, une fois nettoyés, sont parfois insuffisants en termes d'individus présents (par exemple, 2846 individus pour le chauffage, 1192 pour l'isolation) et les modèles résultants ont donc une incertitude importante. Les caractéristiques associées à chaque produit et rénovation peuvent également être trop peu explicatifs du coût d'installation. Enfin, ce jeu de données a été réalisé sur des maisons individuelles principalement ; l'utilisation de cette base de coût dans un contexte bailleur n'est donc pas forcément très pertinent, des économies d'échelle pouvant être réalisés par ces derniers ; de même, les coûts ayant été collectés jusqu'en 2018, l'inflation des coûts des matières et de la main d'œuvre, en particulier suite aux crises du COVID et de la guerre en Ukraine rendent ces données à ce jour peu utilisables. Cette approche peut néanmoins être utile afin de disposer de premiers éléments de comparaison entre différents scénarios. Des recherches supplémentaires sont envisagées pour reposer la méthode sur de jeux de données plus riches, en améliorer la précision, ainsi que pour inclure les coûts de maintenance afin de calculer un coût plus précis en termes de retour sur investissement.

2.1.4. Analyse bilan carbone

Dans la bibliothèque de composants, un ensemble d'éléments ont été associés à des FDES de la base INIES et l'indicateur de réchauffement climatique est récupéré. Pour les nouveaux composants, l'utilisateur doit renseigner la valeur de l'indicateur et la durée du cycle de vie associé. Les métrés calculés à partir du modèle sont ensuite utilisés pour calculer le bilan complet. Les consommations énergétiques sont aussi rapportées en carbone en utilisant les indices d'émissions associées de la RE2020.

2.1.5. Simulation

Pour une étude donnée, le choix initial de simuler la totalité des scénarios, correspondant aux combinaisons d'améliorations de composants, mène rapidement à des milliers de simulations possibles. Bien que l'usage d'un modèle EnergyPlus mono-zone permette de limiter le temps de calcul, il reste de l'ordre de la minute, et donc trop long pour en évaluer des milliers..

Une approche de Machine Learning (ML) a été développée afin de réduire le nombre de simulations nécessaires, via la création de modèles dit *surrogate*. Un sous échantillon de 20% du nombre total de simulations est calculé. Il est séparé en batch d'entraînement et de validation avec une répartition de 80%/ 20%. Plusieurs algorithmes d'apprentissage automatique (ML) sont entraînés (réseau de neurones, régression linéaire d'ordre n, forêt aléatoire...). Leur performance est évaluée selon l'indicateur MSE (Mean Square Error) au regard de l'échantillon de validation. Le modèle le plus prometteur est

sélectionné et ses hyperparamètres sont optimisés par une méthode de type gridsearch visant à minimiser le même indicateur d'erreur.

Ce développement exploite les objets du module *model_selection* de la librairie ouverte CorrAI². L'ensemble des modèles sont issus de la librairie Scikit learn. Sur le cas d'étude, l'erreur RMSE (Root Mean Square Error) entre la prédiction du modèle ML et l'échantillon de validation est de l'ordre de 0.5 kWh/m², soit moins de 1% de la consommation minimum de l'échantillon.

Dans le cadre d'un outil d'aide à la décision et sachant les hypothèses de simulation (modèle de bâtiment simplifié), cette erreur est considérée comme acceptable, et l'utilisation de ce métamodèle a permis de diviser le temps de calcul total par ~5.

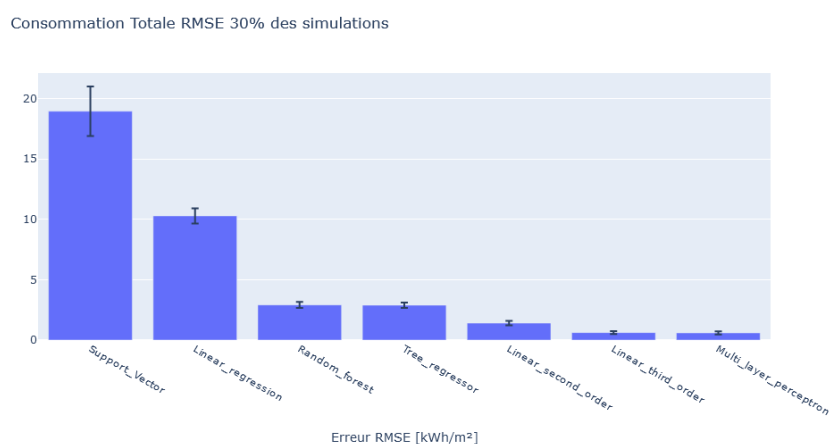


Figure 3: Performance des modèles testés avec comme plus performants le réseau de neurones devant une régression linéaire d'ordre 3.

2.1.6. Intégration web et sorties dynamiques

Une attention particulière a été accordée à l'interface de saisie et en particulier l'exploitation des résultats. Une interface web dédiée, pensée pour être utilisable par des non sachants, est proposée pour la gestion de projet. Si la saisie initiale appelle un niveau de connaissance de la thermique des bâtiments, l'analyse de données est pensée pour être accessible. La génération de graphe interactif permet à l'utilisateur de naviguer dans l'ensemble des résultats et sélectionner des scénarios dits candidats qui sont ensuite détaillés. Un travail complémentaire sur des méthodes de sélection et de votes par tours est en cours d'analyse et doit viser à favoriser discussions et prise de décision collective progressive.

3. CAS D'ETUDE

3.1. BATIMENT CHOISI ET ANALYSE

Pour le principe de l'étude nous avons choisi un bâtiment pour lequel nous avons l'information. C'est un bâtiment résidentiel collectif de la banlieue parisienne gérée par un bailleur social. De 4 étages, il a 14 appartements, et le diagnostic initial est E pour 202 kWh/m²/an d'énergie finale. Un modèle du bâtiment a été réalisé à partir de l'élévation de plans 2D à l'aide de Plans2BIM comme visible sur la figure 4.

² <https://github.com/BuildingEnergySimulationTools/corrai/tree/ma>

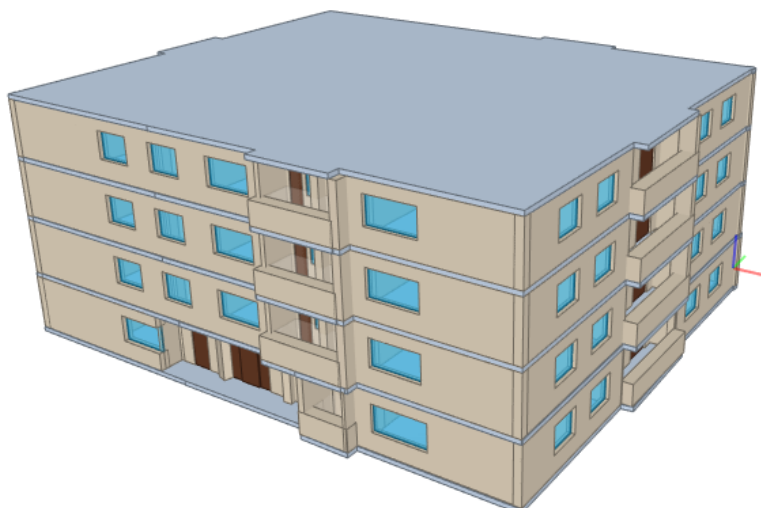


Figure 4: Vue du modèle BIM du bâtiment à partir d'un viewer BIM

Les scénarios choisis ont été établis avec la maîtrise d'ouvrage sur la base d'un échange ayant impliqué un représentant des locataires, la personne en charge de la maintenance du bâtiment et les preneurs de décision. Les améliorations choisies portent sur l'isolation des murs, de la toiture, le changement des menuiseries (ce qui intègre une protection solaire), du système de chauffage et de sa régulation. Les combinaisons à simuler sont de 8640 simulations. La distribution de la performance selon un indice d'inconfort estival et de consommation d'énergie totale apparaît sur la figure 5 avec en couleurs l'impact du choix de changement de système de chauffage.

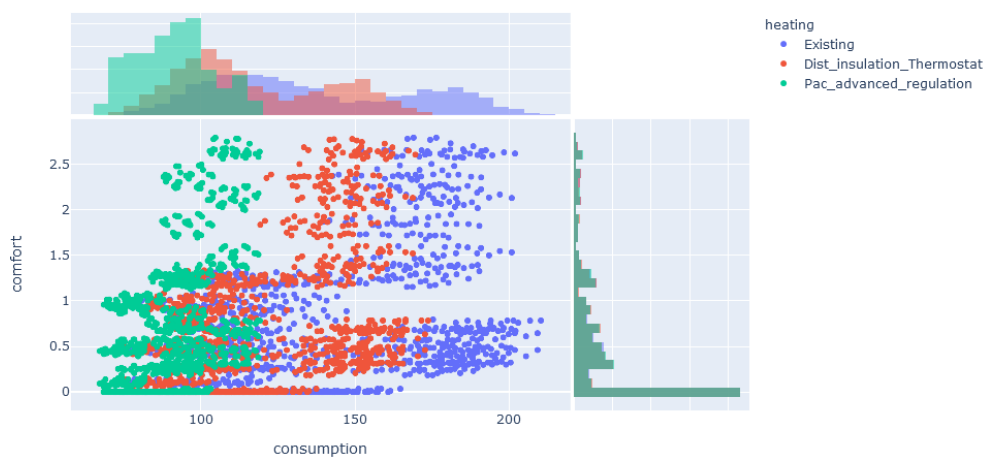


Figure 5: Représentation des résultats de 8640 simulations selon 2 critères (inconfort et consommation d'énergie) et en couleur l'impact du changement de système de chauffage

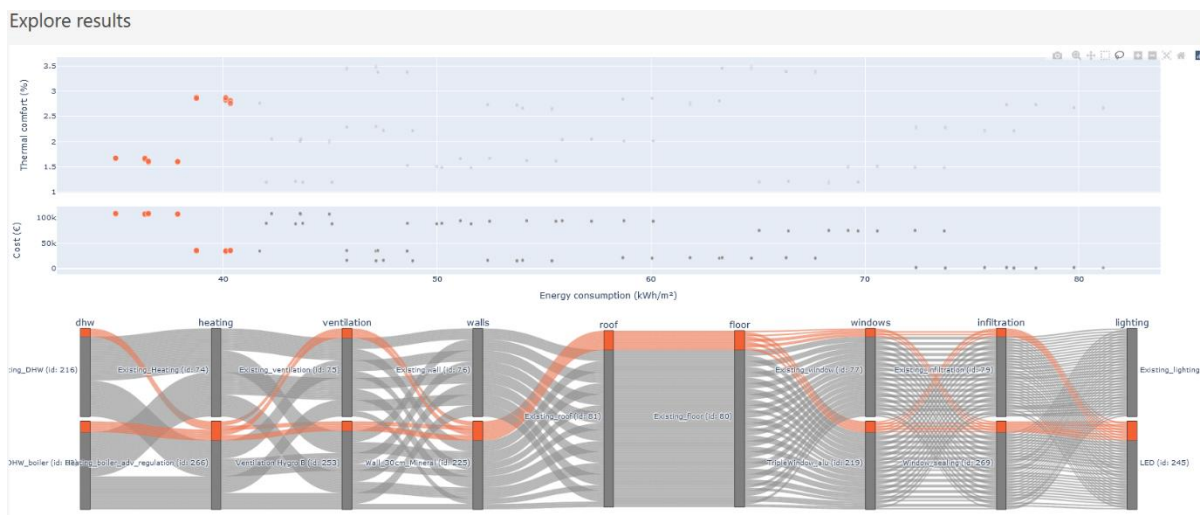


Figure 6: Vue des résultats selon 3 critères avec possibilité de sélectionner (sélection main levée orange) et visualiser

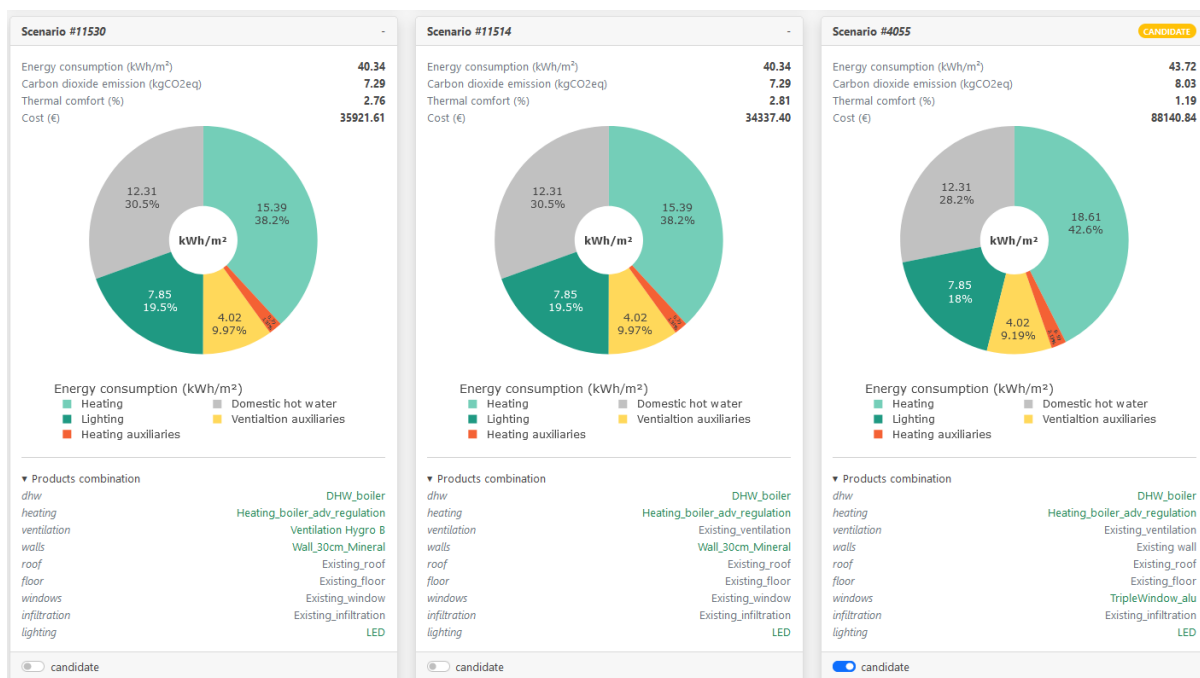


Figure 7: Vue récapitulative de 3 scénarios avec la possibilité de sélectionner un scénario candidat

4. CONCLUSIONS

Alors que la littérature présente souvent des méthodes, des développements numériques permettant de réaliser de l'optimisation avancée, ici le développement part du constat que pour rendre la rénovation énergétique accessible il ne faut plus fournir des rapports d'audits imprimés mais il est aussi nécessaire de fournir des outils. Dans l'approche présentée, l'outil développé est simple, web, embarque différents moteurs d'évaluation (énergie, coût, carbone), l'architecture est modulaire et peut s'étendre à d'autres évaluations et indicateurs à l'avenir (carbon/RE2020 - indicateur IC, construction - réemployabilité...).

5. BIBLIOGRAPHIE

- Brangeon, Boris, Emmanuel Bozonnet, Christian Inard, "Integrated Refurbishment of Collective Housing and Optimization Process with Real Products Databases." *In Building Simulation & Optimization* 2016, pp. 531-538. 2016.
- Elagiry, M, et al. 2020 "IFC to Building Energy Performance Simulation: a systematic review of the main adopted tools and approaches".. Proceedings of Conference of IBPSA, Germany
- Pernodet Chantrelle Fanny, Lahmidi Hicham, Keilholz Werner, El Mankibi Mohamed et Michel Pierre. 2011. « Development of a multicriteria tool for optimizing the renovation of buildings” *Applied Energy*, 88:4. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.10.002>
- Pedregosa, F., Varoquaux, Ga"el, Gramfort, A., Michel, V., Thirion, B., Grisel, O. (2011). Scikit-learn: Machine learning in Python. *Journal of Machine Learning Research*, 12(Oct), 2825–2830.
- Serrano-Jiménez Antonio, Femenías Paula, Thuvander Liane, Barrios-Padura Ángela, 2021. “A multi-criteria decision support method towards selecting feasible and sustainable housing renovation strategies” *Journal of Cleaner Production*, 278:2021, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123588>.

Experimental comparison between earthen-based and conventional building systems: study of hygrothermal behavior and thermal inertia

Unai DURAÑONA¹, Chi-Kien NGUYEN¹, Hans HERBET¹

¹ Saint-Gobain Research Paris

39 Quai Lucien Lefranc,

93400 Aubervilliers

*unai.duranona@saint-gobain.com, chi-kien.nguyen@saint-gobain.com,

hans.herbet@saint-gobain.com

RESUME. Un procédé de remplissage de construction/façade à ossature bois (COB/FOB) par projection humide d'un mélange à base de terre stabilisée a été développé. Le mélange est composé majoritairement de terre, de fibres végétales (biosourcées) et d'un liant bas carbone. Des essais à l'échelle de la paroi ont été menés en enceinte bi-climatique sur deux maquettes d'une surface de 1 m² : une COB standard avec isolation par l'extérieur et une COB avec l'isolant entre montant remplacé partiellement par le mélange de terre stabilisée projetée. Cette étude expérimentale permet d'évaluer le comportement hygrothermique du système complet mais aussi de vérifier les performances inertielles du système à base de mélange de terre. Cette étude à l'échelle de la paroi montre que le mélange de terre contribue à obtenir des métriques inertielles plus importantes que la COB/FOB à ossature bois, malgré un coefficient de transmission thermique U plus important.

MOTS-CLÉS : Terre stabilisée projetée, enceinte bi-climatique, inertie thermique

ABSTRACT. A novel filling process for timber-frame wall (TFW) by wet projection of an earthen-based mix was developed. The mix is mostly composed of earth, (bio sourced) vegetal fibers and a low CO₂ binder. Tests were performed in a bi-climatic chamber on 1m² prototypes, composed of a conventional TFW with External Thermal Insulation and a TFW with the insulant between the studs partially replaced by the stabilized earth mix. This experimental study aims at evaluating the hygrothermal behavior of the entire system but also at verifying the inertial performances of the earthen-based system. This experimental study shows that the earthen-based mix contributes to increasing inertial metrics compared to a standard TFW despite the higher U-value.

KEYWORDS: Projected stabilized earth, bi-climatic chamber, thermal inertia

1. INTRODUCTION

The French regulation RE2020 (Ministry of Ecological Transition 2024) establishes targets for reducing the carbon footprint associated with the construction and use of new buildings. It also mandates overall building performance in terms of summer comfort. This encourages the use of bio/geo sourced materials in construction, known for their low carbon footprint during construction and to which a beneficial contribution to summer comfort is attributed. In this framework, the earthen-based construction, considered as a sustainable solution (Vinceslas 2019; IFPEB 2021), proposes an alternative to traditional construction materials. However, due to the wide variety of the materials and building systems, the properties of these materials are still not fully understood (Charai, Mezrhab, and Moga 2022; Colinart and Glouannec 2021; El Assaad, Colinart, and Lecompte 2022; Giuffrida, Caponetto, and Nocera 2019). In addition, the link between their properties and the thermal comfort has

not been clearly demonstrated (Almusaed et al. 2023; Montrose and Soubdhan 2021; Zoure and Genovese 2023). Hence, there is a crucial need to systematically characterize the properties of these materials across various scales of the building system, ranging from raw material to individual dwellings (such as single houses or residential complexes), encompassing products and walls. This approach is essential for understanding the impact of such materials at each scale and, consequently, for designing buildings that are both efficient and comfortable.

In the framework of the “Building with Earth” program, POINT.P aims at studying the behavior of such materials. In this project, different building systems has been developed where earth is used as a building material. The material studied in this paper is a stabilized earthen-based mix (called mix in the following), mostly composed of earth integrating hemp fibers and a low CO₂ binder (CO₂ footprint 3 times lower than usual cement). This mix is assembled in the *Terlian Confort 4S+* wall system, certified by CSTB in 2023 (CSTB 2023). The mix is wet-projected in a standard Timber-Frame Wall (TFW) with possibly External Thermal Insulation Composite System (ETICS), where the Glass Wool insulation (GW, 14.5 cm thick) is replaced by a Stone Wool panel (SW, 8 cm thick) to project the mix on (7 cm thick). The insulant between the wooden studs is therefore partially replaced by the mix. A schematic of the building system can be seen in Figure 1, with a comparison to a standard TFW with ETICS. Additional parameters of the mix and the systems are also detailed in Table 1 and Table 2.

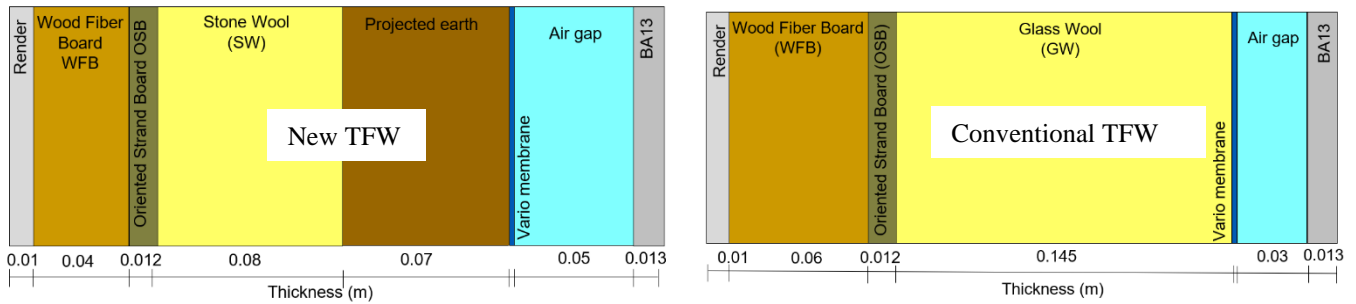


Figure 1 : composition of the two building systems: the earthen-based system from POINT.P and the standard TFW. The external side is on the left, while the internal side is on the right.

Dry bulk density [kg/m ³]	Dry thermal conductivity @10°C [W/m/K]	Water vapor permeability factor [-]
1300	0.25	11

Table 1: summary of the main measured hygrothermal parameters of the mix.

	<i>Terlian Confort 4S+</i> wall	Conventional TFW system
Total thickness [cm]	27.5	27
Theoretical U-value [W/m ² /K]	0.256	0.179

Table 2 : Summary of the main parameters of the building systems. The U-value were computed in accordance with ISO 6946 (ISO-6946 2017).

Even though studying the whole scales of the building system is necessary, this paper particularly focuses on the wall scale. To do so, an INELTEC INECC 2X-30/500 bi-climatic chamber (functioning range: [-30; +70] °C and [15; 95] %RH) was used at Saint-Gobain Research Paris, where 1x1m² prototype walls were consecutively tested. Indeed, the objective of this study is to compare the

conventional TFW system with the *Terlian Confort 4S+* wall, both being used with ETICS. A picture of the set-up of the *Terlian Confort 4S+* wall and standard TFW prototype walls can be seen in Figure 2.

This study has two main objectives. The first one is the thermal inertia of the building systems: the goal is to assess the added value of the earth on the whole inertia of the wall. The second one is the hygrothermal behavior of the system, to quantify the impact of adding bio/geo sourced materials into the wall in terms of moisture management. This article details the methodology and the results to quantify the added value of bio/geo sourced materials in the wall both for thermal inertia and moisture management.



Figure 2 : picture of the two prototypes mounting and insertion in the bi-climatic chamber frame.

2. METHODOLOGY OF THE STUDY IN THE BI-CLIMATIC CHAMBER

2.1. EXPERIMENTAL SET-UP

The goal of this test is, thanks to a bi-climatic chamber, to simulate a wall exposed to hygrothermal variations from the external side and verify the impact it has on the internal side, which evolves freely (no air renewing nor thermal regulation). However, the free evolution is not totally independent of the external conditions, particularly from the temperature point on view. Therefore, it generates locally irrelevant data and higher uncertainties. The protocol for data processing is detailed in section 2.3.

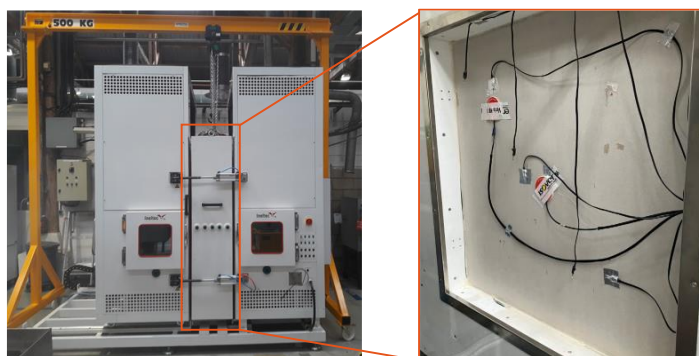


Figure 3 : pictures of the bi-climatic chamber, with instrumentation on the plasterboard on the internal side.

Each interface of the building system is instrumented with 3 Temperature and Relative Humidity (T/RH) sensors (SHT35/85 2023), including the boundary surfaces. In addition, heat fluxmeters (HFP01 2023) and type-K thermocouples are installed on the internal surface, directly on the plasterboard. The uncertainty of the sensors is $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ and $\pm 1.5\%$ on this T/RH range, while the fluxmeters and the thermocouples have a precision respectively of $\pm 3\%$ and $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$.

2.2. EXPERIMENTAL PROTOCOL

The daily scenario selected for the test campaign (14 days) is detailed in Figure 4:

- The temperature increases linearly from 25°C to 35°C during 11h until a 1h-temperature plateau. Then, the temperature decreases back to 25°C during the next 11h until a 1h-temperature plateau.
- On the same time range and with opposite patterns, the humidity oscillates between 90%RH and 60%RH.

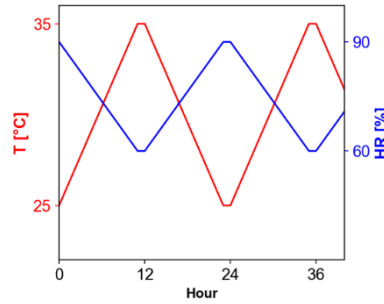


Figure 4 : daily evolution of T/RH conditions imposed in the external chamber.

This scenario, not representative of a French climate, is chosen on purpose due to its important RH (typically tropical climate). It allows studying the impact of the earth on the moisture management even for very humid climates, which is a worst-case scenario.

2.3. QUANTITATIVE INDICATORS OF INTEREST FOR THERMAL INERTIA

If a surface of a wall is exposed to a sinusoidal heat wave, the thermal answer is delayed on the opposite surface of the wall with a different thermal amplitude. Based on this observation, three indicators can be studied. These are illustrated in Figure 5:

- The thermal phase lag (ϕ in hours) corresponds to the time difference between the heat wave on the external side and the thermal response on the internal side.
- The thermal damping (in °C) corresponds to the mean peak-to-peak difference between external and internal thermal waves and can be computed thanks to Eq. (1).

$$\frac{|T_{e,max} - T_{i,max}| + |T_{e,min} - T_{i,min}|}{2} \quad \text{Eq. (1)}$$

- The thermal attenuation (no unit) corresponds to the ratio of the external and internal heat amplitude and can be computed thanks to Eq. (2).

$$A_e/A_i \quad \text{Eq. (2)}$$

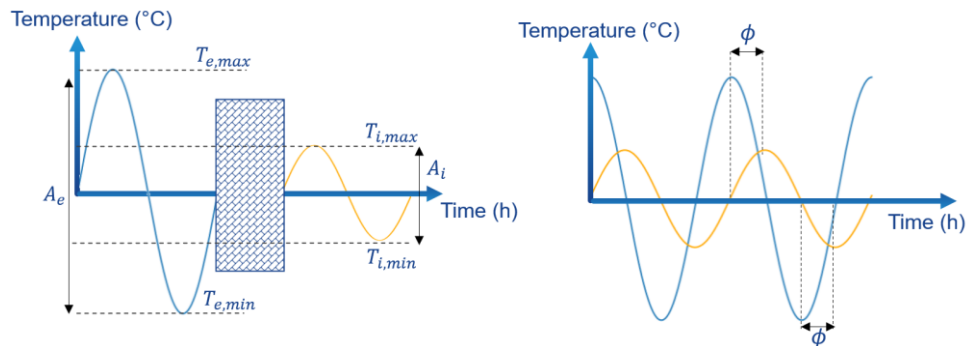


Figure 5 : thermal damping, attenuation, and phase lag, obtained from experimental campaigns.

To not be impacted by the establishment of the thermal regime, the first 4 days of the test have been systematically neglected. In addition, it locally appeared that the internal side was not totally independent of the thermal variations of the hall where the chamber is placed in. An example of such effect is detailed in Figure 6, divided in three main parts:

- The time range number 1 corresponds to the establishment of the thermal regime. This time range is neglected for the computation.
- The time range number 2 corresponds to the considered period for the computation of the thermal inertia indicators. In general, the temperature of the internal side is higher than the temperature of the hall, even if exceedances ($\pm 1^\circ\text{C}$) can happen. However, in these situations, the temperature of the internal side is not affected, and the mean temperature remains constant.
- The time range number 3 corresponds to a not-valid period for the computation of the indicators. The temperature of the hall is significantly higher ($3\text{-}5^\circ\text{C}$) than the temperature of the internal side, and the mean temperature increases during the same period.

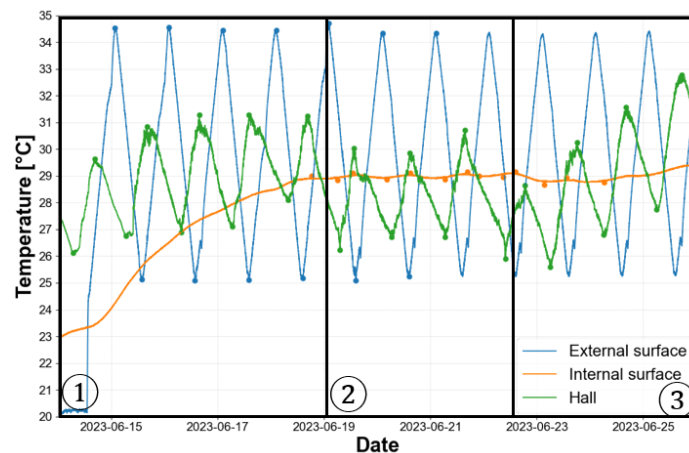


Figure 6 : temperature evolution as a function of the time for the external surface (in blue), the internal surface (in orange) and the hall where the chamber is placed (in green).

This data processing is necessary for each test. Therefore, the duration of the valid period for the computation is not the same for each test, which can affect the uncertainties of the results.

2.4. QUALITATIVE INDICATORS OF INTEREST FOR MOISTURE MANAGEMENT

For moisture management aspect, a qualitative analysis is performed, based on the evolution of RH at different and comparable positions: after the OSB (at the interface with one of the insulating materials) which is known to be hydrophobic; before the Vario Xtra vapor-membrane (ISOVER 2023) which is a “smart vapor membrane” becoming more permeable at higher RH for which the Sd-value varies between 0.4 m and 25 m; finally after the entire system, on the internal side. The studied positions are reminded with number (1), (2) and (3) in Figure 8.

3. EXPERIMENTAL RESULTS AND DISCUSSION

This section, dedicated to the experimental results, is divided in two main parts: the first part concerns the thermal inertia results, while the second part is dedicated to the moisture management results.

3.1. THERMAL INERTIA

The results obtained for both prototypes are detailed in Figure 7. As it can be seen, even with a lower U-value, the *Terlian Confort 4S+* wall obtains higher inertia indicators. More precisely, the thermal phase lag is 11.7 ± 2.4 h (respectively 5.5 ± 1.0 h, -6.2 h), the attenuation is 38.8 ± 6.2 (resp. 29.3 ± 6.7 , -9.5) and the damping is 4.6 ± 1.4 °C (resp. 4.3 ± 1.0 , -0.3 °C). The uncertainty on the standard TFW prototype is lower as the studied period is longer (184h consecutive for the standard TFW while 52h for the *Terlian Confort 4S+* wall).

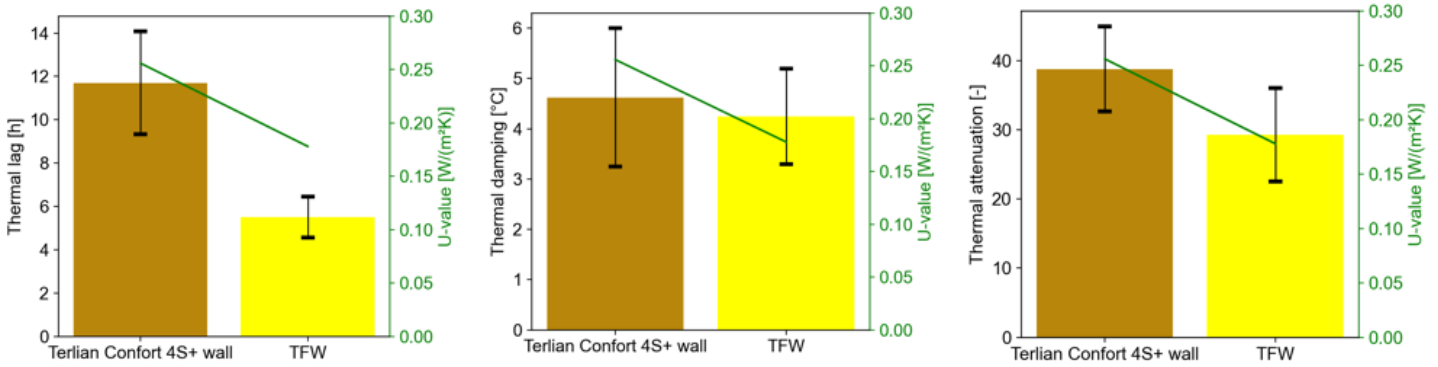


Figure 7 : experimental results obtained for both prototypes.

As the systems are similar, the large difference in terms of inertia tends to be related to the presence of the earthen-based mix. The inertia can be added by two means, the presence of the important added mass by the mix, and the fact that the earth absorbs/desorbs water, which adds a latent inertia due to storage and evaporation. However, the contribution of both phenomena cannot be discriminated.

3.2. MOISTURE MANAGEMENT

The results for the evolution of RH after the OSB are detailed in Figure 8. The OSB is known to be a hydrophobic material, but the results show that there is no local risk of condensation as the RH remains systematically below 90%. In addition, the imposed RH cycles can clearly be identified. However, in terms of dynamic, it is interesting to notice a quite different behavior.

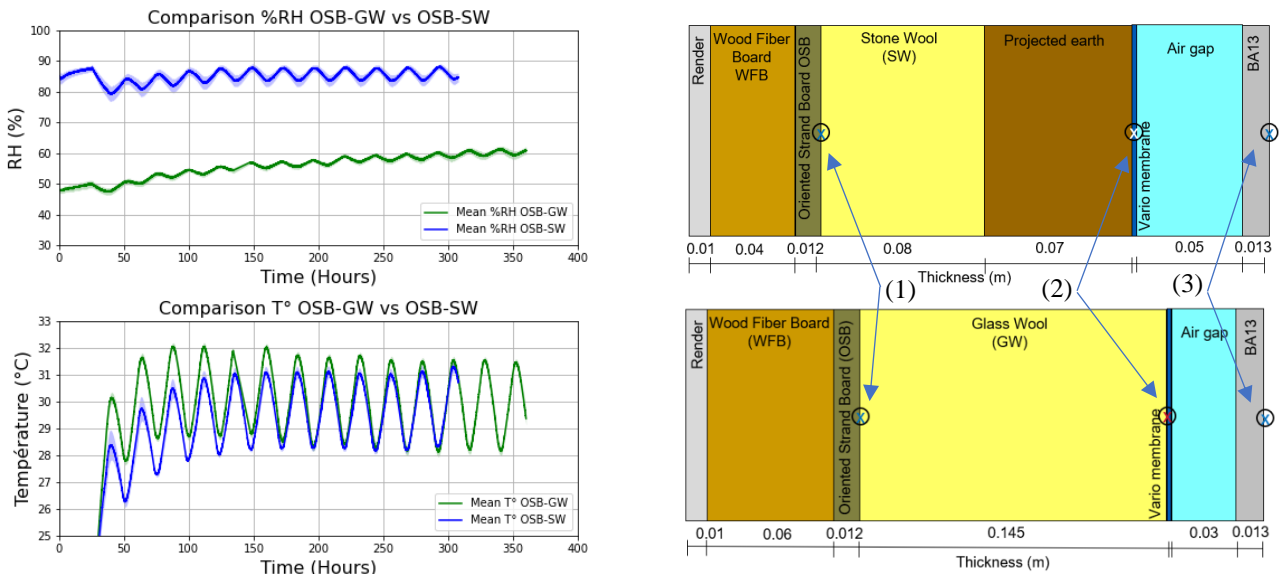


Figure 8 : T and RH time evolution of both prototypes, studied after the OSB, indicated by (1) on the scheme.

For *Terlian Confort 4S+* wall, the RH is initially between 80 and 90%RH, but the mean value does not vary. This high value is due to the high RH value of the earth, which is still around 90% during the test (one month after projection). At the opposite, the RH starts at 50%RH for the TFW system but continuously increases until 60% and is still increasing even at the end of the test.

It is also interesting to notice that the maximum temperature peaks for the *Terlian Confort 4S+* wall are between 0.5°C and 2°C lower than the peaks of the standard TFW, even if the WFB panel is 2 cm thicker. The local high RH seems not degrading the thermal properties of the system but at the opposite seems adding latent inertia to the system. This phenomenon is also noticed at position (2) (interface before the Vario Xtra membrane) and (3) (after the system), for which the results can be in Figure 9.

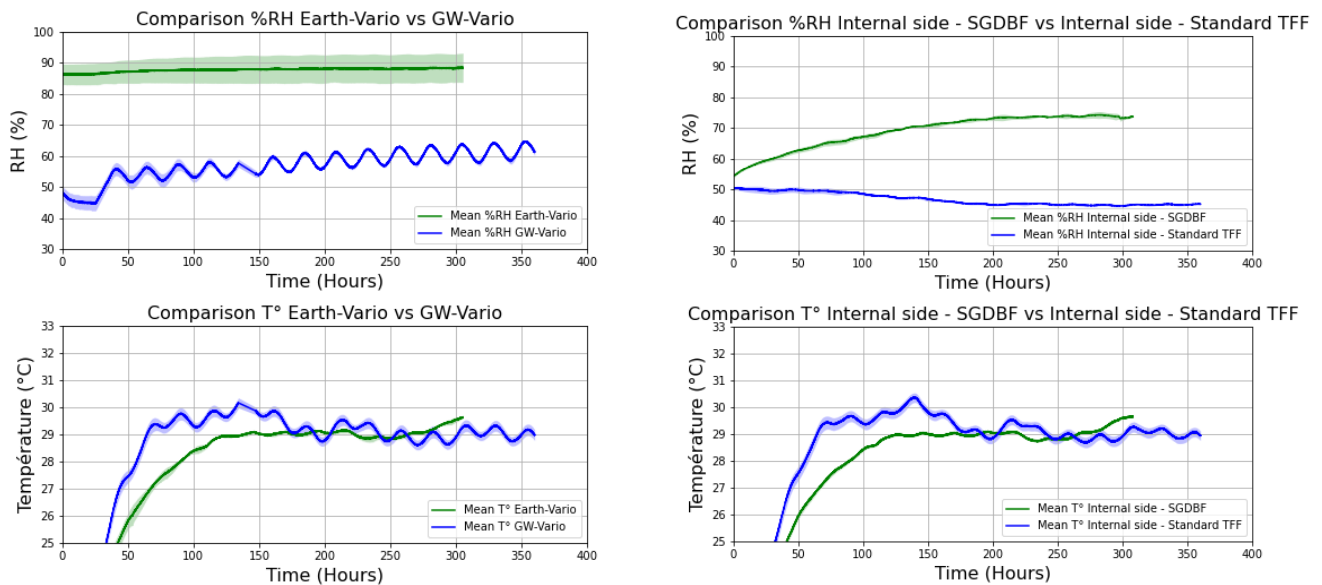


Figure 9 : T and RH time evolution of both prototypes, studied before the Vario Xtra membrane and after the entire system, indicated by (2) and (3) on the scheme in Figure 8.

At position (2), two opposite behaviors can be observed. For *Terlian Confort 4S+* wall, the RH is still important (around 90%RH) but vary less whereas for the standard TFW the RH increases from 50 to 60%RH locally. It indicates that the moisture can go through the membrane at these high RH values for *Terlian Confort 4S+* wall, while there is a moisture accumulation for the standard TFW system.

This assumption seems confirmed by the results at position (3). For *Terlian Confort 4S+* wall, the RH is increasing while it decreases for the standard TFW system. Even if the assumption of the air leak cannot be fully evacuated (no air renewal is done), a drying is observed on the external side, while there is a moisture accumulation before the membrane. In addition, the temperature evolution is very similar as only separated by the BA13 plasterboard and the air gap, showing that it is not a temperature effect.

More globally, it can be concluded that even with high RH, *Terlian Confort 4S+* is fully permeable to water vapor diffusion and no risk of condensation was observed.

4. CONCLUSION

In this article, an experimental study of two walls, representing two building systems, has been done. To do so, an important experimental protocol has been developed coupled with instrumentation efforts. It allowed to show that the earthen-based TFW allowed to largely increase the inertia performances of

the system despite a higher U-value, while showing no risk of condensation (even though this assertion needs to be verified for winter). Even more, the system appeared permeable to water vapor diffusion. However, it is not enough to conclude yet on the hygrothermal behavior of such system in the case of the dwelling where windows, doors and air infiltrations are present. The same conclusion can be done for the comfort of the end-user. Therefore, to go further in this work, the simulation tool WUFI+ will be used to model dwellings with similar features than the one presented in this article. The goal will be to link the hygrothermal behavior of such houses, based on the behavior of the herein detailed wall, with the comfort of the occupant to design efficient buildings.

5. BIBLIOGRAPHY

- Almusaed, Amjad, Asaad Almsad, Asaad Alasadi, Ibrahim Yitmen, and Sammera Al-Samaraee. 2023. "Assessing the Role and Efficiency of Thermal Insulation by the "BIO-GREEN PANEL" in Enhancing Sustainability in a Built Environment." *Sustainability* 15 (13): 10418. <https://doi.org/10.3390/su151310418>.
- Charai, Mouatassim, Ahmed Mezrhab, and Ligia Moga. 2022. "A structural wall incorporating biosourced earth for summer thermal comfort improvement: Hygrothermal characterization and building simulation using calibrated PMV-PPD model." *Building and Environment* 212: 108842. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.108842>.
- Colinart, Thibaut, and Patrick Glouannec. 2021. "Water vapor permeability of building materials : improved analysis of dry cup experiment." *1st International Conference on Moisture in Buildings (ICMB21), UCL London 28-29 June 2021*. <https://doi.org/10.14293/ICMB210017>.
- CSTB. 2023. "AtEX SGDBF: Remplissage par projection par voie humide dans une ossature bois conforme au DTU 31.2 avec un mélange de terre, liant minéral, eau et fibre végétale sur une épaisseur de 7 à 9cm." <https://evaluation.cstb.fr/fr/appreciation-technique-expertise-atex/detail/3221-v1/>.
- El Assaad, Machhour, Thibaut Colinart, and Thibaut Lecompte. 2022. *Influence des transferts de masse sur la mesure de la conductivité thermique des isolants biosourcés hygrosopiques*.
- Giuffrida, Giada, Rosa Caponetto, and Francesco Nocera. 2019. "Hygrothermal Properties of Raw Earth Materials: A Literature Review." *Sustainability*. <https://doi.org/10.3390/su11195342>.
- HFP01. 2023. "Heat flux sensors." <https://www.hukseflux.com/products/heat-flux-sensors/heat-flux-sensors/hfp01-heat-flux-sensor>.
- IFPEB, Hub des Prescripteurs Bas Carbone. 2021. "Brief de filière - Matériaux biosourcés."
- ISO-6946. 2017. "Composants et parois de bâtiments, Résistance thermique et coefficient de transmission thermique, Méthodes de calcul."
- ISOVER. 2023. "Datasheet: Vario Xtra hygro-regulating vapor membrane." <https://www.isover.fr/produits/etancheite-lair/membrane-varior-xtra>.
- Ministry of Ecological Transition. 2024. "Réglementation Environnementale des Bâtiments Neufs (RE2020). Prepared by N. Cabassud." <https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/>.
- Montrose, Guarry, and Ted Soubdhan. 2021. "Study of the Thermal Performance of Bio-Sourced Materials Used as Thermal Insulation in Buildings under Humid Tropical Climate." *International Journal of Civil and Environmental Engineering* 15 (7).
- SHT35/85, Sensirion. 2023. "AG SHT35/85 sensors." <https://sensirion.com/products/catalog/SHT35-DIS-F/>.
- Vinceslas, T. 2019. "Caractérisation d'éco-matériaux terre-chanvre en prenant en compte la variabilité des ressources disponibles localement." Thèse de doctorat, Université Bretagne Sud, <https://theses.hal.science/tel-02569445>.
- Zoure, Abraham Nathan, and Paolo Vincenzo Genovese. 2023. "Comparative Study of the Impact of Bio-Sourced and Recycled Insulation Materials on Energy Efficiency in Office Buildings in Burkina Faso." *Sustainability* 15 (2): 1466. <https://doi.org/10.3390/su15021466>.

Impact des transferts d'humidité sur la performance énergétique d'une paroi en terre allégée

Machhour El Assaad¹, Thibaut Colinart^{*1}, Thibaut Lecompte¹

¹ Univ. Bretagne Sud, UMR CNRS 6027, IRDL, F-56100 Lorient, France

^{*}thibaut.colinart@univ-ubs.fr

RESUME. La terre allégée est un mélange de terre et d'agrégats végétaux (comme la chènevotte), dont la conductivité thermique est inférieure à celle de la terre crue (80 mW/m.K) et pour lequel l'impact environnemental est moindre que celui des mélanges chaux/chanvre. Ce matériau est utilisé actuellement pour de la rénovation de bâti ancien ou les constructions à ossature bois. Afin de garantir les performances et d'élargir son spectre d'utilisation, son comportement hygrothermique doit être évalué dans différentes conditions. Cette communication examine la performance énergétique d'une paroi en terre allégée enduite dans une enceinte bi-climatique avec des conditions contrôlées des deux côtés. Diverses sollicitations statiques et dynamiques ont été imposées, notamment en agissant sur la direction du flux de vapeur. La paroi est équipée en surface et à cœur de capteurs de température, d'humidité relative et de flux de chaleur afin de déterminer sa valeur U selon la norme ISO 9869-1. Les résultats expérimentaux, validés par des simulations hygrothermiques, montrent que les transferts couplés de chaleur et d'humidité affectent ce coefficient U.

MOTS-CLÉS : Coefficient de transmission thermique, terre allégée, transferts hygrothermiques.

ABSTRACT. Light earth is a mixture of earth and plant aggregates (such as hemp shives). Its thermal conductivity is lower than that of raw earth (80 mW/m.K), and its environmental impact is less than that of lime/hemp mixtures. This material is currently used for the renovation of old buildings and wood-frame construction. In order to guarantee its performance and broaden its spectrum of use, its hygrothermal behavior needs to be assessed under different conditions. This paper examines the energy performance of a rendered light earth wall in a bi-climatic chamber with controlled conditions on both sides. Various static and dynamic loads were imposed, in particular by acting on the direction of moisture flow. The surface and core of the wall were fitted with temperature, relative humidity and heat flux sensors to determine its U-value in accordance with ISO 9869-1. Experimental results, validated by hygrothermal simulations, show that coupled heat and moisture transfers affect this U-value.

KEYWORDS: thermal transmission coefficient, light earth, hygrothermal transfer.

1. INTRODUCTION

Le coefficient de transmission thermique d'une paroi est une caractéristique essentielle pour évaluer les pertes de chaleur et déterminer les besoins énergétiques d'un bâtiment. Elle peut être évaluée théoriquement sur la méthodologie décrite dans la norme ISO 6946 ou expérimentalement par des méthodes de mesure *in situ* telles que la méthode HFM (Gaspar, Casals, and Gangolells 2018; Ficco et al. 2015), la méthode thermométrique (Bienvenido-Huertas et al. 2018) ou encore la méthode de la thermographie infrarouge quantitative (Albatici and Tonelli 2010). En raison de sa simplicité de mise

en œuvre, la méthode HFM, décrite par la norme ISO 9869-1, est la plus utilisée. Cette méthode qui consiste à mesurer le flux de chaleur à l'aide de fluxmètres et les températures de surface par deux thermocouples a largement été testé sur des parois composées de matériaux non-hygroscopiques.

Des études récentes a vu l'émergence de parois plus ouvertes aux transferts d'humidité, du fait d'une meilleure gestion de l'humidité à l'intérieur des murs (McClung et al. 2014; Mlakar and Štrancar 2013; Lstiburek 2004) ou de valeurs d'humidité relative plus faibles dans les ambiances intérieures (Mlakar and Štrancar 2013), tout en maintenant un potentiel de séchage intéressant (Lstiburek 2004). Ces nouvelles parois intègrent facilement des bétons biosourcés (Shea, Lawrence, and Walker 2012; Evrard and De Herde 2010; Piot et al. 2017; Lelievre, Colinart, and Glouannec 2014).

Ces parois sont le siège de transferts couplés de chaleur et d'humidité qui peuvent influencer sur le coefficient de transmission thermique. Nicolajsen (Nicolajsen 2005) a comparé le coefficient de transmission thermique d'une façade isolée avec de la ouate de cellulose et l'a comparé avec de la laine de roche dans un climat danois réel. Ses résultats ont montré que la teneur en humidité n'a pas d'influence significative sur les valeurs mesurées, sachant que la teneur en humidité atteint jusqu'à 18 % en hiver. Latif et al. (Eshrar Latif, Ciupala, and Wijeyesekera 2014) ont comparé des panneaux incorporant des isolants en chanvre et en laine de roche de même transmittance thermique théorique pour différentes conditions. Les résultats ont montré une augmentation de la transmittance thermique des deux matériaux avec l'augmentation de la teneur en humidité, avec une augmentation légèrement plus importante de la transmittance thermique du panneau incorporant l'isolant en chanvre. Cette étude a été complétée par une comparaison de trois panneaux à U théorique identique (un panneau biosourcé "Biond" et deux panneaux traditionnels contenant des fibres de bois et un isolant en laine minérale) sous des conditions intérieures et extérieures hivernales (E. Latif et al. 2018). Leurs résultats indiquent que le panneau biosourcé a des valeurs U plus élevées que les deux panneaux traditionnels mettant en évidence l'influence de l'humidité sur les matériaux hygroscopiques.

Cette revue de la littérature souligne que les études sur les effets de l'humidité sur les mesures *in situ* du coefficient de transmission thermique restent rares. En s'appuyant sur nos travaux précédents visaient à déterminer l'effet de l'humidité sur la mesure de la conductivité thermique dans un système fermé (EL Assaad, Colinart, and Lecompte 2023b), l'objectif de cette étude est d'évaluer l'influence des échanges d'humidité avec l'environnement sur la mesure *in situ* de la transmission thermique d'une paroi ouverte à la vapeur d'eau.

2. PRESENTATION DU CAS D'ETUDE

2.1. DISPOSITIF EXPERIMENTAL

La paroi présentée sur la Figure 1 a été construite et testée. Il s'agit d'une cadre en ossature bois (de dimensions 880 x 970 x 220 mm³) dans lequel a été projetée de la terre allégée (Colinart et al. 2020; Busbridge and Rhydwen 2010; Goodhew et al. 2021). Après une phase de séchage, cette paroi a été recouverte de couches de finition : un pare-pluie extérieur (Sd = 0,08 m) et un enduit terre lin de 12 mm d'épais sur sa face intérieure. Les propriétés des matériaux sont présentées sur la Figure 1.

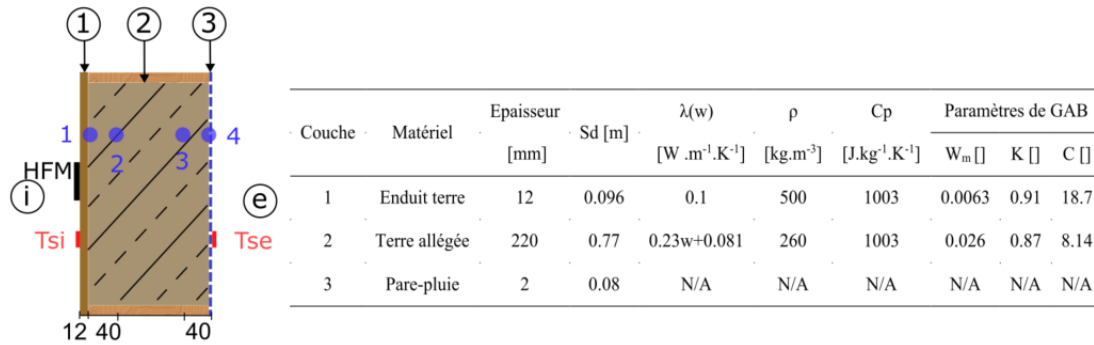


Figure 1 : Vue schématique du système étudié, de sa composition, de l'emplacement des capteurs et des propriétés des matériaux.

Cette paroi a été instrumentée. La température et l'humidité relative sont mesurées avec des capteurs Sensirion SHT85 (précision de $\pm 0,1$ °C et $\pm 1,5$ %hr). Ces capteurs (en bleu sur la Figure 1) sont placés dans la terre allégée à 4 cm des surfaces, aux interfaces entre matériaux différents et dans l'environnement intérieur et extérieur. Des thermocouples K (en rouge sur la Figure 1) sont placés sur les surfaces intérieures et extérieures. Un fluxmètre Captec C50 mince, carré et rigide (d'une dimension de 50 x 50 mm²) est fixé sur la surface intérieure à l'aide d'un ruban adhésif double face (en noir sur la Figure 1). Les données sont enregistrées via une centrale d'acquisition avec un pas de temps de 5 min.

La paroi instrumentée est installée dans une enceinte bi-climatique, dans laquelle les températures et humidités relatives intérieures et extérieures peuvent être contrôlés indépendamment.

2.2. PREDETERMINATION DES CONDITIONS EXPERIMENTALES

Afin de fixer les consignes expérimentales, une étude théorique est préalablement effectuée au moyen d'une simulation hygrothermique. Celle-ci est réalisée avec le modèle de transfert de chaleur et d'humidité présenté dans (EL Assaad, Colinart, and Lecompte 2023b), en considérant l'absence de transfert de liquide et une conductivité thermique dépendant de l'humidité. Pour examiner l'impact du flux d'humidité sur la conductance thermique de la paroi, l'idée principale est de créer un gradient de température avec des gradients de pression de vapeur différents. Dans le cas présent, les conditions intérieures sont maintenues à 21 °C et 50 %hr et les conditions extérieures sont imposées d'abord à 30 °C et 30 %hr (gradients de pression de vapeur quasi nul), puis à 30 °C et 30 %hr (gradients de pression de vapeur important dans le même sens que le gradient de température). Après initialisation du calcul à 21 °C et 50 %hr, les évolutions de pression de vapeur aux positions des capteurs (cf. Figure 1) sont présentées sur la Figure 2a. Elles convergent vers une valeur unique durant une première phase de 30 jours, avant qu'une différence ne soit imposée dans un second temps. Les évolutions sont lentes et l'équilibre hygrothermique est atteint 90 jours après la sollicitation. Conjointement, les évolutions du flux total de chaleur et uniquement de sa part conductive quantifiées au niveau de la surface intérieure sont présentées sur la Figure 2b. Durant la première séquence, le flux de chaleur total est resté quasiment constant (≈ 3 W.m⁻²), alors que le flux thermique conductif a augmenté de 2,7 W.m⁻² à ≈ 3 W.m⁻². Cette évolution est liée à la redistribution de l'humidité à l'intérieur du mur. A la fin de cette séquence, le gradient de pression de vapeur est quasi nul, ce qui annule le flux de vapeur et donc la contribution latente au flux thermique au niveau de la surface intérieure : flux total et flux conductif convergent vers

la même valeur, qui dépend du niveau de teneur en eau dans la paroi. Durant la seconde séquence, le flux thermique conductif a augmenté jusqu'à $3,1 \text{ W.m}^{-2}$ en raison de l'augmentation de la teneur en eau moyenne de la terre allégée de 3,2 % à 5,3 %. En revanche, le flux thermique total a augmenté jusqu'à $3,8 \text{ W.m}^{-2}$, qui met en évidence les effets latents associés à l'augmentation du gradient de pression de vapeur.

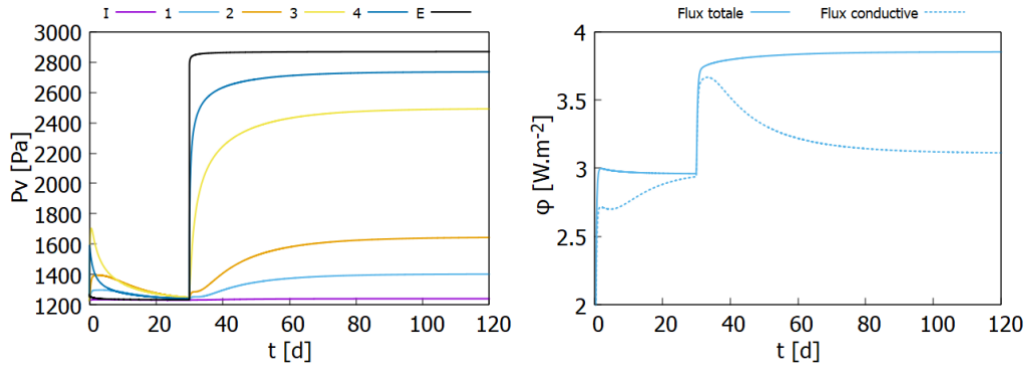


Figure 2 : Évolutions simulées de la pression de vapeur en différents points de la paroi (a) et du flux total de chaleur et de sa part conductive au niveau de la surface intérieure (b).

Les valeurs U ont été calculées pour les 5 derniers jours de chaque période selon la méthode moyenne proposée par la norme ISO 9869-1 (équation 1) par la relation suivante :

$$U = \frac{\sum_{j=1}^n \phi_j}{\sum_{j=1}^n (T_{soj} - T_{sij})} \quad (1)$$

A l'issue de la première séquence, la valeur conductive et totale sont égales à $0,38 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$, en accord avec les données présentées dans la Figure 1. A l'issue de la seconde séquence, la valeur conductive a augmenté de 7 % pour atteindre $0,4 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$, alors que la valeur totale a augmenté de 31 % pour atteindre $0,5 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$. Ces premiers résultats soulignent donc l'importance du niveau de teneur en eau dans la paroi et de la direction et de l'intensité du flux d'humidité au travers de celle-ci. En fonction des capacités techniques de l'enceinte bi-climatique, il a été décidé de programmer les conditions présentées dans le Tableau 1 pour faire varier le gradient de pression de vapeur pour un même gradient thermique.

	T_{int} [°C]	HR_{int} [%rh]	T_{ext} [°C]	HR_{ext} [%rh]	$P_{v_{\text{ext}}} - P_{v_{\text{int}}}$ [Pa]	Durée [j]
Phase 1			35	30	- 400	16
Phase 2			35	35	≈ 0	20
Phase 3	22	60	35	70	2500	25
Phase 4			30 ± 5	70 ± 10	1500	15

Tableau 1 : Aperçu des sollicitations imposées.

3. RESULTATS EXPERIMENTAUX

Le test a été initialement réalisé en imposant les consignes souhaitées au niveau de l'ambiance intérieure. Cependant, les déclenchements très fréquents du groupe froid ont fortement perturbé les mesures de flux thermique au niveau de la surface intérieure de la paroi. Aussi a-t-il été décidé de ne

pas réguler cette ambiance en maintenant la porte de la chambre intérieure semi-ouverte et en subissant les conditions du laboratoire. Durant ces tests réalisés pendant une période estivale, la température et l'humidité relative de la chambre intérieure ont varié autour de $22 \pm 4 \text{ }^\circ\text{C}$ et $60 \pm 10 \text{ \%rh}$ respectivement. Les évolutions de pression de vapeur mesurées en différents points de la paroi sont tracées sur la Figure 3. Les 4 phases expérimentales respectent bien la logique de définition des conditions expérimentales. La phase 3 a été suffisamment longue pour atteindre quasiment l'équilibre hygrothermique. Enfin, l'enceinte bi-climatique est capable d'imposer des évolutions sinusoïdales de pression de vapeur avec une période de 24h au niveau de l'ambiance extérieure.

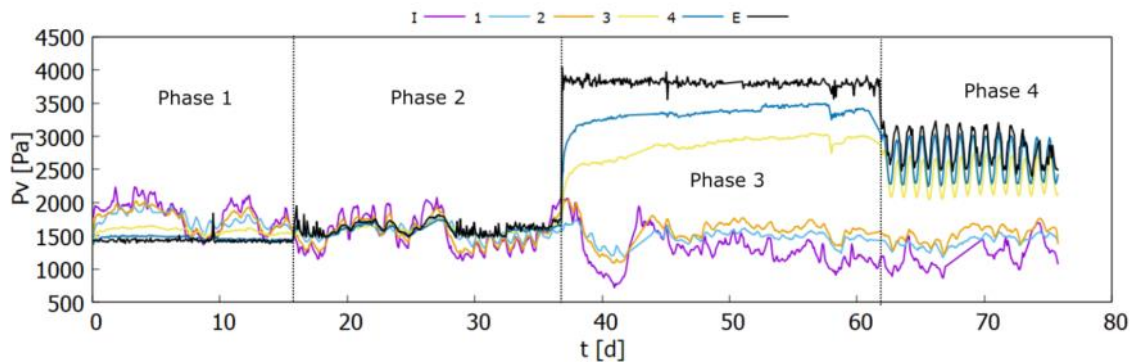


Figure 3 : Évolutions mesurées de la pression de vapeur en différents points de la paroi.

La Figure 4 compare les variations expérimentales du flux thermique mesuré en surface intérieure de la paroi avec la différence entre les températures de surface intérieur et extérieur ($T_{se} - T_{si}$). Aucune corrélation ne se dégage entre les deux grandeurs instantanées, comme le montre la quasi-invariance du flux thermique durant la phase 4 pendant laquelle ($T_{se} - T_{si}$) varie fortement. A contrario, il semblerait que les variations instantanées du flux thermique sont plutôt influencées par les variations de température intérieure. Par ailleurs, le bruit de mesure du flux thermique est plus important lors des phases 3 et 4 lorsque la différence de pression de vapeur est la plus importante. En revanche, on retrouve bien cette corrélation entre les valeurs moyennes du flux thermique et de ($T_{se} - T_{si}$).

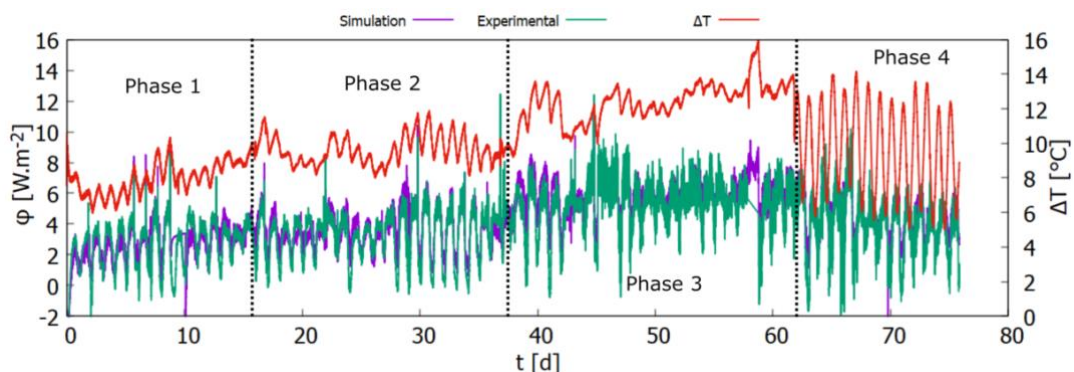


Figure 4 : Flux de chaleur mesuré et simulé en surface intérieure de la paroi et comparaison avec la différence de température entre les surfaces extérieure et intérieure.

Le comportement hygrothermique de cette paroi a été simulé pour cet essai. Un bon accord est trouvé pour les températures et humidités relatives en différents points de la paroi. Les évolutions du flux

simulées sont également présentées sur la Figure 4. Les ordres de grandeur sont globalement respectés, même si les fluctuations expérimentales ponctuelles ne peuvent être fidèlement reproduites.

Les valeurs de U ont été évaluées expérimentalement et numériquement durant les 5 derniers jours de chaque phase. Les résultats sont compilés sur la Figure 5 en fonction de la différence de pression de vapeur Δp_v . Globalement, on note une augmentation de U avec Δp_v , hormis sur la valeur expérimentale lors du passage de la phase 1 ($\Delta p_v = -384$ Pa) à la phase 2 ($\Delta p_v = 227$ Pa). Ces observations sont conformes aux prédictions préliminaires et confirment que les flux d'humidité peuvent influencer les performances thermiques à l'échelle de la paroi. Ce constat rejoint celui déjà effectué à l'échelle des matériaux dans une précédente étude (EL Assaad, Colinart, and Lecompte 2023b). En effet, lors de la mesure de la conductivité thermique de matériaux humides, on a observé d'une part une augmentation logique de la conductivité thermique avec la teneur en eau et d'autre part une influence des flux latents sur la mesure des flux thermiques.

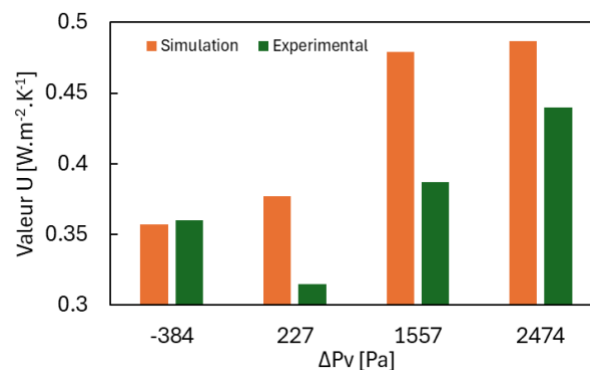


Figure 5 : Valeurs de U mesurées et simulées pour les 5 derniers jours de chaque phase.

Malgré des tendances similaires, on note un écart significatif entre les valeurs de U simulées et expérimentales lorsque Δp_v est positif. L'écart est d'environ 17 % dans les phases 2 et 4, et de 10 % dans la phase 3. Ces différences sont principalement dues à la différence entre le flux thermique mesuré et le flux thermique simulé. Au cours de ces essais, le fluxmètre peut fonctionner comme une barrière, provoquant une augmentation de la teneur en eau en dessous. Cette augmentation de la teneur en eau induit un changement de phase local qui influence le flux de chaleur mesuré. Cependant, l'humidité accumulée migre lentement autour des côtés et le flux de chaleur reprend son équilibre en quelques jours (EL Assaad, Colinart, and Lecompte 2023a).

Les différences entre les valeurs expérimentales et simulées ont également été mises en évidence par (Flood, Scott, and Gleeson 2017; Arregi et al. 2020). Plusieurs facteurs peuvent être à l'origine de ces écarts : les différences entre les conditions d'étalonnage du fluxmètre et les conditions d'utilisation (Kočí and Černý 2022), la différence d'émissivité entre le capteur et le mur (Cesaratto, De Carli, and Marinetti 2011), le contact thermique du fluxmètre avec la paroi (Meng et al. 2015; Gaspar, Casals, and Gangoles 2021), ou la différence de température entre l'intérieur et l'extérieur, qui devrait être supérieure à 10 °C mais qui n'a pas pu être atteinte en raison des limitations de la chambre bi-climatique (Desogus, Mura, and Ricciu 2011; Cabeza et al. 2010). La différence peut également être attribuée aux incertitudes dans les simulations hygrothermiques.

4. CONCLUSIONS

Ce travail s'est focalisé sur l'effet du transfert d'humidité sur la mesure de la valeur U d'une paroi ouverte à la vapeur d'eau, en l'occurrence une paroi en ossature en bois isolé avec de la terre allégée. L'effet du niveau et de la direction du gradient de pression de vapeur a été évalué au moyen d'expériences réalisées dans une chambre bi-climatique, accompagnées de simulations effectuées à l'aide d'un modèle de transfert hygrothermique.

Les résultats ont démontré une augmentation significative de 30 % de la valeur U entre deux expériences menées sous un gradient de température constant mais avec des gradients de pression de vapeur différents. Il a également été démontré qu'une diminution de la valeur U se produit lorsque le gradient de pression de vapeur s'oppose à la direction du flux de chaleur.

Des différences ont été observées entre les valeurs expérimentales et simulées et pour lesquelles plusieurs origines ont été supposées et devront être vérifiées dans un travail ultérieur. Au-delà, il conviendra d'évaluer l'impact du transfert d'humidité dans les parois perméable sur les performances énergétiques à l'échelle du bâtiment.

5. REMERCIEMENTS

Ces travaux ont bénéficié du support financier de l'ADEME via le projet Locabati.

6. BIBLIOGRAPHIE

- Albatici, Rossano, and Arnaldo M. Tonelli. 2010. "Infrared Thermovision Technique for the Assessment of Thermal Transmittance Value of Opaque Building Elements on Site." *Energy and Buildings* 42 (11): 2177–83. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.07.010>.
- Arregi, Beñat, Roberto Garay-Martinez, Julen Astudillo, Miriam García, and Juan Carlos Ramos. 2020. "Experimental and Numerical Thermal Performance Assessment of a Multi-Layer Building Envelope Component Made of Biocomposite Materials." *Energy and Buildings* 214 (May): 109846. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.109846>.
- Bienvenido-Huertas, David, Roberto Rodríguez-Álvaro, Juan José Moyano, Fernando Rico, and David Marín. 2018. "Determining the U-Value of Façades Using the Thermometric Method: Potentials and Limitations." *Energies* 11 (2): 360. <https://doi.org/10.3390/en11020360>.
- Busbridge, Ruth, and Ranyl Rhydwen. 2010. "AN INVESTIGATION OF THE THERMAL PROPERTIES OF HEMP AND CLAY MONOLITHIC WALLS."
- Cabeza, L. F., A. Castell, M. Medrano, I. Martorell, G. Pérez, and I. Fernández. 2010. "Experimental Study on the Performance of Insulation Materials in Mediterranean Construction." *Energy and Buildings* 42 (5): 630–36. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2009.10.033>.
- Cesaratto, Pier Giorgio, Michele De Carli, and Sergio Marinetti. 2011. "Effect of Different Parameters on the in Situ Thermal Conductance Evaluation." *Energy and Buildings* 43 (7): 1792–1801. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.03.021>.
- Colinart, T., T. Vincenaslas, H. Lenormand, A. Hellouin De Menibus, E. Hamard, and T. Lecompte. 2020. "Hygrothermal Properties of Light-Earth Building Materials." *Journal of Building Engineering* 29 (May): 101134. <https://doi.org/10.1016/j.job.2019.101134>.
- Desogus, Giuseppe, Salvatore Mura, and Roberto Ricciu. 2011. "Comparing Different Approaches to in Situ Measurement of Building Components Thermal Resistance." *Energy and Buildings* 43 (10): 2613–20. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.05.025>.
- EL Assaad, M, T Colinart, and T Lecompte. 2023a. "Numerical and Experimental Estimation of Building Wall Heat Flux in Presence of Moisture Transfer." *Journal of Physics: Conference Series. Vol. 2654. No. 1. IOP Publishing, 2654.*

- EL Assaad, M., T. Colinart, and T. Lecompte. 2023b. “Thermal Conductivity Assessment of Moist Building Insulation Material Using a Heat Flow Meter Apparatus.” *Building and Environment* 234 (April): 110184. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110184>.
- Evrard, A., and A. De Herde. 2010. “Hygrothermal Performance of Lime-Hemp Wall Assemblies.” *Journal of Building Physics* 34 (1): 5–25. <https://doi.org/10.1177/1744259109355730>.
- Ficco, Giorgio, Fabio Iannetta, Elvira Ianniello, Francesca Romana d’Ambrosio Alfano, and Marco Dell’Isola. 2015. “U-Value in Situ Measurement for Energy Diagnosis of Existing Buildings.” *Energy and Buildings* 104 (October): 108–21. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.06.071>.
- Flood, Cormac, Lloyd Scott, and William Gleeson. 2017. “Comparison of Transient Hygrothermal Modelling Against In Situ Measurement for Thermal Transmittance.” In *Building Information Modelling, Building Performance, Design and Smart Construction*. DOI 10.1007/978-3-319-50346-2_17.
- Gaspar, Katia, Miquel Casals, and Marta Gangoellés. 2018. “In Situ Measurement of Façades with a Low U-Value: Avoiding Deviations.” *Energy and Buildings* 170 (July): 61–73. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.04.012>.
- . 2021. “Influence of HFM Thermal Contact on the Accuracy of In Situ Measurements of Façades’ U-Value in Operational Stage.” *Applied Sciences* 11 (3): 979. <https://doi.org/10.3390/app11030979>.
- Goodhew, Steve, Mohamed Boutouil, François Streiff, Malo Le Guern, Jim Carfrae, and Matthew Fox. 2021. “Improving the Thermal Performance of Earthen Walls to Satisfy Current Building Regulations.” *Energy and Buildings* 240 (June): 110873. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.110873>.
- Kočí, Jan, and Robert Černý. 2022. “A Design of a Semi-Virtual Calibration Experiment for a Sensitivity Enhancement of General-Purpose Heat Flow Meters Applied in Residential Buildings.” *Energy* 261 (December): 125287. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.125287>.
- Latif, E., R. M. H. Lawrence, A. D. Shea, and P. Walker. 2018. “An Experimental Investigation into the Comparative Hygrothermal Performance of Wall Panels Incorporating Wood Fibre, Mineral Wool and Hemp-Lime.” *Energy and Buildings* 165 (April): 76–91. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.01.028>.
- Latif, Eshrar, Mihaela Anca Ciupala, and Devapriya Chitral Wijeyesekera. 2014. “The Comparative in Situ Hygrothermal Performance of Hemp and Stone Wool Insulations in Vapour Open Timber Frame Wall Panels.” *Construction and Building Materials* 73 (December): 205–13. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.09.060>.
- Lelievre, D., T. Colinart, and P. Glouannec. 2014. “Hygrothermal Behavior of Bio-Based Building Materials Including Hysteresis Effects: Experimental and Numerical Analyses.” *Energy and Buildings* 84: 617–27. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.09.013>.
- Lstiburek, Joseph W. 2004. “Understanding Vapor Barriers.” *ASHRAE Journal*.
- McClung, Ruth, Hua Ge, John Straube, and Jieying Wang. 2014. “Hygrothermal Performance of Cross-Laminated Timber Wall Assemblies with Built-in Moisture: Field Measurements and Simulations.” *Building and Environment* 71 (January): 95–110. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.09.008>.
- Meng, Xi, Biao Yan, Yanna Gao, Jun Wang, Wei Zhang, and Enshen Long. 2015. “Factors Affecting the in Situ Measurement Accuracy of the Wall Heat Transfer Coefficient Using the Heat Flow Meter Method.” *Energy and Buildings* 86 (January): 754–65. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.11.005>.
- Mlakar, Jana, and Janez Štrancar. 2013. “Temperature and Humidity Profiles in Passive-House Building Blocks.” *Building and Environment* 60 (February): 185–93. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.11.018>.
- Nicolajsen, Asta. 2005. “Thermal Transmittance of a Cellulose Loose-Fill Insulation Material.” *Building and Environment* 40 (7): 907–14. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2004.08.025>.
- Piot, A., T. Béjat, A. Jay, L. Bessette, E. Wurtz, and L. Barnes-Davin. 2017. “Study of a Hempcrete Wall Exposed to Outdoor Climate: Effects of the Coating.” *Construction and Building Materials* 139 (May): 540–50. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.143>.
- Shea, Andy, Mike Lawrence, and Pete Walker. 2012. “Hygrothermal Performance of an Experimental Hemp-Lime Building.” *Construction and Building Materials* 36 (November): 270–75. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.123>.

Isolant biosourcé : Etat de l'art sur le Miscanthus

Dolly EL KHOUEIRY*^{1,2}, Chadi MAALOUF¹, Tala MOUSSA¹, Amandine PIOT²,
Christophe BLIARD³, Etienne WURTZ²

¹ *Institut de Thermique, Mécanique, Matériaux (ITheMM). Université de Reims
Champagne - Ardenne, Campus Moulin de la Housse, 51100 Reims.*

² *Université Grenoble Alpes, CEA, LITEN, INES, 73375 Le Bourget du Lac.*

³ *Institut de Chimie Moléculaire de Reims, ICMR-UMR 7312 CNRS, Université de Reims
Champagne -Ardenne, Campus Moulin de la Housse, 51100 Reims.*

*dolly.el-khoueiry@univ-reims.fr

RESUME. Face aux problèmes environnementaux qui s'aggravent et à la consommation excessive d'énergie dans le bâtiment, le développement de matériaux de construction durables présente un grand intérêt. Dès les années 1990, la biomasse végétale est utilisée dans la fabrication des isolants biosourcés, afin d'atteindre la neutralité carbone en 2050. Dans ce contexte, la valorisation de la biomasse issue du miscanthus dans le secteur du bâtiment fait l'objet de ce travail. En raison de sa croissance rapide, son empreinte carbone réduite et ses propriétés thermiques prometteuses, le miscanthus est une alternative écologique efficace aux isolants minéraux. Cet article présente les propriétés physico-chimiques du miscanthus, sa culture et croissance, ses applications dans le domaine de la construction ainsi que les défis et limitations que pose la composition chimique de ce matériau lignocellulosique. Ainsi, l'objectif consiste à présenter l'état de l'art sur le miscanthus, formant une base solide pour l'élaboration d'un isolant thermique à base de granulats d'un liant végétal utilisé dans la construction.

MOTS-CLÉS : miscanthus – bâtiment écologique – isolant biosourcé – état de l'art.

ABSTRACT. Due to the increased environmental problems and the excessive energy consumption in buildings, the development of durable and efficient construction materials is of great interest. Since 1990s, plant biomass has been used to create bio-sourced insulation, to reach carbon neutrality by 2050. In this context, the valorization of biomass from miscanthus in the building sector is the subject of this work. Due to its rapid growth, reduced carbon footprint and promising thermal properties, miscanthus is an ecological effective alternative to mineral insulators. This article presents the physico-chemical properties of miscanthus, its cultivation and growth, applications in the construction domain as well as the challenges and limitations posed by the chemical composition of this lignocellulosic material. Thus, the objective is to present a state of art on miscanthus, therefore providing a solid foundation for the elaboration of a thermal insulation material based on vegetable binder aggregates used in construction.

KEYWORD: miscanthus – ecological building – bio-sourced insulation – state of art.

1. INTRODUCTION GENERALE

L'efficacité énergétique des bâtiments est une préoccupation majeure dans le contexte actuel, où ces derniers représentent une part significative de la consommation d'énergie et des émissions de CO₂ : en 2022 l'exploitation de bâtiments représente 30 % de la consommation mondiale finale et 26 % des émissions de CO₂ liées à l'énergie (UNEP 2022). Dans le cadre des objectifs de développement durable fixés par les Nations Unies pour 2030, ainsi que des initiatives de l'Union européenne visant à réduire les émissions de gaz à effet de serre (“climate and energy package” for 2020, “climate and energy framework” for 2030 and “long-term strategy” for 2050 (Cirrincione et al. 2020)), l'accent est mis sur

l'amélioration de la performance énergétique des bâtiments par une bonne conception de l'enveloppe du bâtiment. Pour répondre aux défis environnementaux, l'utilisation de matériaux d'isolation écologiques, tels que les fibres végétales, gagne une attraction importante. Dans cette optique, le miscanthus, plante pérenne, constitue une source prometteuse pour la production de matériaux de construction durables. Dès les années 1980, des projets de recherche internationaux et nationaux ont été lancés pour étudier le potentiel du miscanthus dans la production de biomasse et ont étendu sa faisabilité en Europe du Sud comme ils ont permis de développer les connaissances sur la plante, d'améliorer sa récolte et de promouvoir son développement (Leroy 2023). Ainsi, dans un contexte de transition vers des technologies plus respectueuses de l'environnement et de normes énergétiques plus strictes, l'intérêt pour le miscanthus et d'autres biomatériaux durables ne cesse de croître.

Ce travail présente une vue d'ensemble approfondie sur le miscanthus, avec les multiples applications, sa culture, son adaptabilité à différents climats, ainsi que ses propriétés chimiques et physiques qui en font une ressource prometteuse pour l'énergie renouvelable et la construction durable.

2. APERÇU GENERAL SUR LE MISCANTHUS

Le miscanthus, plante vivace appartenant à la famille des Poaceae et originaire d'Asie, offre un potentiel considérable en tant que source durable de bioénergie et de biomatériaux. Le *Miscanthus × giganteus* (Mxg) est l'une des espèces les plus largement cultivées dans le monde et l'unique en France. Cela est due à de multiples avantages, notamment sa culture (plante rhizomatique), sa productivité élevée (19-24 t/(ha.an)) et son faible impact environnemental (Leroy 2023) (Brami 2022). Cette plante est caractérisée par sa croissance rapide, son adaptabilité à divers environnements et sols et son apport minimal en fertilisation (apport en eau : 80 à 300 g/g de matière sèche (Lewandowski et al. 2000) ; apport en azote : 50 kg N/ha (Pude et al. 2005)). Le miscanthus présente une gamme variée d'applications allant de la production d'énergie (biogaz, biocarburant, combustible pour chauffage), à l'industrie chimique (sacs plastiques biosourcés ou en pharmacologie) ainsi la construction (toitures des maisons, béton léger, panneaux de fibres, etc.) la litière animale et paillage horticole. En France, le débouché chauffage et biocarburant représentent actuellement les 2/3 de la production, et les litières animales et paillage horticole constituent les deuxième et troisième débouchés majoritaires (Leroy 2023).

La culture du miscanthus est en expansion avec une superficie totale de son exploitation estimée à environ 11000 ha en 2023 (Gbekou 2023). Cette culture suit un cycle végétatif annuel qui commence par la plantation au printemps (Mars-Avril) la première année puis des périodes de croissance (s'étend jusqu'à la fin de l'été où la plante atteint une hauteur de plus de trois mètres), de sénescence (commence à la fin de l'été, entraînant la chute des feuilles et la descente des nutriments dans le rhizome (Brami 2022)), et de récolte. Cette dernière étape commence dès la deuxième année de culture et peut s'effectuer en deux étapes : la récolte dite « verte » et « sèche ». La récolte « verte » a lieu à l'automne, souvent en octobre, avant que la plante ne soit complètement en sénescence. Le taux de matière sèche (MS) est de 40 à 50 % et le rendement varie de 15 à 25 t/ha.an. La récolte « sèche », la plus couramment pratiquée, a lieu à la fin de l'hiver, avant l'apparition des premiers bourgeons de l'année en février ou mars. Le taux de matière sèche est alors de 70 à 85 %, le rendement varie de 5 à 30 t MS/ha (Leroy 2023).

La composition chimique du miscanthus peut varier en fonction de plusieurs facteurs tel que l'espèce, les conditions de croissance, l'âge de la plante, la période de récolte et la partie de la plante (Vo et al.

2016). Les granulats de l'espèce Mxg selon Hodgson et *al.* (2011) sont composés de 50,34% de cellulose, 24,83% d'hémicellulose, 12,02% de lignine et 2,67% de cendre. Pude et *al.* (2005) ajoutent la présence de 1,8% de silicium dans le miscanthus. Kaack et *al.* (2003) globalisent la composition chimique de tous les géotypes de miscanthus selon les proportions suivantes : 93,1 à 95,6 g/100g DM (matière sèche) ; 36,5 à 43,3 g/100g DM de cellulose ; 9,3 à 16,3 g/100g DM de lignine et 0,4 à 3 g/100g DM de cendre. En ce qui concerne les minéraux, les concentrations correspondantes à la récolte début printemps sont : 0,2 à 0,6% d'azote ; 0,5 à 1,3% de potassium ; 0,1 à 0,5% de chlore et 1,6 à 4,0% de cendres (Lewandowski et *al.* 2000). Ces valeurs sont considérées faibles ce qui favorise la combustion. L'amidon et le saccharose sont les principales formes de stockage de carbone dans le miscanthus et l'azote est stocké sous forme de protéines et d'acides aminés. Le phosphore est stocké sous forme de phosphate ou de polyphosphate inorganique et le potassium ainsi que le magnésium sont stockés sous forme d'ions. Le calcium n'est pas stocké (Leroy 2023).

Les propriétés physico-chimiques du miscanthus permettent de comprendre son comportement et son exploitation notamment dans la construction. La conductivité thermique est estimée à 0,051 W/(m.K) pour des échantillons originaux sans fractionnement à 10°C (Schnabel et *al.* 2019), mais sa chaleur spécifique est souvent absente malgré qu'elle soit essentielle pour évaluer le comportement thermique du matériau (Ajabli et *al.* 2023). Aussi, Chen et *al.* (2017) ont trouvé une masse volumique apparente entre 222,2 kg/m³ et 250 kg/m³ pour des granulats allant de 0 et 4 mm alors que selon Chupin et *al.* (2020) la masse volumique de poudre de miscanthus varie entre 443 kg/m³ et 630 kg/m³ selon l'endroit où l'échantillon a été prélevé de la tige. Les propriétés hygriques peuvent en outre être classées en propriétés de stockage et de transport de l'humidité (teneur en humidité massique de granulats allant de 1 à 4 mm : 10.1%) (Schnabel et *al.* 2019). En termes de propriétés mécaniques, le module d'élasticité varie entre 5 et 10 GPa pour les graminées y compris le miscanthus (Kaack et *al.* 2001).

Parmi les études sur le miscanthus, Sun et *al.* (2010) présentent un travail approfondi de la morphologie et la culture du genre *Miscanthus sacchariflorus* (Poaceae) de Chine. Chupin et *al.* (2020) ont étudié la caractérisation thermique et mécanique des fragments de la tige de miscanthus. Les résultats mettent en évidence que l'effet génotypique, la position le long de la tige, les dimensions des fragments de la tige et les propriétés mécaniques sont fortement interconnectés en relation avec leurs caractéristiques biochimiques et structurelles respectives : la teneur en lignine (les composants non cellulosiques) augmente la stabilité thermique ($T_{max}=300^{\circ}C$ pour une teneur de 24% en lignine). Les granulats ayant un diamètre plus petit ou des rapports d'aspect plus élevés présentent des modules d'élasticité plus élevés (différence de 20% entre les tiges de 4 mm et 12 mm de diamètre). Dans la construction, les applications du miscanthus sont assez moindres et reposent sur une mise en œuvre des fibres broyées mais l'utilisation de la tige sans broyage est encore peu étudiée.

3. LE MISCANTHUS DANS LE BATIMENT

Dans une perspective de développement et construction durable, les matériaux écologiques suscitent un fort intérêt, vu qu'ils génèrent un minimum de déchets lors de l'étape d'utilisation et peuvent être recyclés à l'étape de fin de vie. Les matériaux traditionnels utilisés dans les bâtiments en particulier les isolants tel que le polystyrène expansé et la laine minérale ne sont pas biodégradables et leur énergie grise est élevée (Vo et *al.* 2016). Il est ainsi clair que le remplacement des agrégats minéraux et inorganiques par des matériaux issus de la biomasse comme le miscanthus pourrait constituer une étape

importante pour atténuer certains problèmes liés aux aspects environnemental et économique. En effet, l'incorporation des fibres végétales dans les bétons présente des propriétés intéressantes puisqu'elle permet de réduire la masse volumique ainsi que la conductivité thermique au détriment de la détérioration des propriétés mécaniques (selon le type de liant, on peut obtenir des bétons légers structurels). A noter que l'isolation thermique des bâtiments vise à offrir aux occupants un haut niveau de confort intérieur tout en utilisant le moins d'énergie de refroidissement et de chauffage possible. D'où les avantages de ces matériaux qui peuvent être résumé à : confort hygrothermique, bonne isolation acoustique, longue résistance à la putréfaction pour un isolant naturel, recyclabilité, bilan environnemental très avantageux (stockage temporaire de carbone) et coût de mise en œuvre relativement bas. Cependant, ces matériaux présentent des inconvénients notamment la performance thermique très variable en fonction du dosage, la mise en œuvre nécessitant une vigilance en l'absence de règles techniques et le manque de connaissance auprès des usagers.

Quant au miscanthus, de nombreuses recherches ont été menées sur son comportement dans les matériaux biosourcés. Chen et *al.* (2020) ont étudié l'utilisation des fibres de miscanthus dans le béton cimentaire ultra-léger pour leurs propriétés d'absorption acoustique, d'isolation thermique et de résistance mécanique. Les résultats ont montré que l'incorporation de 30 % de granulats de miscanthus de 2 à 4 mm permet d'obtenir un matériau avec une masse volumique ultra-faible (554 kg/m^3), une conductivité thermique de $0,09 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$, et un coefficient d'absorption acoustique élevé de 0,9 aux basses fréquences. Les performances acoustiques peuvent être améliorées en optimisant le dosage et la forme des granulats. En comparant avec le béton de chanvre à base de chaux, les coefficients d'absorption sont de 0,6 pour la fréquence plage de 1,0–1,25 kHz et 0,5 pour 1,25–1,60 kHz, respectivement pour les pourcentages volumiques de miscanthus de 20% et 30%.

Aussi, Gbekou et *al.* (2023) ont examiné l'impact d'incorporer des fibres de miscanthus micronisées dans un mortier de ciment sur les propriétés mécaniques et thermiques. Les résultats expérimentaux ont révélé des améliorations significatives (jusqu'à 87 %) de la résistance thermique. Cependant, cette amélioration s'est accompagnée d'une diminution considérable de la résistance mécanique de sorte que ces mortiers deviennent impropres aux applications structurelles mais à l'isolation.

Wu et *al.* (2022) ont montré que le traitement des fibres de miscanthus incorporées dans les matériaux biosourcés peut atténuer la dégradation à long terme du matériau. Le traitement thermique (3h à 250°C) suivi de broyage améliore la résistance à la compression de 82,7% et à la flexion de 26,9% du mortier de miscanthus par rapport à la fibre de référence, grâce à la porosité réduite et à la compatibilité améliorée entre les fibres et la matrice du mortier. De plus, l'environnement alcalin du mortier provoque la dissolution de certains composants celluloseux dans la fibre, entraînant sa dégradation. Pour cela, l'élimination du sucre de la fibre de miscanthus favorise le développement de la résistance et la durabilité du mortier. Aussi, Vo et *al.* (2016) ont montré que certains traitements peuvent améliorer la durabilité de la biomasse dans la matrice cimentaire alcaline en réduisant l'absorption d'eau et en améliorant la compatibilité entre le ciment et la biomasse. Mais, ils mettent l'accent sur le fait que la plupart de ces traitements, pour ne pas dire tous, ont peu de valeur pratique, soit parce qu'ils sont impossibles à mettre en œuvre en raison de l'utilisation de produits chimiques non respectueux de l'environnement, soit parce qu'ils sont trop coûteux. Ils démontrent également que plusieurs composants de la biomasse, comme les sucres solubles ou les hémicelluloses de faible masse molaire, ont des effets indésirables sur la préparation et les performances du béton. Les travaux des auteurs montrent la capacité du miscanthus à

fixer le CO₂ où un hectare de miscanthus utilisé pour la construction peut stocker 40 tonnes de CO₂, contribuant ainsi à réduire les émissions de gaz à effet de serre. Selon le liant utilisé, la composition du béton frais et la nature du miscanthus, le béton peut conserver une résistance à la compression à 7 jours allant de 0,95 à 5,84 MPa avec une conductivité thermique de 0,7 W/m K à 20% HR et 20–60 °C.

Les interactions chimiques et minéralogiques entre les particules de miscanthus et des mélanges de liants minéraux à base de chaux ont été évalué par Ntimugura *et al.* (2022). Les auteurs ont démontré que des ajouts minéraux tel que du laitier de haut fourneau granulé broyé (GGBS), cendres volantes (FA) et ciment Portland (Ce) permettent d’améliorer l’adhésion entre les granulats et la matrice à base de chaux. Le tableau 1 présente une récapitulation des études effectuées sur le miscanthus à l’échelle du matériau avec les principaux résultats obtenus.

Auteurs, année	Matériau	Principaux résultats
Chen et al., 2024.	Granulats de miscanthus de 2–4 mm ; aérogel de silice olivine ; liant : matériaux cimentaires supplémentaires (SCM) à grand volume CEM III/A	L'absorption d'eau des fibres modifiées est réduite jusqu'à 33%. La conductivité thermique est réduite jusqu'à 0,081 W/(m.K). La résistance à la compression et à la flexion, ainsi que les performances isolantes du béton sont améliorées considérablement.
Wu et al., 2022.	Miscanthus brut et poudre (vol% : 1 ; 1,5 et 2). Liant : ciment CEM I 52,5 R.	Le traitement thermique des fibres améliore les propriétés mécaniques, la stabilité dimensionnelle du mortier et sa durabilité dans le mortier.
Dias et al., 2021.	Fibres séchées de Mxg et grains de mycélium du champignon <i>Ganoderma resinaceum</i> comme enveloppe du miscanthus.	La conductivité thermique est comprise entre 0,0882 et 0,104 W/(m.K) avec une masse volumique moyenne de 122 kg/m ³ . Les plaques composites appartiennent à la catégorie EI15 selon la norme EN13501–2 :2003.
Ntimugura et al. 2021.	Blocs de miscanthus – chaux ; blocs de miscanthus avec briques en terre cuite ; charpente de bois rempli de blocs de miscanthus...	Les blocs de miscanthus peuvent capter 135 kg CO ₂ eq/m ³ pour une hypothèse de 100-années de durée de vie. Une réduction du rapport liant/granat de 2,0 à 1,5 réduit les émissions de gaz à effet de serre de 32,9 %.
Chen et al., 2020.	Béton (CEM III 52,5 N cement) ultra léger intégrant de deux types granulats de miscanthus (0-2 mm et 2-4 mm) et déchets de verre expansé EWG (0,25 ~ 8mm).	Masse volumique apparente du béton ultra léger avec 30% 2-4 mm fibres de miscanthus est 554 kg/m ³ avec une conductivité thermique de 0,09 W/(m.K) et un coefficient d'absorption acoustique de 0,9 à basses fréquences.
Chupin et al., 2020.	Deux clones de Mxg, deux clones de <i>M. sinensis</i> et deux clones de <i>M. sacchariflorus</i> .	Les résultats soulignent que l'effet génotypique, la position le long de la tige, la taille des granulats et leurs propriétés mécaniques sont fortement interconnectés avec leurs caractéristiques biochimiques et structurales respectives.
Schnabel et al., 2019.	Paille de maïs (<i>Zea mays</i> L.) et miscanthus (<i>Miscanthus sinensis</i> Giganteus)	Des teneurs en humidité inférieures ont été mesurées pour les échantillons traités. L'utilisation de matériaux traités sous pression de vapeur a des effets positifs sur les masses volumiques apparentes et la conductivité thermique en utilisant des matériaux fractionnés.

Chen et al., 2017	Miscanthus giganteus (granulats de 2 et 4 mm) ; Ciment Portland CEM I 52.5R	La résistance à la compression diminue considérablement avec l'ajout de miscanthus, de 56 à 15 MPa pour les fibres de 2 à 4 mm (remplacement de 20 % du volume) dans 28 jours. Toutes les fibres présentent un effet retardateur sur l'hydratation du ciment, mais les fibres de 0 à 2 mm ont le pire effet sur l'hydratation du ciment.
--------------------------	---	--

Tableau 1 : Tableau récapitulatif des études sur le miscanthus à l'échelle du matériau.

À l'échelle de la paroi, des plaques de dimensions 0,5 m x 0,5 m x 0,07 m ont été réalisées par Dias et al. (2021) sur le bio-composite mycélium-miscanthus après avoir étudié les propriétés du mélange avec des échantillons de prismes et trouvé que la proportion du mélange 0,3:1:0,1 de champignon *Ganoderma resinaceum*, de fibres de Mxg et de fécule de pomme de terre est la meilleure proportion. Les plaques sont laissées 76 jours à l'extérieur afin d'étudier l'impact sur eux des changements d'humidité et de température ainsi que du rayonnement UV. Le but de cette expérimentation est d'étudier le pouvoir isolant de ce composite, et son interaction avec le plâtre. Les résultats ont montré une conductivité thermique entre 0,088 et 0,104 W/(m.K) pour une masse volumique moyenne de 122 kg/m³. D'autre part, trois scénarios de différents assemblages de murs ont été étudiés par Ntimugura et al. (2021) sur des blocs miscanthus-chaux ayant une masse volumique de 450 – 550 kg/m³ et une conductivité thermique de 0,11 – 0,13 W/(m.K). À l'échelle du bâtiment, aucune étude n'est trouvée dans la littérature jusqu'à présent montrant les effets qu'apporte l'utilisation du miscanthus et son comportement à long terme. Sur certains projets tel qu'une rénovation à Spontin en Belgique le miscanthus a été utilisé pour un enduit fibré isolant. De plus le béton de miscanthus a été incorporé dans les parois préfabriquées d'une maison à Bannwil, Suisse en 2006 et à Chai à Ammerschwih, Alsace en 2015 (ADIL 2016).

Comme indiqué précédemment, le principal inconvénient de l'utilisation de la biomasse dans un matériau de construction est la durabilité des parties végétales dans la matrice cimentaire, ce qui peut entraîner une réduction des propriétés mécaniques du béton (Vo et al. 2016). Dans le cas du miscanthus, les fibres présentent une forte absorptivité en eau lié à leur hydrophilie et à leur forte microporosité. Cette capacité d'absorption d'eau dépend de la surface spécifique des particules, et tend à augmenter lorsque la taille moyenne des fibres diminue ; elle peut ainsi atteindre une valeur de l'ordre de 300% pour les particules de l'ordre de 4mm (Gbekou et al. 2023). Ceci affecte la mise en œuvre du mortier et le processus d'hydratation du ciment. Par exemple, Chen et al. (2020) ont observé une perte d'ouvrabilité dans le cas de bétons ultralégers cimentaires incluant des fibres de miscanthus. De plus, les produits d'isolation respectueux de l'environnement ne sont pas facilement accessibles et dans certains cas plus chers (Ajabli et al. 2023).

4. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

La matière végétale du Miscanthus contient des composés de fibres qui sont considérablement plus résistants que par exemple la paille, et aussi en raison de ses constituants chimiques comme le silicium, elle pourrait représenter un matériau de base approprié dans le bâtiment. Cette plante vivace présente deux avantages majeurs par rapport aux matériaux renouvelables courants. Ce sont les qualités d'isolation thermique et en plus la très grande fermeté de la matière végétale. L'utilisation de matériaux renouvelables comme matériaux de construction ouvre un énorme champ de possibilités aux agriculteurs et aux entreprises industrielles. La recherche s'accroît de plus sur ce sujet surtout avec les résultats positifs des matériaux biosourcés, et les propriétés thermo physiques prometteuses du miscanthus. Des

perspectives dans ce domaine sont entrepris pour explorer l'utilisation de liants non cimentaires à base végétale dans l'intégration du miscanthus dans la construction. Des travaux visant également à évaluer la mise en œuvre en vrac de ce matériau ainsi que des essais à l'échelle du bâtiment sont en cours, ouvrant ainsi de nouvelles voies pour une utilisation plus étendue et efficace de cette plante dans l'industrie de la construction.

5. REMERCIEMENT

Le projet de recherche MATériaux Innovants à base de MIScanthus, dont fait partie cet article, a pu être réalisé grâce au soutien financier de la région Grand Est et du CEA, avec Novabiom comme fournisseur de miscanthus.

6. BIBLIOGRAPHIE

- ADIL, Association Départementale d'Information sur le Logement de la Drôme – Fiche technique écoconstruction. 2016. "Le miscanthus : un nouveau matériau de construction."
- Ajabli H., Zoubir A., Elotmani R., Louzazni M., Kandoussi K. and Daya. A. 2023. "Review on Eco-friendly insulation material used for indoor comfort in building." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 185 (August): 113609. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113609>.
- Brami. C. 2022. "Enjeux de La Filière Thermique Du Miscanthus : Évaluation de l'effet d'une Culture de Miscanthus x Giganteus et de La Valorisation Agronomique de Ses Cendres, Sur La Qualité Du Sol." HAL. <https://theses.hal.science/tel-03793800>
- Chen Y. X., and Yu Q. 2024. "Surface modification of miscanthus fiber with hydrophobic silica aerogel for high performance bio-lightweight concrete." *Construction and Building Materials* 411 (August 2023): 134478. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134478>.
- Chen Y. X., Wu F., Yu Q. and Brouwers. H.J.H. 2020. "Bio-based ultra-lightweight concrete applying miscanthus fibers: acoustic absorption and thermal insulation." *Cement and Concrete Composites* 114 (November): 103829. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103829>.
- Chen Y., Yu Q. L. and Brouwers H. J.H. 2017. "Acoustic Performance and Microstructural Analysis of Bio-Based Lightweight Concrete Containing Miscanthus." *Construction and Building Materials* 157: 839–51. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.161>.
- Chupin L., Soccalingame L., De Ridder D., Gineau E., Mouille G., Arnoult S., Brancourt-Hulmel M. et al. 2020. "Thermal and dynamic mechanical characterization of miscanthus stem fragments: Effects of genotypes, positions along the stem and their relation with biochemical and structural characteristics." *Industrial Crops and Products* 156 (November): 112863. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112863>.
- Cirrincione L., La Gennusa M., Peri G., Rizzo G., Scaccianoce G., Sorrentino G. and Aprile S. 2020. "Green Roofs as Effective Tools for Improving the Indoor Comfort Levels of Buildings-an Application to a Case Study in Sicily." *Applied Sciences (Switzerland)* 10 (3): 1–19. <https://doi.org/10.3390/app10030893>.
- Dias P., Jayasinghe L. and Waldmann D. 2021. "Investigation of Mycelium-Miscanthus Composites as Building Insulation Material." *Results in Materials* 10 (June). <https://doi.org/10.1016/j.rinma.2021.100189>.
- Gbekou F. 2023. "Comportement thermo-hydrigue de mortiers cimentaires contenant des matériaux à changement de phase (MCP) biosourcés et/ou des fibres végétales de miscanthus : études aux échelles du matériau et de la paroi."

- Gbekou F., Boudenne A., Eddhahak A. and Benzarti K. 2023. “Mechanical and Thermal Properties of Cement Mortar Composites Incorporating Micronized Miscanthus Fibers.” *Journal of Materials Research and Technology* 26 (September): 7649–64. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.09.093>.
- Hodgson E. M., Nowakowski D. J., Shield I., Riche A., Bridgwater A.V., Clifton-Brown J.C. and Donnison I. S. 2011. “Variation in Miscanthus Chemical Composition and Implications for Conversion by Pyrolysis and Thermo-Chemical Bio-Refining for Fuels and Chemicals.” *Bioresource Technology* 102 (3): 3411–18. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.10.017>.
- Kaack K., and Schwarz K.U. 2001. “Morphological and Mechanical Properties of Miscanthus in Relation to Harvesting, Lodging, and Growth Conditions.” *Industrial Crops and Products* 14 (2): 145–54. [https://doi.org/10.1016/S0926-6690\(01\)00078-4](https://doi.org/10.1016/S0926-6690(01)00078-4).
- Kaack K., Schwarz K.U., and Brander P.E. 2003. “Variation in Morphology, Anatomy and Chemistry of Stems of Miscanthus Genotypes Differing in Mechanical Properties.” *Industrial Crops and Products* 17: 131–42. <https://doi.org/10.1016/S0926669002000936>.
- Leroy J. 2023. “Etude Écophysiological Temporelle de La Gestion Des Réserves Carbonées et Azotées Par Trois Génotypes de Miscanthus.” HAL.
- Lewandowski I., Clifton-Brown J.C., Scurlock J.M.O., and Huisman W. 2000. “Miscanthus: European Experience with a Novel Energy Crop.” *Biomass and Bioenergy*. Vol. 19 (May), 209-227.
- Ntimugura F., Vinai R., Harper A., and Walker P. 2021. “Environmental Performance of Miscanthus-Lime Lightweight Concrete Using Life Cycle Assessment: Application in External Wall Assemblies.” *Sustainable Materials and Technologies* 28 (July). <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2021.e00253>.
- Ntimugura F., Vinai R., Harper A. and Walker P. 2020. “Mechanical, Thermal, Hygroscopic and Acoustic Properties of Bio-Aggregates – Lime and Alkali - Activated Insulating Composite Materials: A Review of Current Status and Prospects for Miscanthus as an Innovative Resource in the South West of England.” *Sustainable Materials and Technologies*. Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2020.e00211>.
- Ntimugura F., Vinai R., Harper A. and Walker P. 2022. “Chemical, Mineralogical, and Microstructural Interactions between Lime-Pozzolan Binders and Miscanthus Particles in Lightweight Concretes.” *Cleaner Materials* 3 (100053). <https://doi.org/10.1016/j.clema.2022.100053>.
- Pude R., Treseler C.-H., Trettin R., and Noga G. 2005. “Suitability of Miscanthus Genotypes for Lightweight Concrete.” *Bodenkultur* 56 (1–4): 61–69.
- Schnabel T., Huber H., Petutschnigg A. and Jäger A. 2019. “Analysis of Plant Materials Pre-Treated by Steam Explosion Technology for Their Usability as Insulating Materials.” *Agronomy Research* 17 (2010): 1191–1198. <https://doi.org/10.15159/AR.19.061>.
- Sun Q., Lin Q., Yi Z.-L., Yang Z.-R. and Zhou F.-S. 2010. “A taxonomic revision of *Miscanthus* s.l. (Poaceae) from China.” *Botanical Journal of the Linnean Society* 164 (2): 178–220. <https://doi.org/10.1111/j.1095-8339.2010.01082.x>.
- UNEP United Nations Environment Programme. 2022. 2022 Global Status Report for Buildings and Construction: Towards a Zero-emission, Efficient and Resilient Buildings and Construction Sector. United Nations Environment Programme. Vol. 224.
- Vo L. T.T. and Navard P. 2016. “Treatments of plant biomass for cementitious building materials – A review.” *Construction and Building Materials*. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.05.125>.
- Wu F., Yu Q. and Brouwers H.J.H. 2022. “Long-Term Performance of Bio-Based Miscanthus Mortar.” *Construction and Building Materials* 324 (March). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126703>.

Observation et analyse des mécanismes expérimentaux impliquant la récupération des données de consommation issues du compteur Linky : des expériences Etudelec à xKy

Jérôme Ferrari^{1*}, Frédéric Wurtz¹, Benoit Delinchant¹, Anaïs Bovet¹, Christophe Boisseau¹, Daniel Llerena²

¹ Univ. Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP**, G2Elab, 38000 Grenoble, France

² Univ. Grenoble Alpes, CNRS, INRAE, Grenoble INP**, GAEL, F-38000 Grenoble, France

** Institute of Engineering Univ. Grenoble Alpes.

*jerome.ferrari@g2elab.grenoble-inp.fr

RESUME. Dans le cadre de la transition énergétique et écologique, les bâtiments se tournent vers une électrification de plus en plus importante. Cette transition impliquant de nouvelles stratégies de monitoring basées sur une récupération de données, souvent qualifiées d'intrusives pour la vie privée. Cet article présente du point de vue technique et juridique la mise en place de deux expérimentations de type science participative à l'échelle nationale supportées par l'Observatoire de la Transition Énergétique (OTE) et incluant la récupération de données issues du compteur Linky avec des résolutions temporelles différentes.

MOTS-CLÉS : Collecte de données, science participative, RGPD

ABSTRACT. As part of the energy and ecological transition, buildings are turning towards increasing electrification. This transition involves new monitoring strategies based on data recovery, often described as intrusive to privacy. This article presents from a technical and legal point of view the implementation of two participatory science type experiments on a national scale supported by the Energy Transition Observatory (OTE) and including the recovery of data from the Linky meter with different temporal resolutions.

KEYWORDS : Data collecting, participative science, RGPD.

1. UN CONTEXTE SOCIETALE DE TRANSITION

1.1. UN BESOIN EMERGENT

L'Observatoire de la Transition Énergétique (OTE), souhaite opérer un suivi à long terme de processus sociotechniques fondamentaux liés à la transition énergétique que sont en particulier les phénomènes de sobriété et de flexibilité de consommation énergétique. Par sa nature, l'OTE se retrouve à l'interface des questions d'évolution des sociétés et de leurs pratiques en interaction avec les infrastructures technologiques et matérielles de consommation énergétique.

Ce processus scientifique d'« observations » sur le temps long a été initié en septembre 2022 et a permis d'avoir des premières mesures, études et observations, en particulier lors de la crise énergétique de l'hiver 2022-2023, avec notamment les études intitulées Etudelec I&II&III (OTE, 2023a) comptant 400 participants : Ces études interdisciplinaires sont menées à l'interface des laboratoires GAEL et G2ELAB, et permettent de recueillir des données d'enquêtes par questionnaire et des courbes de consommation énergétique avec la résolution du système Linky (par pas de temps de 30 min avec données récupérées en temps différé de 24 à 48 heures).

En parallèle dans le cadre de l'OTE, le G2ELAB a développé un dispositif de type ERL en open-source et en open hardware, qui se connecte sur le compteur Linky (via la prise TIC du compteur Linky accessible à tout usager) ce qui permet d'augmenter la résolution et la réactivité temporelle des séries de mesures énergétiques réalisées (en permettant l'accès aux mesures en temps réels et en permettant une fréquence de mesure atteignant les 10 s). Ce dispositif est actuellement déployé dans une étude de terrain sous le format de science participative intitulé xKy dans laquelle nous recrutons actuellement près de 250 foyers ([OTE. 2023b](#)).

1.2. UN BESOIN DE TRANSPARENCE

Le compteur Linky ayant une place particulière dans notre société d'une part à cause de la méfiance suite aux controverses entourant ces compteurs intelligents ([Danieli. 2018](#)) mais aussi par la mise en place d'une législation stricte protégeant les données produites par ceux-ci, une question primordiale s'est alors imposée aux études présentes et futures de l'OTE utilisant des données issues du Linky. Cette question est la suivante : comment rendre accessible les données de consommation électrique au monde de la recherche de façon reproductible et transparente, tout en assurant le respect de la réglementation et de la vie privée ?

2. VERS UNE BOITE A OUTILS JURIDIQUE ET TECHNIQUE TRANSPARENTE

2.1. IDENTIFICATION DES DONNEES

En 2019, un travail amont d'identification des types de données sensibles et communes recueillies lors des futures expérimentations supportées par l'OTE a été effectué afin de permettre la réflexion sur une normalisation des procédures juridique et technique. Le tableau 1 synthétise les quatre grandes catégories identifiées lors de cette phase.

Etat civil	nom, prénom, année de naissance, profession
Données de contact	adresse mail, téléphone, adresse postale
Constitution de l'environnement du foyer	nombre de personnes, propriétaire/locataire, surface, année de construction, aide de l'état, type de chauffage principal, fournisseurs d'énergie, type de mobilité
Données de consommations	factures, données de consommation brutes

Tableau 1 : Identification des données

Nous pouvons préciser que la source des données de consommation peut changer en fonction de la résolution temporelle nécessaire aux études menées mais nécessite le même traitement juridique.

2.2. CREATION D'UNE BOITE A OUTILS JURIDIQUE ET TECHNIQUE

Suite à la phase d'identification, l'équipe a commencé à travailler sur la mise en place d'une boîte à outils incluant un support juridique ainsi que le déploiement des phases techniques de stockage, d'accès, d'anonymisation et de pérennisation des données issues des expérimentations.

2.2.1. La couverture juridique afin de protéger la vie privée

En ce qui concerne le support juridique, le groupe de travail de l'OTE en partenariat avec le délégué à la protection des données (DPO) de l'Université Grenoble Alpes a élaboré trois documents modèles donnant un cadre transparent réutilisable lors des expérimentations. Ces documents sont les suivants :

- **RGPD – Instruction de traitement administratif** : Ce document contient dans son intégralité le contexte de l'étude ainsi que la finalité de l'utilisation des données de celle-ci. Les types de

données sont décrits de façon exhaustive avec possibilité de nouveaux ajouts au travers d'une annexe. Le cycle de la donnée est quant à lui décrit dans le court et le long terme. Cette description schématisée de façon claire où sont stockées les données ainsi que le processus d'habilitation d'accès à celles-ci afin de garantir une sécurisation et une traçabilité lors de contrôle. ([CNIL. 2018](#))

- **Notice et consentement à l'accès aux données** : Du point de vue juridique la notice d'information et le consentement sont deux documents séparés, cependant dans la pratique ceux-ci sont fusionnés dans un document unique qui résume de façon claire et exhaustive au participant de l'étude le déroulement de l'expérimentation ainsi que la façon dont leurs données sont utilisées. Ce document rappelle au participant son droit d'accès, de rectification, de limitation du traitement, d'opposition ou d'effacement de ses données. Une fois lu, le document est daté et signé par le participant afin de valider leur consentement avisé et éclairé.

- **Formulaire d'habilitation d'accès aux données** : Ce document signé par tout personnel travaillant sur les données issues du serveur de l'OTE dans le cadre d'une expérimentation décrit de façon exhaustive les données utilisées ainsi que le cadre de leur utilisation. Un rappel des engagements moraux et juridiques vis-à-vis de la mauvaise utilisation ou du détournement des données est inclus dans ce formulaire. Techniquement ce document n'a pas de réelle valeur juridique mais rentre dans le cadre des « bonnes pratiques » permettant en interne la traçabilité de l'accès aux données personnelles.

2.2.2. La couverture juridique du point de vue des acteurs extérieurs

Un autre aspect en lien avec l'aspect juridique mais faisant le pont avec la technique de récupération des données a été construit en s'appuyant sur la plate-forme de service public Enedis basée sur l'infrastructure Linky, ce qui a été le cas pour les Etudes OTE Etudelec. Dans ce but, l'OTE a dû passer un contrat avec ENEDIS dit « Tiers de confiance » avec dans un premier temps le Laboratoire d'Economie Appliquée de Grenoble (GAEL) comme laboratoire support, ce qui permet à l'OTE d'accéder aux outils nécessaires, en utilisant les plateformes d'ENEDIS afin de pouvoir extraire ou recevoir les données de consommation depuis les serveurs d'Enedis. Ce document pose les règles d'accès et d'utilisation de la plateforme d'échanges d'Enedis stipulant les champs d'applications. Ces règles d'accès définissent pour une liste d'interlocuteurs les médias de transmission des flux (API, Envoi sur un serveur FTP, ...). Ce document pour finir, fournit un modèle de consentement permettant ENEDIS d'être le tiers de confiance chargé de fournir les données de consommation à un autre acteur, pour lequel le consommateur donne un consentement à l'accès à ces données. Par ce biais, nous pouvons disposer, dès lors que nous disposons du consentement éclairé du titulaire de contrat de fourniture d'énergie (autrement dit le consommateur derrière le compteur Linky) de la courbe de charge du consommateur : il s'agit d'une courbe avec un pas d'échantillonnage allant de 10 à 30 min que la plate-forme ENEDIS nous fournit avec un délai de 24 à 48h. Dans un futur proche, le G2Elab prendra le relais du GAEL en tant que laboratoire support pour ce contrat.

2.2.3. Les états de l'art des données énergétiques disponibles en accès ouvert

Nous nous proposons de réaliser ici un état de l'art des séries temporelles de mesures de consommation énergétiques disponibles à l'échelle française en « open-access » (ou accès ouvert). Dans cette perspective, les séries temporelles des consommations énergétiques à différentes échelles spatiales et temporelles disponibles sont :

- Le suivi national sur la consommation nationale fournit par RTE via les sites eco2-mix ou Enedis fournissant la consommation nationale avec un pas de temps pouvant osciller entre 1h, 30 min et 10 min ([RTE. 2023a](#))

- Ces mesures sont à présent complétées à ce niveau institutionnel par des études relevant de l'enquête sociale de type sondage déclaratif sur des panels institutionnels à l'échelle nationale à l'instar de l'étude IPSOS-RTE. ([RTE. 2023b](#))
- Des mesures et séries temporelles avec des pas de 30 min à 1h sont disponibles à des échelles spatiales plus régionales à l'instar des open-data fournis par Enedis. ([ENEDIS. 2022c](#))
- Des mesures des évolutions globales de sobriété faites par Enedis et RTE sont disponibles aux échelles nationales et régionales avec des pas de mesure de 1 semaine, agrégées par catégories d'utilisateurs (particuliers, entreprises, industrie, ...) et corrigées des variations saisonnières de températures. ([ENEDIS. 2022b](#)) et ([RTE. 2023c](#))
- Jusqu'à des mesures locales, avec Enedis qui fournit des données qui vont à des échelles spatiales très fines de l'ordre de l'adresse postale, mais dans ce dernier cas la donnée disponible agrège nécessairement un nombre significatif d'utilisateurs (au moins une dizaine) et la résolution temporelle se dégrade pour se ramener à des grandeurs annuelles. ([ENEDIS. 2022a](#))
- A côté des données précédentes, disponibles en accès ouvert, on peut rappeler qu'il existe la possibilité d'accès moins ouvert car accessible seulement aux entités gérant et ayant signé avec ENEDIS un contrat de type « tiers de confiance », et apte à recueillir le consentement d'un particulier (lorsqu'il s'agit de données personnelles afin de pouvoir récupérer les données historiques de consommation par pas de 30 min avec un décalage de 24 à 48h, à l'instar de ce que l'OTE a déployé dans les études

2.2.4. Nécessité de l'évolution des outils

L'état de l'art précédent nous montre que les données disponibles en accès ouvert (OpenData), ne combinent jamais simultanément **ET** une précision spatiale **ET** une précision temporelle **ET** une précision d'identification des usages et des utilisateurs (typiquement si on affine la précision spatiale, la précision temporelle est dégradée, et la précision d'usage est nécessairement masquée par des effets d'agrégation empêchant l'accès aux utilisateurs « producteurs » des données). Cette non accessibilité ouverte des données à des échelles qui soient simultanément fines dans les dimensions spatiales **ET** temporelles **ET** d'usages implique « un angle mort » pour une recherche ouverte apte à étudier les questions sociales et techniques de la transition énergétique et ayant pour ambition une approche capable d'aller des échelles globales aux échelles locales et individuelles liées particulièrement aux usages et aux utilisateurs.

La possibilité d'utiliser l'approche tiers de confiance permet en partie de combler cet angle mort, en déployant les efforts nécessaires pour gérer un contrat de type tiers de confiance, et en recueillant les consentements des sujets par des campagnes de recrutement, ce que nous pratiquons dans l'OTE via les études Etudelec. Si cette dernière approche nous permet ainsi de remonter jusqu'à la finesse spatiale du logement, et jusqu'aux données d'usage et de consommation des foyers, elle reste cependant limitée par les capacités du système tiers de confiance tel que déployé par ENEDIS dans le cadre de sa délégation de service public à savoir : être limité dans la réactivité temporelle puisque les données ne sont disponibles que 24 à 48h après la consommation effective, et de plus la résolution temporelle de la consommation est limitée de façon standard à des pas allant de 10 à 30 min.

Pour pallier à cet « angle mort » des données ouvertes, et augmenter à la fois la réactivité et le pas de mesure temporel, l'ajout d'un (Emetteur Radio Local) ERL permettant de se connecter sur la prise TéléInfoClient (TIC) du Linky et de remonter en temps réel a été étudié. Un premier état de l'art a été publié sur le site [miniprojets.net](#) ([Miniprojet. 2022](#)) montrant que les solutions existantes possédaient des limites (besoin d'une passerelle en plus pour communiquer, besoin d'une alimentation externe, prix excessif, passerelles propriétaires, non accès aux données direct).

C'est à la suite de cette étude que le G2Elab a développé un ERL capable de remonter par pas de 10 secondes les données issues de celui-ci (index, puissance apparente, option tarifaire, ...) et de façon autoalimentée par la prise TIC. Cet ERL ainsi que la chaîne de traitement des données ont été développés avec une vision « open-source » et « open-hardware », dans une étude de l'OTE intitulée xKy afin d'apporter une transparence autant au niveau juridique que technique. Le but de cette démarche est de permettre aux participants des futures expérimentations de savoir où et comment sont traités leurs données mais aussi de pouvoir piloter en temps réel leur installation domotique en fonction du tarif en cours si celle-ci est déjà existante.

Afin de tester et d'améliorer cet ERL ainsi que son écosystème en tant que support aux futures recherches, une expérimentation sous le format science participative a débuté début octobre 2023 avec 250 participants. Le but de cette étude est de déterminer les verrous sociaux et technologiques impliquant un tel dispositif (accessibilité, acceptabilité, fiabilité ...). Actuellement, grâce aux premiers retours, le dispositif possède maintenant 3 versions de moyens de communication (LoRa ([Ferrari et al. 2021](#)), Wifi ([Ferrari. 2022](#)) et Ethernet ([Ferrari. 2023](#))) une série d'une vingtaine de scripts permettant de rendre automatique le déploiement du dispositif en allant de la configuration automatique de l'ERL jusqu'à la création et à la configuration automatique d'une interface de visualisation des données personnelle pour chaque participant. Une supervision des ERL déployés a aussi été créée permettant aux équipes de recherche de pouvoir suivre et connaître la qualité des données remontées. Cette expérience utilise l'architecture de test suivante (Figure 1)

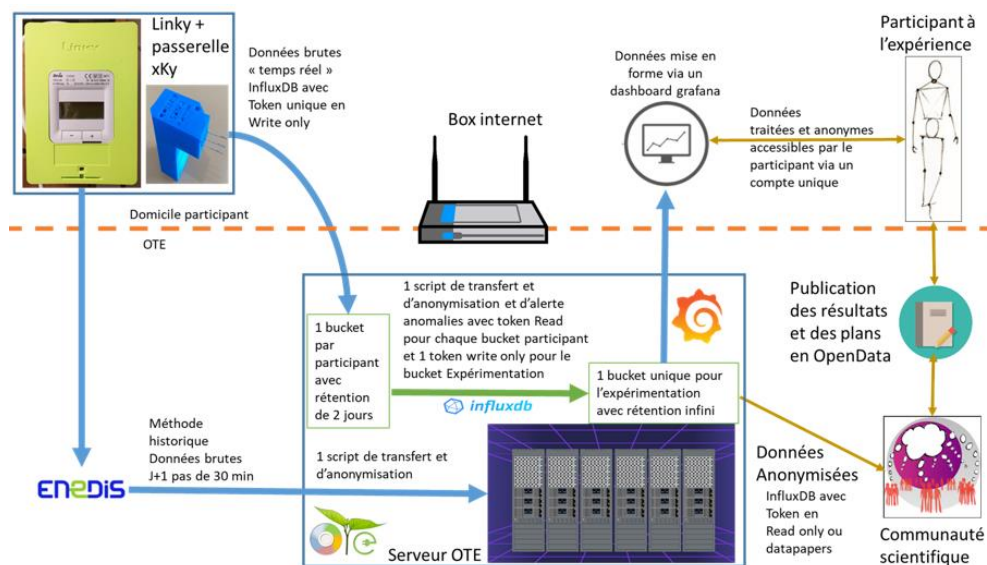


Figure 1 : Architecture technique du projet xKy

Par analogie avec les grands instruments de la recherche spatiale nous pourrions assimiler l'ensemble des outils utilisés par l'OTE à un télescope « socio-technique » qui permet de zoomer des grandes échelles (les OpenData) aux plus petits détails (projet xKy).

2.2.5. Vers un écosystème ouvert et complet pour les équipes de recherches

L'OTE dans un esprit de science ouverte met à disposition l'architecture juridico-technique illustrée par le schéma (Figure 2) suivant afin de permettre aux équipes de recherche travaillant sur des questions impliquant l'utilisation de données issues du compteur Linky de pouvoir se concentrer sur leur cœur de métier sans devoir essayer tous les écueils administratifs et technique. Nous pouvons rajouter que cette architecture est aussi accompagnée d'un volet social grâce à un ensemble d'environ 3000 personnes ayant déjà adhéré au panel de l'OTE et partantes pour des expérimentations autour des sujets de la

transition (voir le lien <https://ote.univ-grenoble-alpes.fr/adherez/> pour participer au panel de l'OTE).

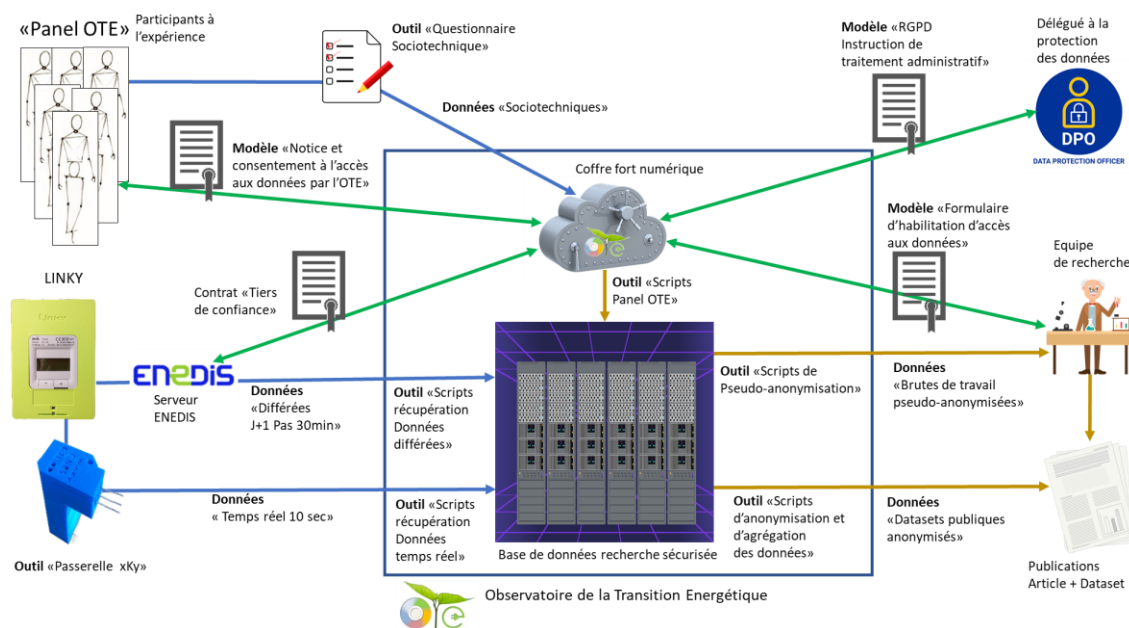


Figure 2 : Architecture juridico-technique de l'OTE

2.3. OUVRIR LA SCIENCE AU CITOYEN

2.3.1. Nécessité de créer un pont entre le citoyen et le monde de la recherche

A l'instar du projet « Derrière le blob, la recherche » d'Audrey Dussoutor (CNRS, 2022), le projet xKy cherche à créer un couple chercheurs/participants au travers du prisme de la science participative pour faire progresser les connaissances. Le projet xKy s'inspire de cette première expérience sur la démarche d'apporter une solution à objectif double qui servent à la fois les chercheurs et les participants. Pour l'expérience sur le Blob, il s'agissait pour les chercheurs de pouvoir reproduire à très grande échelle différents protocoles expérimentaux alors que pour les volontaires, il s'agissait de réaliser une expérience tout en apprenant la démarche scientifique, de la conception d'un protocole jusqu'à la publication des résultats. Pour le projet xKy, l'objectif pour les participants est de comprendre et de réduire leur dépense énergétique alors que pour les chercheurs, l'objectif est de trouver une méthode ou un dispositif pour rendre accessible les données de consommations fines.

2.3.2. Rendre le dispositif ouvert et transparent pour tous

Afin de rendre l'écosystème xKy accessible à toutes les personnes inscrites dans l'expérimentation (chercheurs, participants) mais aussi permettre aux personnes extérieures de pouvoir le reproduire, l'approche Open-Source a été retenue. Le choix d'une diffusion Open-Source (du dispositif jusqu'au traitement des données à l'exception des données à caractère personnel) apporte une transparence dans la mécanique utilisée permettant à tout moment aux participants de comprendre chaque partie du processus et de savoir où et comment sont utilisées leurs données. Le média de diffusion des plans, codes et algorithmes est le gitlab du Gricad de l'UGA (<https://gricad-gitlab.univ-grenoble-alpes.fr>).

En parallèle, la mise en place d'un outil de supervision collaboratif accessible à la fois par les équipes de recherche et les participants permet de vérifier le bon fonctionnement de l'expérimentation (OTE, 2023c) (Figure 3) ainsi qu'une interface de démonstration pour les futurs participants (Figure 4)

Depuis le début de l'expérimentation, 34 améliorations ont été apportées au dispositif via cette démarche collaborative (allant de l'auto-détection du type de contrat à l'intégration dans des systèmes domotiques préexistants). Ce travail collaboratif a aussi permis grâce aux différents niveaux de

compétences de chaque participant dans leur domaine de créer plusieurs tutoriels simplifiant la mise en place ou la mise en route du dispositif chez des participants novices. Cependant, un biais statique a été relevé sur l'étude xKy car 48% des participants sont issus de la catégorie socioprofessionnelle « Cadres et professions intellectuelles supérieures », ce qui est 3,5 fois plus important que le panel INSEE 2020.



Figure 3 : Partie simplifiée de la supervision de l'étude xKy

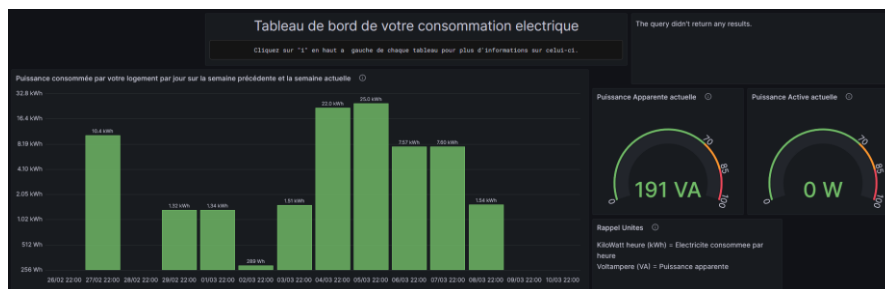


Figure 4 : Interface démonstration pour participants l'étude xKy

Pour finir, dans la future phase de l'expérimentation, le travail va s'orienter vers deux thématiques. La première consistera à la création d'une interface modulaire et auto-générée pour que chaque participant puisse personnaliser sa surveillance et comprendre sa consommation électrique de façon autonome et la seconde sera le montage d'un forum avec une mise en avant de la méthode de réunion TupperWatt afin de permettre aux personnes novices dans le domaine de la réduction d'énergie de pouvoir être accompagnées dans leurs démarches.

3. CONCLUSIONS

Dans cet article, nous montrons que la construction d'un écosystème complet permettant de récupérer les données des compteurs Linky avec une résolution multi-temporelle peut être reproductible et totalement transparente afin de servir dans diverses expérimentations. L'accent mis sur la simplification des méthodologies ainsi que dans la mise en place technique et automatique de la récupération des données permet à des entités de recherche non expertes dans le domaine de l'électricité de pouvoir mener à bien des expérimentations diverses et variées utilisant les données issues de celle-ci.

Pour l'avenir de ce dispositif, nous pouvons imaginer que des équipes issues des Sciences Humaines et Sociales puissent aller sur de nouvelles voies exploratoires liées au domaine de l'électricité de façon autonome. Couvrir la gamme complète de résolution temporelle de permet d'envisager une aide à la transition énergétique au travers d'intelligences artificielles entraînées avec une grande variété de données fines pour in fine être utilisées avec un flux de données moins consommatrice de ressources.

Ce travail a bénéficié d'une aide de l'Etat gérée par l'Agence Nationale de la Recherche au titre du programme « Investissements d'avenir » portant la référence ANR-15-IDEX-02 dans le cadre des projets eco-SESA et Observatoire de la Transition Energétique.

Le projet xKy est financé par Grenoble-INP SA et soutenu par l'UGA et le CNRS. Ce projet a obtenu le soutien financier du CNRS à travers les programmes interdisciplinaires de la MITI.

4. BIBLIOGRAPHIE

- CNIL. 2018. “Règlement Général de Protection des Données” <https://www.cnil.fr/fr/rgpd-de-quoi-parle-t-on>
- CNRS. 2022. “Le Blob et la démarche scientifique” <https://www.cnrs.fr/fr/cnrsinfo/le-blob-et-la-demarche-scientifique>
- Danieli. 2018. Aude Danieli. “La « mise en société » du compteur communicant : innovations, usages et controverses dans les mondes sociaux du compteur d’électricité Linky en France”. Sociologie. Université Paris-Est, 2018. Français. (NNT : 2018PESC0003). (tel-02614235)
- ENEDIS. 2022a. Consommation annuelle résidentielle par adresse <https://data.enedis.fr/explore/dataset/consommation-annuelle-residentielle-par-adresse/information/>
- ENEDIS. 2022b. Agrégats segmentés de consommation électrique <https://data.enedis.fr/explore/dataset/conso-sup36-region/information/>
- ENEDIS. 2022c. Bilan <https://data.enedis.fr/explore/dataset/bilan-electrique-demi-heure/information/>
- Ferrari. 2022. Winky <https://predis.g2elab.grenoble-inp.fr/smartbuilding/index.php/2022/02/04/winky-version-2-open-source-projet-pour-linky-avec-wifi/>
- Ferrari. 2023. Eky <https://predis.g2elab.grenoble-inp.fr/smartbuilding/index.php/2023/07/20/eky-projet-open-source-pour-linky-avec-ethernet/>
- Ferrari et al. 2021. Loky <https://predis.g2elab.grenoble-inp.fr/smartbuilding/index.php/2021/07/28/loky-open-source-projet-pour-linky/>
- Miniprojet. 2022. <https://miniprojets.net/index.php/2022/05/20/etat-de-lart-les-solutions-de-recuperation-des-teleinformations-sur-la-prise-tic-dun-linky/>
- OTE. 2023a. “Etudelec I, Etudelec II & Etudelec III: Etudes déployées par l’Observatoire de la Transition Energétique permettant la collecte des données Linky (pas de 30min avec délai de recueil de 24h à 48h)” https://ote.univ-grenoble-alpes.fr/wp-content/uploads/2024/02/PUB-etude_2024.pdf
- OTE. 2023b. “xKy: Etude déployée par l’Observatoire de la Transition portant sur les enjeux de l’OpenSource dans le domaine” <http://ote.univ-grenoble-alpes.fr/wp-content/uploads/2022/08/plaquette-4.pdf>
- OTE. 2023c. “xKy: Supervision expérimentation” <https://ote.univ-grenoble-alpes.fr/temps-reel-xky/>
- Osonuga et al. 2024. Seun Osonuga, Frederic Wurtz, Benoit Delinchant. Electric Vehicle Enquiry (EVE) Pilot: 3-year operational data from a single electric car. 2024. (hal-04488108)
- Révolution Energétique. 2023. Lara.H <https://www.revolution-energetique.com/cet-appareil-gratuit-a-brancher-sur-votre-compteur-linky-va-aider-la-science/>
- RTE. 2023a. “RTE eco2mix” <https://www.rte-france.com/eco2mix>
- RTE. 2023b. <https://assets.rte-france.com/prod/public/2023-06/2023-06-07-rapport-ipsos-changement-transition-energetique.pdf>
- RTE. 2023c. <https://www.rte-france.com/synthese-hebdomadaire-consommation-electrique-francaise>
- Shahid et al. 2020. Muhammad Salman Shahid, Benoit Delinchant, Wurtz Frederic, Daniel Llerena, Béatrice Roussillon. Designing and Experimenting Nudge Signals to Act on the Energy Signature of Households and Optimizing Building Network Interaction. IBPSA France 2020, Nov 2020, Reims, France. (hal-03352474)

dm4bem : Modèles dynamiques pour le développement des algorithmes de contrôle-commande

Christian Ghiaus *¹

¹ CETHIL UMR5008, INSA Lyon
9 rue de la physique, 69621 Villeurbanne, France
* christian.ghiaus@insa-lyon.fr

RESUME. La représentation dans l'espace d'état est une forme standard largement utilisée dans la synthèse et l'analyse des systèmes dynamiques, avec des applications notamment en automatique. Cependant, les outils de simulation existants ne permettent souvent pas d'obtenir cette représentation. Dynamic Models for Building Energy Management (dm4bem) est un module écrit en Python qui propose une méthodologie novatrice pour modéliser les transferts de chaleur et de masse à l'aide de graphes orientés, également appelés circuits (ou réseaux) thermiques. Cette approche permet d'assembler ces circuits pour obtenir des modèles complexes à partir des éléments constitutifs, puis de les transformer en représentation d'état. Cette représentation offre plusieurs avantages, notamment la possibilité d'analyser les valeurs propres de la matrice de transfert, d'effectuer une intégration numérique pour la simulation, ainsi que d'analyser et de synthétiser des algorithmes de contrôle-commande. De plus, l'inclusion des modèles non-linéaires est possible grâce à une linéarisation à chaque pas de temps. Cette procédure est présentée dans un livre interactif où le code peut être testé en ligne : https://cghiaus.github.io/dm4bem_book

MOTS-CLÉS : circuit thermique, simulation, représentation d'état

ABSTRACT. State-space representation is widely used in synthesis and analysis of dynamic systems, with applications particularly in control engineering. However, existing simulation tools often do not provide the state-space representation. Dynamic Models for Building Energy Management (dm4bem) is a Python module that implements an innovative methodology for modelling heat and mass transfer using weighted directed graphs, also known as thermal circuits or networks. The methodology allows assembling the circuits to obtain complex models from constituent elements, and then transforming them into state-space representation. This representation provides several advantages, including the ability to analyse the eigenvalues of the transfer matrix, perform numerical integration for simulation, and synthesize control algorithms. Furthermore, nonlinear models can be dealt with through linearization at each time step. This procedure is presented in the form of an interactive book in which the code can be tested online: https://cghiaus.github.io/dm4bem_book

KEYWORDS : thermal network, simulation, state-space representation

1. INTRODUCTION

La gestion énergétique des bâtiments peut contribuer d'une manière significative à l'optimisation de la consommation des bâtiments (Van Thillo, Verbeke, & Audenaert, 2022). Dans ce contexte, la modélisation et la simulation des transferts de chaleur et de masse jouent un rôle crucial pour comprendre et optimiser les performances énergétiques des bâtiments. Traditionnellement, les logiciels de simulation thermique dynamique des bâtiments, tels que TRNSYS (Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin-Madison, 2006), EnergyPlus (University of Illinois and Lawrence Berkeley National Laboratory, 2022), COMFIE & PLEIADES (IZUBA Energies, 2024) ou KoZiBu (Noël, 2024),

se basent sur la résolution itérative des équations de bilan pour coupler les modèles des différents éléments constitutifs. Cette approche ne permet pas d'obtenir une représentation d'état des systèmes, ce qui limite l'analyse et la synthèse des systèmes de contrôle-commande. La plateforme SIMBAD 6.0, écrite en MATLAB / Simulink et C++, utilise une représentation d'état et un assemblage graphique des composants pour modéliser un système (Ansanay-Alex, 2010). Une autre caractéristique des logiciels actuels est qu'ils utilisent une interface graphique, ce qui rend difficile la reproductibilité des étapes de la modélisation. Finalement, les solutions mentionnées ci-dessus utilisent des composants logiciels propriétaires.

La méthode et le module Python dm4bem proposent une approche novatrice pour la modélisation des transferts de chaleur et de masse dans les bâtiments. Contrairement aux méthodes traditionnelles de couplage, dans dm4bem les modèles thermiques sont obtenus par assemblage. Cette approche présente l'avantage de fournir un seul modèle au lieu de plusieurs modèles séparés couplés. De plus, les circuits thermiques sont transformés en représentation d'état, ce qui ouvre de nouvelles perspectives pour l'analyse et la synthèse des systèmes de contrôle-commande dans le domaine de la gestion énergétique des bâtiments. Enfin, le module, écrit en Python, est sous licence libre.

2. CARACTERISTIQUES DE LA METHODE DM4BEM

La modélisation en dm4bem utilise des réseaux thermiques (ou circuits thermiques) qui sont des graphes orientés pondérés (Figure 1) dans lesquels :

- les nœuds (ou sommets) représentent des températures homogènes, θ , de points géométriques (0D), de lignes (1D), de surfaces (2D) ou de volumes (3D) ;
- les liens orientés (ou arêtes) représentent les flux de chaleur, q , entre les nœuds de température.

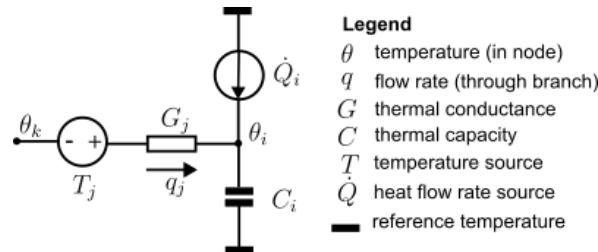


Figure 1 Circuit (ou réseau) thermique de base. (source : https://cghiaus.github.io/dm4bem_book)

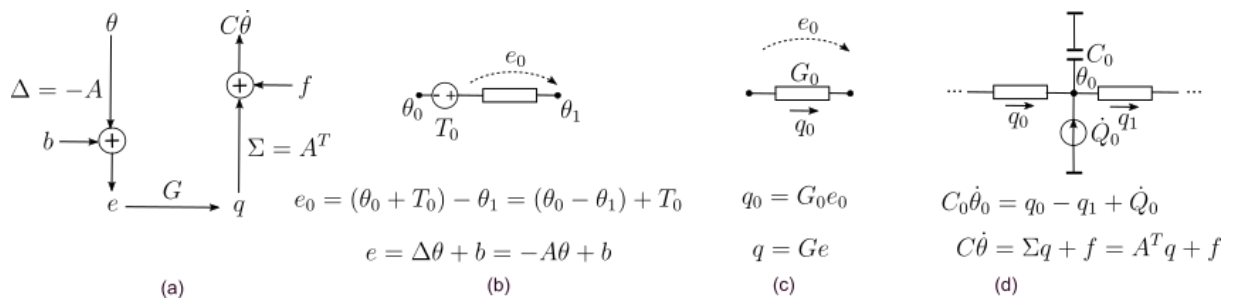


Figure 2 Obtenir le système d'équations différentielles-algébriques à partir d'un réseau thermique :
a) Cadre général. b) Différences de température. c) Flux de chaleur. d) Bilan énergétique.

(source : https://cghiaus.github.io/dm4bem_book)

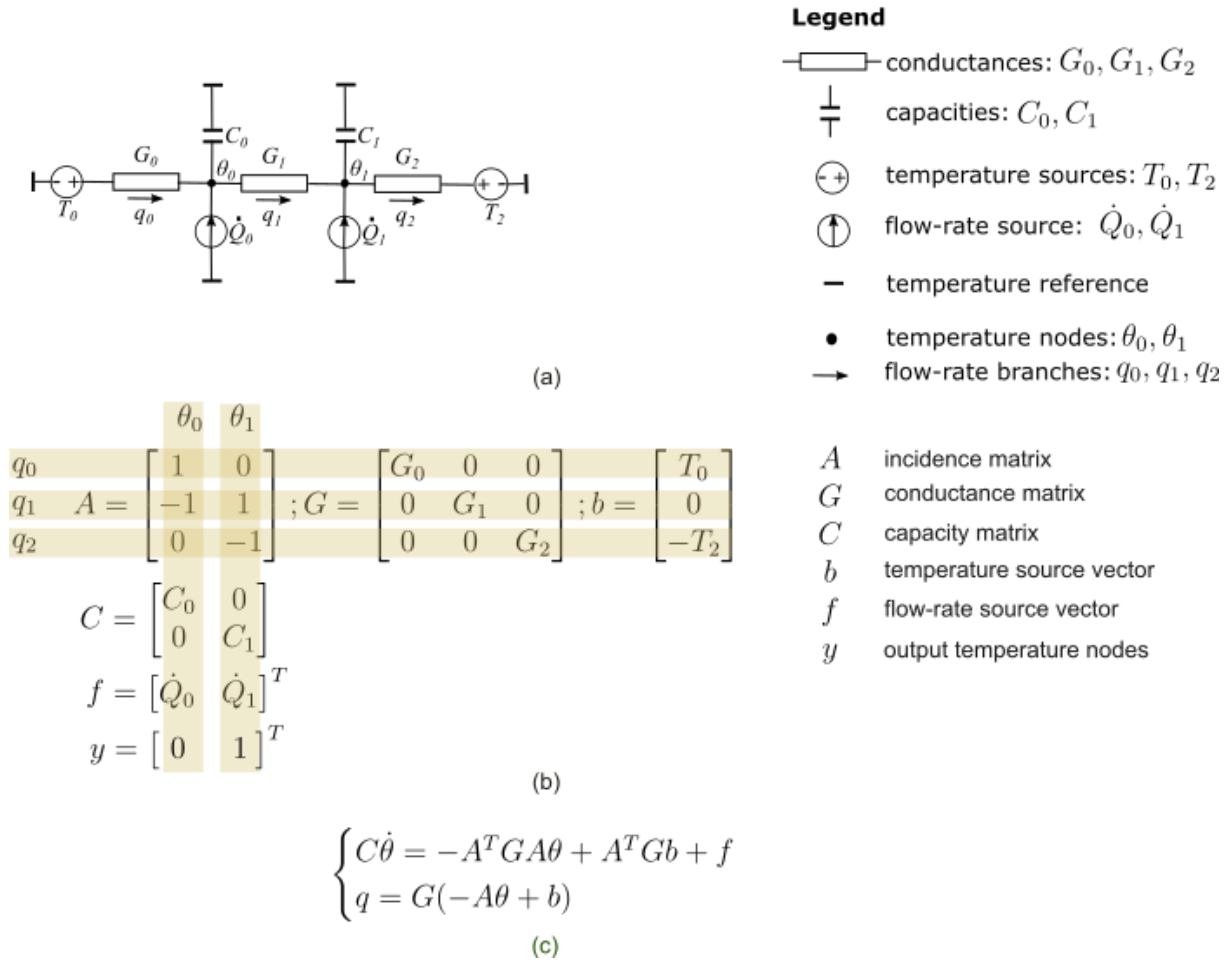


Figure 3 Exemple de système d'équations différentielles-algébriques pour un réseau thermique :
 a) Réseau thermique. b) Matrices et vecteurs. c) Système d'équations différentielles-algébriques.
 (source : https://cghiaus.github.io/dm4bem_book)

Les circuits thermiques sont une représentation visuelle des lois constitutives et des bilans d'énergie, respectivement (Figure 2 c et d). Les modèles mathématiques sous forme d'équations différentielles-algébriques sont obtenus à partir des circuits thermiques en utilisant la méthodologie présentée dans la Figure 2 a. Un exemple est donné dans la Figure 3.

2.1. STRUCTURE DES DONNEES

2.1.1. Circuit thermique

La méthode dm4bem propose une structure de données spécifique : le circuit thermique (TC). Il s'agit d'un dictionnaire composé de (Figure 3 b) :

- A : matrice d'incidence branche – nœud (ou flux – température) ;
- G : vecteur représentant la diagonale de la matrice des conductances ;
- C : vecteur représentant la diagonale de la matrice des capacités ;
- b : vecteur contenant les noms des sources de température sur les arrêts ;
- f : vecteur contenant les noms des sources de flux dans les nœuds ;

- y : vecteur indiquant les nœuds de température considérés comme sorties.

Ces vecteurs et matrices permettent d'écrire un système d'équations différentielles-algébriques (Figure 2 et Figure 3) :

$$C\dot{\theta} = -A^T G A \theta + A^T G b + f \quad (1)$$

Une fois que le système d'équations différentielles-algébriques a été résolu pour les températures, on détermine les flux :

$$q = G(-A\theta + b) \quad (2)$$

Les circuits thermiques peuvent être construits en Python ou spécifiés dans un fichier .csv.

2.1.2. Représentation d'état

La représentation d'état est obtenue en éliminant les équations algébriques des circuits thermiques, c'est-à-dire en ne considérant que les nœuds avec des capacités (voir section 3.2). Elle contient :

- A matrice d'état
- B matrice de commande
- C matrice d'observation
- D matrice d'action directe
- u tableau de correspondance entre les arrêts & nœuds ayant des sources et leurs noms, c. à d. la liste des éléments non nuls des vecteurs b & f , ainsi que leur position respective dans ces vecteurs.

2.1.3. Description des parois et du bâtiment

Pour les modèles thermiques des bâtiments, la paroi représente un cas très fréquent de circuit thermique. La description des parois est donnée dans un dossier qui contient deux types de fichiers :

- types de parois : propriétés thermo-physiques des matériaux ;
- données des parois : superficie, sources de température et de flux, les coefficients de convection et de rayonnement des surfaces.

A partir de ces fichiers, on obtient le circuit thermique d'une paroi (les matrices et les vecteurs A , G , C , b , f , y).

Un bâtiment peut être décrit dans un dossier contenant :

- les parois (type de parois et données des parois) ,notés $ow0$ dans la Figure 4 ;
- les circuits thermiques, notés $TC1$, $TC2$, $TC3$ dans la Figure 4 ;
- la matrice ou la liste d'assemblage qui indique les nœuds qui fusionnent (reliés par des traits pointillés dans la Figure 4).

3. ALGORITHMES

Dans dm4bem, il y a deux algorithmes significatifs : l'assemblage des circuits thermiques et la conversion des circuits thermiques en représentation d'état.

3.1. ASSEMBLAGE

Un ensemble de circuits thermiques désassemblés est assemblé en un seul circuit thermique (Figure 4). L'assemblage peut être réalisé en utilisant une matrice d'assemblage ou des listes d'assemblage. La matrice d'assemblage indique deux nœuds à fusionner. Par exemple, dans la Figure 4, le nœud 0 du circuit c2 (en violet) fusionne avec le nœud 5 du circuit ow0 (le 2e nœud n'existera plus après la fusion). La liste d'assemblage indique le nœud qui reste, par exemple le nœud 0 du circuit c2, et une liste des nœuds qui fusionnent, par exemple le nœud 5 du circuit ow0 et le nœud 2 du circuit c1.

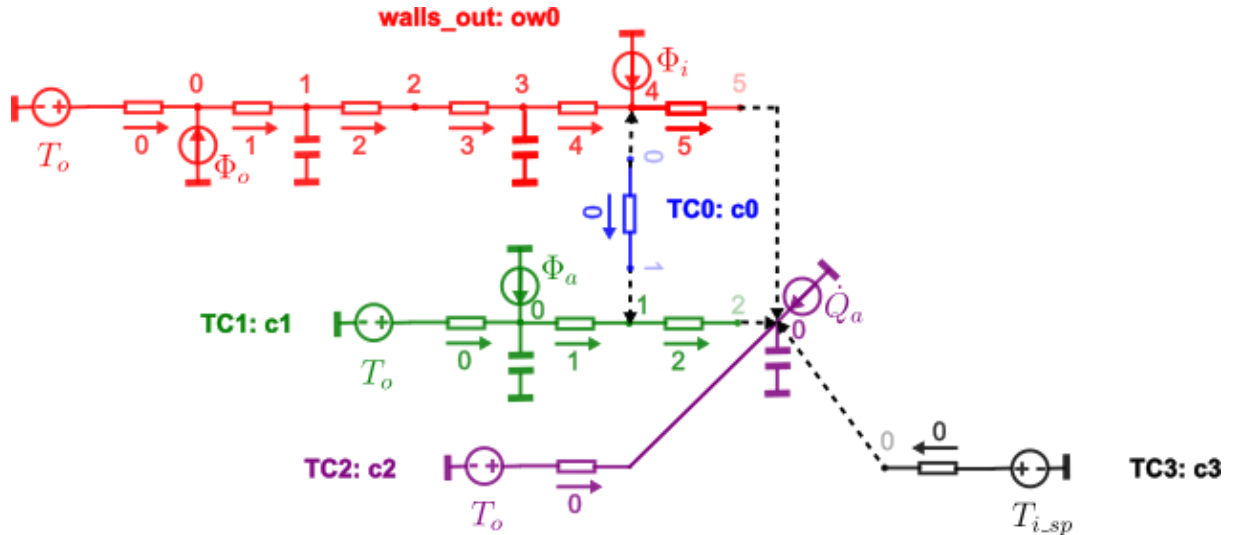


Figure 4 Assemblage de quatre circuits. (source : https://cghiaus.github.io/dm4bem_book)

3.2. TRANSFORMATION DU CIRCUIT THERMIQUE EN REPRESENTATION D'ETAT

En éliminant les équations algébriques, le système d'équations différentielles-algébriques peut être transformé en représentation d'état (Ghiaus, 2013).

4. PROCEDURE DE TRAVAIL

Le flux de travail est le suivant :

Modélisation : obtenir le circuit thermique et la représentation d'état.

- Dessiner le réseau thermique en fonction de la description du bâtiment et des hypothèses de modélisation.
- Calculer les paramètres du réseau thermique : conductances et capacités.
- Écrire les matrices et les vecteurs (A, G, C, b, f, y) des équations différentielles-algébriques.
- Créer le circuit thermique et le convertir en représentation d'état (matrices A, B, C, D et vecteur d'entrée u).

Tests en régime permanent et réponse à l'échelon : vérifier si le modèle est incorrect (falsifiabilité). Si le modèle échoue à ces tests, alors il est incorrect ; s'il passe ces tests, cela ne signifie pas qu'il est correct.

- Comparer et interpréter les résultats en régime permanent obtenus pour le circuit thermique et la représentation d'état.

- Effectuer une analyse des valeurs propres de la matrice d'état et analyser le pas de temps maximum (pour l'intégration numérique avec la méthode d'Euler explicite) et le temps d'atteinte du régime permanent. Si le pas de temps maximum est :
 - trop petit : mettre à zéro les capacités qui, avec les conductances (ou les résistances) associées, produisent le petit pas de temps (par exemple, l'air de la zone thermique, les fenêtres, les portes) ;
 - trop grand : envisager la discrétisation des éléments qui ont de grosses capacités thermiques (par exemple, les murs, le sol).
- Simuler la réponse dans le temps (en utilisant la méthode d'Euler explicite ou/et implicite) à différentes entrées échelon.
- Comparer le temps d'atteinte du régime permanent obtenu à partir de la simulation de la réponse indicielle avec celui obtenu par l'analyse des valeurs propres.
- Comparer la valeur en régime permanent obtenue par la réponse indicielle et par les modèles (circuit thermique et représentation espace-état) en régime stationnaire.

Entrées : préparer l'ensemble de données d'entrée, c'est-à-dire la variation temporelle des conditions météorologiques et des sources programmées de température et de flux.

- Lire les données météorologiques (température extérieure, irradiance solaire directe et diffuse).
- Calculer l'irradiance solaire sur les surfaces extérieures et intérieures des murs.
- Définir les horaires pour les sources de température (par exemple, le point de consigne de température intérieure) et les sources de flux (par exemple, les gains internes).
- Obtenir l'ensemble de données d'entrée.

Simulation : intégrer dans le temps le modèle pour les entrées données.

- Transformer l'ensemble de données d'entrée en vecteur d'entrée (dans le temps) pour la représentation d'état.
- Définir les conditions initiales.
- Intégrer les variables d'état dans le temps (par exemple, en utilisant la méthode d'Euler explicite et/ou implicite).
- Calculer les sorties à partir des variables d'état.
- Tracer les résultats.

5. CONCLUSIONS

La méthode *Dynamic Models for Building Energy Management* (dm4bem) offre une approche efficace pour obtenir des modèles thermiques en assemblant différents modèles. Les principales contributions de la méthode résident dans :

- La définition d'une structure de données décrivant les circuits thermiques sous forme de graphes orientés avec des arcs pondérés, décrits par les matrices et les vecteurs A, G, C, b, f, y .
- La prise en compte, dans la représentation d'état A_s, B_s, C_s, D_s, u_s , de la table de correspondance u_s entre les éléments non nuls des vecteurs b et f et les noms des sources de température et de flux, respectivement.
- L'assemblage des circuits thermiques par fusion des sommets (nœuds de température) et la transformation conséquente des matrices et vecteurs A, G, C, b, f, y .
- La transformation du circuit thermique (graphe orienté) en représentation d'état.
- La procédure de génération de circuits thermiques pour les parois (génériques, extérieures et intérieures).
- La structure du dossier permettant de caractériser un bâtiment à partir de la description des parois, des circuits thermiques et de la matrice de connexion, ainsi que la procédure de création du circuit thermique.
- L'implémentation de ces concepts en Python et la présentation de tutoriels dans un livre Jupyter en accès libre : https://cghiaus.github.io/dm4bem_book.

En transformant les circuits thermiques en représentations d'état, cette méthode permet leur utilisation dans l'analyse et la synthèse des algorithmes de contrôle-commande. L'analyse des valeurs propres de la matrice d'état fournit des informations importantes sur le pas de temps d'intégration et le temps de réponse, ainsi que sur le bon choix dans la discrétisation spatiale. En intégrant des non-linéarités dans la boucle d'intégration temporelle, il est possible de modéliser des paramètres variables et/ou des algorithmes de contrôle-commande non linéaires. *dm4bem* utilise des commandes et des descriptions des modèles sous forme de texte, ce qui facilite la reproductibilité.

Le principal inconvénient actuel est que le bâtiment n'est pas décrit à l'aide d'outils de CAO (Conception Assistée par Ordinateur), ce qui permettrait les calculs automatiques de l'éclairage. Cela représente une voie de développement. Une autre amélioration consisterait à utiliser des matrices creuses pour réduire la mémoire utilisée.

6. BIBLIOGRAPHIE

- Ansanay-Alex, G. (2010). An object-oriented architecture and simulation platform towards faster and portable SIMBAD simulations. *SSB2010 8th International Conference on System Simulation in Buildings*. Liège, Belgium.
- Ghiaus, C. (2013). Causality issue in the heat balance method for calculating the design heating and cooling load. *Energy*, 292-301.
- IZUBA Energies. (2024). Récupéré sur izuba.fr
- Noël, J. (2024). Récupéré sur jnlog.com
- Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin-Madison. (2006). *TRNSYS 16: Volume 5 Mathematical Reference*. Madison.
- University of Illinois and Lawrence Berkeley National Laboratory. (2022). *EnergyPlus Engineering Reference*. U.S. Department of Energy.
- Van Thillo, L., Verbeke, S., & Audenaert, A. (2022). The potential of building automation and control systems to lower the energy demand in residential buildings: A review of their performance and influencing parameters. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 112099.

Holistic and forward-looking methodology for multi-criteria optimization of building energy renovation

Thibault Goessel^{*1,2}, Simon Ligier¹, Adélaïde Aublet-Mailhac¹, Robin Girard²

¹ Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB)
84 Avenue Jean Jaurès, 77420 Champs-sur-Marne, France,
*thibault.goessel@cstb.fr

² Mines Paris – PSL, Centre Procédés, Energies Renouvelables et Systèmes Energétiques (PERSEE)

1 rue Claude Daunesse, 06904 Sophia-Antipolis, France

RESUME. Cette étude présente une approche novatrice d'optimisation multicritère des stratégies de rénovation, intégrant le confort thermique dans les évaluations économiques et environnementales. Grâce à des séries climatiques prospectives, les besoins de refroidissement et les gestes de rénovation associés sont particulièrement étudiés. L'analyse des fronts de Pareto sur l'étude de cas d'une maison individuelle révèle des compromis entre confort thermique, empreinte carbone et coût global. Elle met en lumière, pour ce cas particulier, la nécessité de rénover en même temps le système de chauffage et d'isoler les murs, tandis que la climatisation et le passage à une ventilation double flux sont facultatifs. L'intégration d'une année-type climatique future, sans canicule, aggrave l'inconfort thermique des stratégies de rénovation mais ne modifie pas le choix des stratégies optimales. Cette étude initiale sera prochainement complétée par l'ajout de nouvelles stratégies de rénovation, de facteurs d'émissions prospectifs ainsi que de séquences climatiques caniculaires.

MOTS-CLÉS : Rénovation, Optimisation multi-critères, Prospective

ABSTRACT. This study presents an innovative approach to multi-criteria optimization of renovation strategies, integrating thermal comfort into economic and environmental assessments. Thanks to prospective climate series, cooling needs and associated renovation actions are particularly studied. The analyses of the Pareto fronts on the case study of a single-family home reveal trade-offs between thermal comfort, carbon footprint and total cost. It highlights, in this case, the need to renovate the heating system and insulate the walls at the same time, while air conditioning and the switch to double flow ventilation are optional. The inclusion of a future climate model year, without a heat wave, aggravates the thermal discomfort of renovation strategies but does not change the choice of optimal strategies. This initial study will soon be supplemented by the addition of new renovation strategies, forward-looking emission factors and heat wave weather sequences.

KEYWORDS : Renovation, Multi-Criteria Optimization, Foresight

1. INTRODUCTION

In France, the building sector represents about 150 MtCO₂eq in life cycle, or 25% of the carbon footprint, and a third of greenhouse gas (GHG) emissions are due to construction products and equipment (Pellan et al. 2022). Given the decarbonization targets of the National Low Carbon Strategy (SNBC), the objective is to reduce emissions to 96 MtCO₂eq in 2030 and 16 MtCO₂eq in 2050 (« Réglementation environnementale RE2020 » 2020). The massification of the renovation of the building stock is obviously one of the major levers for achieving these objectives. Indeed, the various carbon neutrality scenarios set the target of 600,000 to 1 million efficient renovations in 2030, well

beyond what has been observed so far (ADEME 2022a). But to reduce the sector's life-cycle impacts, it is necessary to guard against the transfer of impacts between energy-related emissions and emissions related to building components. This is how LCA (Life Cycle Assessment) has been developed in the building sector, initially on new construction ((Polster et al. 1996; Kohler 1986) and then more recently for renovation (Vilches, Garcia-Martinez, and Sanchez-Montañes 2017).

In addition to these challenges of mitigating climate change, renovation must also meet the challenges of adaptation. With rising temperatures (IPCC 2023), the integration of summer comfort into the design and implementation of renovations is also essential. First studies underline that optimal renovations considering environmental and economic impacts may not be the best regarding the thermal comfort (Galimshina et al. 2021); (Mostavi, Asadi, et Boussaa 2017). Recently, thermal comfort has been integrated into the multi-criteria optimization of renovation strategies, but this is still in development (Mostafazadeh, Eirdmoussa, et Tavakolan 2023; Amini Toosi et al. 2020) ; (Mostavi, Asadi, et Boussaa 2017). However, thermal comfort is mainly studied through the measurement of thermal discomfort, which does not focus on health risk. The NF EN ISO 11399 standard recalls the difference between these two concepts.

This paper studies the selection of optimal renovation strategies according to 3 complementary criteria, following a Life Cycle Sustainability Assessment (LCSA) methodology. Particular attention is paid to the evolution of the need for cooling and thermal comfort, in a logic of global warming. This is why a cooling-related renovation gesture is proposed in the study.

2. METHODOLOGY

The methodology presented here aims to evaluate and identify optimized renovation solutions that can be applied to an existing building. It deals with three major issues involved in the life cycle of a renovated building: the carbon footprint of the renovation, the summer thermal comfort for the occupants and the overall cost associated with the renovation. The solutions studied concern changes to the thermal envelope and/or HVAC systems, without staggering over time. These 3 main subjects are detailed below.

2.1. LIFE CYCLE ASSESSMENT: THE CARBON FOOTPRINT

The choice of the LCA methodology specific to building renovation was made following the census work carried out by (CEREMA 2023) and is described precisely by (ADEME 2022b) This method only considers future impacts in the life cycle of the renovated building, with different assumptions depending on the type of component. A methodology similar to new buildings (« Réglementation environnementale RE2020 » 2020) is applied for new components, while only end-of-life impacts are taken into account for registered components. Regarding the preserved components, the impacts considered are the life in operation (depending on the remaining life in the renovated building), the end of life as well as the renewal during the reference study period. A reference study period of 50 years is chosen, in line with the RE2020 and reviews in the literature (Amini Toosi et al. 2020)

To quantify energy consumption, the use of a dynamic energy simulation is necessary. It aims at assessing the energy consumption by item (heating, domestic hot water, air conditioning, lighting, ventilation, and auxiliaries, etc.) and by energy vector (gas, electricity, wood, heating network, etc.). The Cometh-SED model is retained in this methodology (Silva et al. 2016).

The environmental data comes from the French INIES database (Inies, s. d.) which is a reference in the building sector. Whenever it is possible, collective data is preferred, followed by individual data and finally environmental data by default. The GWP100 midpoint indicator (kgCO₂eq) is used to calculate the carbon footprint. It is then reduced to the living area and to the year, to be in kgCO₂eq/m²/year. The carbon footprint is the only indicator currently evaluated in our LCA, as it is the most studied (Amini Toosi et al. 2020).

2.2. THERMAL COMFORT EVALUATION AND WEATHER CONDITIONS

Summer thermal comfort is assessed by studying the building's ability to limit overheating in the living rooms. In the methodology presented here, we focus on the study of thermal comfort in moderate thermal environments, in accordance with NF EN ISO 11399. The approach consists of measuring Degrees-Hours (DH, in °C.h) over a year of simulation, i.e. quantifying the duration and intensity of temperature thresholds exceeded. We establish a threshold based on operating temperature, which depends on adaptive comfort (Dear and Brager 1998) and is applied in the regulations for new construction (« Réglementation environnementale RE2020 » 2020).

Two climate series are used in this study, using the EURO-CORDEX database (Moss et al. 2010). The first is a typical year based on observations between 1981 and 2019, while the second is a forward-looking climate year over the period 2020-2058. This forecast is obtained by combining a Global Climate Model (GCM) with a Regional Climate Model (RCM), considering a Representative Concentration Pathway (RCP) of 8.5, i.e. the pessimistic global warming scenario that can be considered as "business as usual" (Gobiet, Jacob, and Community 2012). Beforehand, depending on the location of the building studied, a bias-correction procedure (Kraiem, Alessandrini, and Rey 2020) was used by employing ERA5 observed data over the same period (1981-2019), followed by a Hermite cubic interpolation from 3 hours to 1 hour.

2.3. LIFE CYCLE COST: TOTAL COST

The life cycle cost analysis is used to estimate the total cost of the renovation. The objective is to evaluate the overall cost that accounts for the different costs operating over the life cycle of the renovated building (Elbeze 2018) As it stands, the total cost is calculated as the sum of the initial investment cost and the operating cost related to energy consumption. A discount rate of 3.2%, is considered as it is the reference rate for public investment set by (France Stratégie 2021). The initial investment cost is calculated using the Batiprix database (Batiprix 2024) which references the cost estimates for construction materials and the workforce in the building sector, for new construction or renovation. The data from 2022 were used.

The operating cost corresponds to the cost of the final energy consumed by the occupant over the reference study period (in this case 50 years). A forward-looking economic assessment is carried out here by integrating future modelling of annual energy prices. The reference values were taken in 2023 with the values issued by the SDES (SDES 2023) Then, an annual growth rate is applied based on the values established as part of the National Low Carbon Strategy in France (DGEC 2023). Since the modelling stops in 2050, we assume that prices remain constant between 2050 and 2073. Figure 1 shows the evolution of the price of the main energy sources, in constant 2023 euros. In this study, the evolution of energy prices is fixed and does not depend on the climate series chosen.

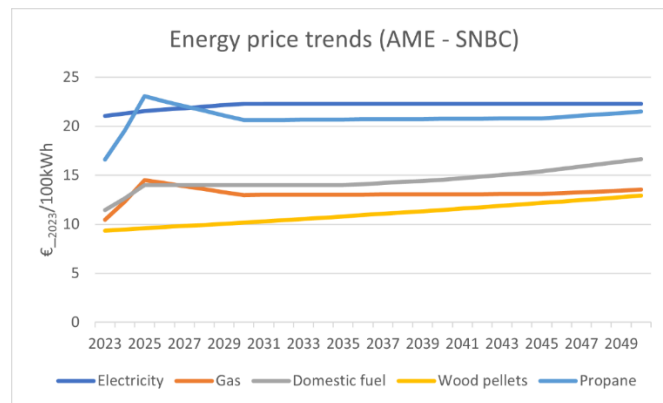


Figure 1 : Energy price trends according to the SNBC (AME scenario)

2.4. RENOVATION ACTIONS

A database has been assembled gathering representative building retrofit individual actions on the main renovation items: the insulation of walls, roof, and floor, the replacement of windows, the replacement of heating, ventilation, air conditioning and DHW (Domestic Hot Water) production systems. Each of the referenced renovation actions is associated with technical and physical characteristics, environmental data, and costs. The database makes it possible to compile packages of work that constitute the experimental design of the approach to evaluate and identify optimized solutions. Every renovation action is then linked to a dynamic model of the building's materiality, following a decomposition established by (Mailhac 2019), so that every adding and removal of components can be materialized.

2.5. SELECTION OF OPTIMAL RENOVATION STRATEGIES

An experimental design is then drawn up to evaluate different renovation strategies, depending on the building's technical constraints. To evaluate optimal solutions, we study the Pareto dominance relationship, which is the most famous and widespread approach (Deb 2001). Namely, solution x^* dominates solution x in the decision space if and only if:

$$\begin{cases} \forall i \in [1 \dots N], f_i(x^*) \leq f_i(x) \\ \exists k \in [1 \dots N], f_k(x^*) < f_k(x) \end{cases} \quad (1)$$

Pareto dominance is thus measured based on the 3 indicators selected: the carbon footprint, the total cost, and the degree-hours of thermal discomfort.

3. CASE STUDY

The methodology is applied on the retrofit project of a single-family residential building. The case study is described in the Table 1.

Case study	
Usage	Individual housing
Typology	T4, wall in solid concrete block
Year of construction	1975-1985
Department	33
Climatic zone	H2c
Ground floor area (m ²)	95
Number of storeys	0

Wall	25cm, no insulation
Roof	Attic Floor, 8cm glass wool ($U=0.485 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$)
Windows	Single-glazed windows in wood ($U_w=4.7 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$)
Ventilation	Self-adjusting mechanical ventilation ($P=50\text{W}$, $f=1.1\text{m}^3/\text{h}$)
Heating	Electric radiators ($P=1.2 \text{ kW}$)
Cooling	None
Domestic Hot Water	Individual electric hot water tank
Primary Energy Coefficient ($\text{kWh/m}^2/\text{year}$)	676.1

Table 1 : Case study

Each renovation strategy is composed by a set of renovation actions detailed in Table 2. 840 renovation strategies have then been evaluated, for all possible combinations.

Id	Heating (H)	Cooling (C)	Ventilation (V)	Wall (Wa)	Roof (R)	Windows (Wi)
1	Air/air heat pump ($P=8 \text{ kW}$, $SCOP=3.9$)	Air/air heat pump ($P = 3 \text{ kW}$, $SEER = 8.24$)	Dual-flow ventilation ($P = 26.5 \text{ kW}$)	II (Internal Insulation) : wood fiber ($U = 0.38 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$)	II : biobased ($U = 0.1 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$)	Double-glazed windows in PVC ($U_w = 1.4 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$)
2	Pellet stove heater ($P = 25\text{kW}$)			II: glass wool ($U = 0.27 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$)	II : rock wool ($U = 0.11 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$)	
3	Gas boiler ($P = 24 \text{ kW}$)			EI (External Insulation) : wood fiber ($U = 0.35 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$)		
4	Wood boiler ($P= 27\text{kW}$)			EI: glass wool ($U=0.44 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$)		
5				EI: wood fiber ($U = 0.16 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$)		
6				EI: glass wool ($U = 0.16 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$)		

Table 2 : Renovation gestures selected for the case study

Following the methodology described in Part 2, 2 climatic series adapted to Bordeaux are used. The first (*historic climate*) corresponds to a typical year following observations made in the city of Bordeaux between 1981 and 2019. The second (*future climate*) corresponds to a typical year between 2020 and 2058, combining the CNRS/CNRM Global Climate Model (CERFACS-CM5) and the Regional Climate Model of ETH (COSMO-CLM2). For example, the outdoor dry air temperature increases by an average of 0.9°C between the 2 series, and the maximum temperature increases by 1.6°C .

4. RESULTS AND DISCUSSION

4.1. HISTORIC CLIMATE

On the one hand, we analyze the Pareto fronts and the impacts for the historic climate series. Figure 2 synthesizes several messages. Range values for the 3 indicators are quite important and enable to classify renovation strategies. Among all the renovation strategies evaluated, 12 are on the 3D Pareto front, with 4 strategies being on the Cost/Carbon Pareto front. The whole set of 3D optimal strategies retrofit the heating system (wood boiler H4) and the wall (external biobased insulation Wa3), while half shifts to a dual-flow ventilation (V1). A quarter installs an air/air heat pump for cooling purposes. The existing building, because of a high and costly energy consumption (26 kgCO₂/m²/year, 35€/m²/year and 451°C.h), is one of the worst possible strategies.

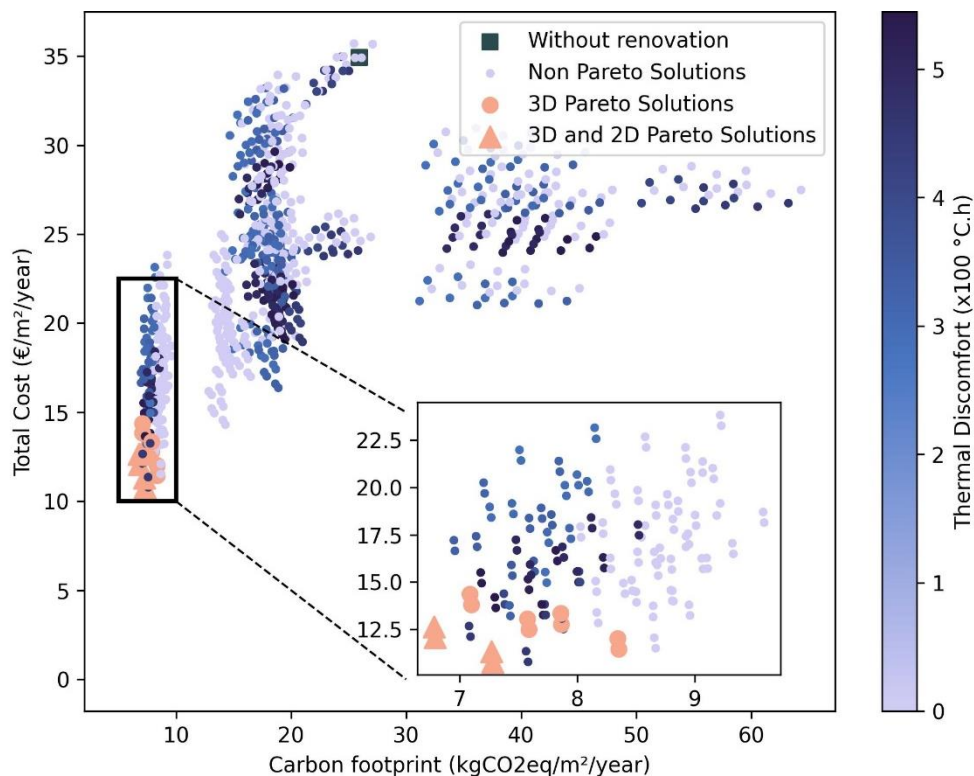


Figure 2 : Impacts of renovation strategies (historic climate).

4.2. INFLUENCE OF THE CLIMATE SERIES

On the other hand, we analyze the influence of the climate series on the 3 indicators. *Figure 3* focuses on thermal discomfort and carbon footprint while *Figure 4* compares thermal discomfort and total cost.

First, these two figures enable to easily classify renovation strategies according to the induced thermal discomfort. If we consider the historic climate series, 4 groups can be made : 1/ installation of air conditioning (C1; DH = 0 °C.h), 2/ external insulation of the walls (Wa3,4,5,6; DH between 250 and 350 °C.h), 3/ no insulation of the walls (DH between 400 and 450 °C.h) and 4/ internal insulation of the walls (Wa1,2; DH between 480 and 550 °C.h).

Secondly, the comparison between historic and future climate series impacts results in different ways. Because of the average global warming, the thermal discomfort is increased when considering the future

climate : +100 to 200°C.h for the group 2 and +200 to 300 °C.h for groups 3 and 4. Total cost and carbon footprint, however, are only slightly modified. This can be explained by the assumptions made in the modelling. The future typical year only represents a trend increase in temperature and does not consider the frequency and intensity of any future heatwaves. This results in a reduction in heating requirements and a slight increase in cooling requirements, while average thermal discomfort, measured over the year, increases. The overall cost, as defined in 2.3, already considers prospective evolutions so it is not directly influenced by the choice of the climate series. Finally, out of the 12 optimal renovation strategies in a historic climate, 11 constitute the set of optimal renovations in a future climate. The renovation H4-C1-V1-Wa3-R1 is the strategy that is only optimal in a historic climate.

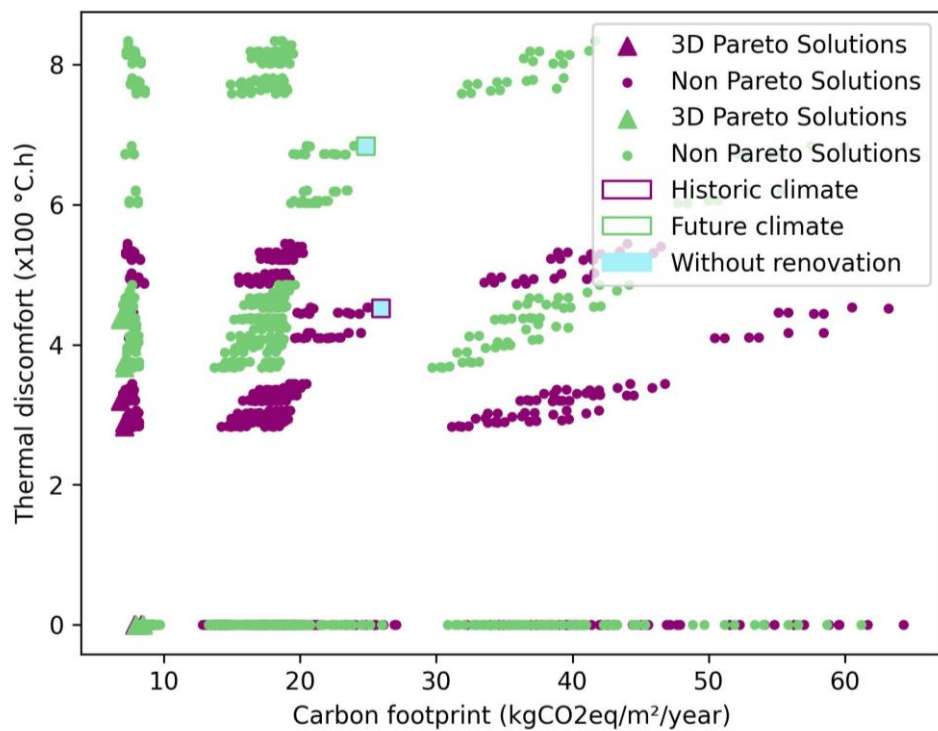


Figure 3 : Comparison between historic and future climate series considering thermal discomfort and carbon footprint.

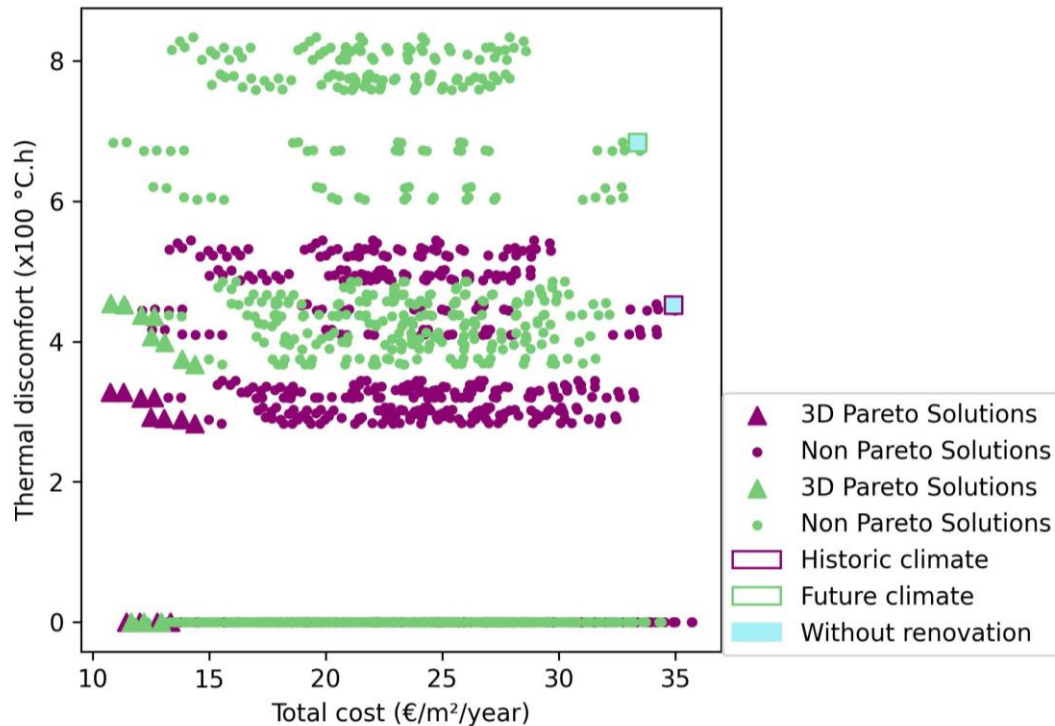


Figure 4 : Comparison between historic and future climate series considering thermal discomfort and total cost.

5. CONCLUSIONS

In conclusion, this work allows a first evaluation of a new approach to multi-criteria optimization of renovation strategies. First, this methodology goes beyond the economic and environmental optimizations that may already exist, by integrating the essential notion of thermal comfort. This is reflected in the addition of a dedicated indicator, the thermal discomfort in degree-hours, but also in the modelling of renovation actions related to cooling. Air conditioning modelling is therefore a first step. This question of thermal comfort is further reinforced by the fact that prospective climatic sequences are considered in the methodology, including a warming of the outside temperature.

In addition, the coherence of the various simulation tools, from dynamic energy simulation to LCA and economic evaluation, makes it possible to bring a new perspective to the renovation strategies favored by the various stakeholders. The case study with an individual housing constructed in 1980 is a first example. Insulation from the inside reduces heat loss just as much as insulation from the outside, but the drop in inertia can be damaging to thermal comfort. Moreover, the analyses of the Pareto fronts highlight the different possible approaches : renovation of the heating system and exterior walls are necessary, but the installation of an air/air heat pump for cooling as well as a dual-flow ventilation are not mandatory. Besides, considering a typical year in a future climate increases thermal discomfort, but only marginally modifies the identification of 3D Pareto solutions.

Finally, we would like to point out that this article is a first evaluation of this methodology, and many developments are planned, to strengthen and consolidate these results. On the one hand, the number of renovation strategies needs to be significantly expanded, now that the method has been approved. Scenarios combining multiple energy systems and the renovation of the envelope, or the addition of heating networks must be integrated. A filtering of possible renovation strategies, depending on

technical constraints and the environment, is also planned. On the other hand, regarding indicators, greater attention needs to be paid to cost. The calculation of an overall cost, including the costs of repair, maintenance, and deconstruction, is in line with this idea. The indication of a carbon payback time for LCA is also envisaged. Regarding foresight, the objective is to extend it to LCA, by varying the emission factors of energy carriers, but also to energy simulation by modifying occupancy scenarios. Climate series incorporating severe heat waves are also being studied, to assess the health risk and no longer only thermal comfort.

6. REFERENCES

- ADEME. 2022a. « Construction neuve et rénovation : les points communs des scénarios ADEME, négaWatt, The Shift Project et Pouget Consultants / Carbone 4 ». <https://theshiftproject.org/wp-content/uploads/2022/03/22-03-25-Communique-commun-scenarios-batiment-FINAL.pdf>.
- . 2022b. « Méthode Quartier Energie Carbone ». La librairie ADEME. 2022. <https://librairie.ademe.fr/urbanisme-et-batiment/5802-methode-quartier-energie-carbone.html>.
- Amini Toosi, Hashem, Monica Lavagna, Fabrizio Leonforte, Claudio Del Pero, et Niccolò Aste. 2020. « Life Cycle Sustainability Assessment in Building Energy Retrofitting; A Review ». *Sustainable Cities and Society* 60 (septembre): 102248. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102248>.
- Batiprix. 2024. « Logiciel de chiffrages BTP - Bibliothèque de prix ». Batiprix. 2024. <https://www.batiprix.com/>.
- CEREMA. 2023. « Prise en compte du carbone dans les projets de rénovation ». <https://www.cerema.fr/fr/actualites/comment-evaluer-impact-carbone-projets-renovation-batiments>.
- Dear, Richard de, et G. S. Brager. 1998. « Developing an Adaptive Model of Thermal Comfort and Preference ». <https://escholarship.org/uc/item/4qq2p9c6>.
- Deb, Kalyan. 2001. « Multiobjective Optimization Using Evolutionary Algorithms. Wiley, New York ». In .
- DGEC. 2023. « Synthèse du scénario “avec mesures existantes”2023 de la Stratégie Nationale Bas Carbone ». <https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/20230502%20Synth%C3%A8se%20du%20sc%C3%A9nario%20AME2023%20-%20202.pdf>.
- Elbeze, Jérémy. 2018. « Les rôles de la substitution et de l'efficacité énergétiques dans la décarbonation du parc de logements en France ». https://www.chaireeconomieduclimat.org/wp-content/uploads/2019/01/Th%C3%A8se_Jeremy_EL_BEZE_UPD.pdf.
- France Stratégie. 2021. « Guide de l'évaluation socioéconomique des investissements publics. Révision du taux d'actualisation ». https://www.strategie.gouv.fr/sites/strategie.gouv.fr/files/atoms/files/fs-guide-evaluation-i-taux_dactualisation-23novembre-final.pdf.
- Galimshina, Alina, Maliki Moustapha, Alexander Hollberg, Pierryves Padey, Sébastien Lasvaux, Bruno Sudret, et Guillaume Habert. 2021. « What Is the Optimal Robust Environmental and Cost-Effective Solution for Building Renovation? Not the Usual One ». *Energy and Buildings* 251 (novembre): 111329. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111329>.
- Gobiet, Andreas, Daniela Jacob, et Euro-Cordex Community. 2012. « A new generation of regional climate simulations for Europe: The EURO-CORDEX Initiative », avril, 8211.
- Inies. s. d. « Inies, les données environnementales et sanitaires de référence pour le bâtiment et la RE2020 ». Inies. Consulté le 8 mars 2024. <https://www.inies.fr/>.
- IPCC. 2023. « SYNTHESIS REPORT OF THE IPCC SIXTH ASSESSMENT REPORT (AR6) ».
- Kohler, Niklaus Arnold. 1986. « Analyse énergétique de la construction de l'utilisation et de la démolition de bâtiments ». Lausanne, EPFL. <http://infoscience.epfl.ch/record/31103>.

- Kraiem, Samy, Jean-Marie Alessandrini, et Anthony Rey. 2020. « fTMY-Documentation ». Internal CSTB report.
- Mailhac, Adelaïde. 2019. « Contribution au développement d'une méthodologie d'évaluation environnementale aux échelles urbaines. » These de doctorat, Toulouse, INSA. <https://www.theses.fr/2019ISAT0034>.
- Moss, Richard H., Jae A. Edmonds, Kathy A. Hibbard, Martin R. Manning, Steven K. Rose, Detlef P. Van Vuuren, Timothy R. Carter, et al. 2010. « The next Generation of Scenarios for Climate Change Research and Assessment ». *Nature* 463 (7282): 747-56. <https://doi.org/10.1038/nature08823>.
- Mostafazadeh, Farzad, Saeed Jalilzadeh Eirdmoussa, et Mehdi Tavakolan. 2023. « Energy, economic and comfort optimization of building retrofits considering climate change: A simulation-based NSGA-III approach ». *Energy and Buildings* 280 (février): 112721. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112721>.
- Mostavi, Ehsan, Somayeh Asadi, et Djamel Boussaa. 2017. « Development of a New Methodology to Optimize Building Life Cycle Cost, Environmental Impacts, and Occupant Satisfaction ». *Energy* 121 (février): 606-15. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.01.049>.
- Pellan, M., M. Louërat, J. El Beze, et G. Habert. 2022. « A Holistic Perspective on the French Building and Construction GHG Footprint ». *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 1078 (1): 012049. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1078/1/012049>.
- « Polster et al_1996_Evaluation of the environmental quality of buildings towards a more.pdf ». s. d. Consulté le 26 avril 2023. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X96000710/pdf?md5=cc6f21cbb7c00bb2901f09f8f6d6f084&pid=1-s2.0-S0038092X96000710-main.pdf&isDTMRedir=Y>.
- « Réglementation environnementale RE2020 ». 2020. Ministère de la Transition Écologique et de la Cohésion des Territoires (MTE-MCT). 2020. <https://www.ecologie.gouv.fr/reglementation-environnementale-re2020>.
- SDES. 2023. « Chiffres clés de l'énergie - Édition 2023 ». Données et études statistiques pour le changement climatique, l'énergie, l'environnement, le logement, et les transports. 2023. <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/chiffres-cles-de-lenergie-edition-2023>.
- Silva, David DA, Jean-Marie Alessandrini, Jean-Baptiste Videau, et Jean-Robert Millet. 2016. « Evaluation et perspectives du modèle thermique de COMETH, le cœur de calcul de la réglementation thermique des bâtiments neufs ».
- Vilches, Alberto, Antonio Garcia-Martinez, et Benito Sanchez-Montañes. 2017. « Life Cycle Assessment (LCA) of Building Refurbishment: A Literature Review ». *Energy and Buildings* 135 (janvier): 286-301. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.11.042>.

Conception paramétrique de rénovation par rajout de façade double peau avec évaluation multicritère

Hugo Guyomard*^{1,2}, Antoine Dugué³, Tessa Hubert³, Baptiste Durand-Estebe³, Ewen Tanneau², Delphine Lacanette¹

1 Institut de Mécanique et d'Ingénierie (I2M), UMR CNRS 5295, Université de Bordeaux, 33400 Talence, France

2 Coveris, 33185 Le Haillan, France

3 Nobatek/INEF4, Institut National pour la Transition Energétique du Bâtiment, 64600 Anglet, France

*hguyomard@coveris.fr

RESUME. La nécessaire rénovation des bâtiments tertiaires construits dans les années 80/90, généralement largement vitrés, est freinée par l'absence de solutions qui répondent aux exigences de coût maîtrisé, d'une certaine facilité de mise en œuvre et de la possibilité de rénover en site occupé. C'est dans ce contexte que nous proposons d'étudier l'ajout d'une façade double peau comme une solution de rénovation pour ces bâtiments. Cette solution présente de nombreux avantages tels que la modularité, la préfabrication en atelier ou encore l'intérêt architectural. Pour autant, la complexité de la conception, le faible nombre de retour d'expérience, mais aussi une modélisation nécessairement avancée sont autant de freins à son déploiement. C'est pourquoi nous proposons dans cet article une conception paramétrique de cette solution avec une évaluation économique, énergétique et environnementale de ses performances au travers d'un outil exploitant EnergyPlus par l'intermédiaire de HoneyBee Grasshopper dont nous présentons l'architecture.

MOTS-CLÉS : EnergyPlus, multicritères, rénovation.

ABSTRACT. The necessary renovation of tertiary buildings constructed in the 80s/90s, typically characterized by extensive glass facades, is hindered by the lack of solutions that meet the requirements of cost control, ease of implementation, and the possibility of renovation while occupied. It is within this context that we propose to study the addition of a double-skin facade as a renovation solution for these buildings. This solution offers numerous advantages such as modularity, prefabrication in workshops, and architectural interest. However, the complexity of design, limited experience feedback, as well as the inherently advanced modeling required, serve as barriers to its deployment. Therefore, in this article, we propose a parametric design of this solution accompanied by an economic, energetic, and environmental evaluation of its performance through a tool utilizing EnergyPlus via HoneyBee Grasshopper, the architecture of which we present.

KEYWORDS: EnergyPlus, Multicriteria, renovation

1. INTRODUCTION

1.1. CONTEXTE GENERAL

En France, le secteur de la construction est aujourd'hui dans une optique de réductions de ses consommations énergétiques. Cela se traduit par une nouvelle Règlementation Environnementale appelée « RE 2020 » active depuis 2022 qui intègre en plus de la consommation énergétique et de la qualité des ambiances intérieures, les émissions en kgCO₂eq des matériaux et de l'usage du bâtiment

exploitant la base de données INIES. Cette réglementation ne s'appliquant qu'aux bâtiments neufs, un « décret tertiaire » définit des objectifs de réduction de consommation énergétiques pour tous les bâtiments tertiaires existants de plus de 1000m². Ces bâtiments doivent réduire leurs émissions de 40% d'ici 2030, 50% d'ici 2040 et 60% d'ici 2050. (« Décret N° 2019-771 Du 23 Juillet 2019 »). Pour les bâtiments les plus récents, une valeur seuil aux alentours de 100kWh/m².an de consommation totale est définie.

1.2. LA DOUBLE PEAU COMME SOLUTION POUR LA RENOVATION

D'après l'ADEME, la grande majorité des bâtiments tertiaire des années 1980/1990 n'ont pas été rénovés. Or il n'existe pas de solution évidente pour leur rénovation. En effet, ces bâtiments de bureaux sont généralement vitrés et ont des exigences de rénovation particulières telles que le coût, la rapidité de mise en œuvre et également la possibilité de mener les travaux en site occupé. Quelques rares cas de façade double peau en rénovation existent mais elle est peu exploitée. Il y a eu un fort intérêt pour ces façades dans les années 90 avant tout pour leur intérêt architectural mais aussi comme une solution pour mieux exploiter la ressource solaire tout en limitant les pertes de chaleur par l'enveloppe. Cette solution peut être pertinente en rénovation car elle peut couvrir largement la façade le bâtiment, préserver la façade existante au maximum, et permet une rénovation rapide, propre de par la préfabrication et possiblement en site occupé (GhaffarianHoseini et al. 2016).

Un retour d'expérience sur quelques opérations identifiées comme celle de l'Université de Bordeaux, l'hôpital de Brive la Gaillarde ou encore le bâtiment de l'Office Notarial de l'Avenue du Jeu de Paume à Bordeaux (*figure 1*), a permis de définir un cahier des charges. Tout d'abord, au vu du nombre de paramètres de conception, et des complexes phénomènes physiques en jeu, il est difficile de proposer une solution robuste. Ce type de rénovation nécessite une étude au cas par cas afin de proposer la solution la plus adéquat. Vis-à-vis de son efficacité, bien que toutes les rénovations étudiées notifient un gain en consommation, il est complexe de quantifier le gain apporté par la façade seule puisque ses performances dépendent d'éléments externes tels que la maintenance, la fiabilité ou encore l'interaction entre les usagers et cette dernière. Pour le cas de l'université de Bordeaux par exemple, un manque de fiabilité des systèmes d'ouvertures des ventelles empêche la solution de fonctionner correctement depuis maintenant quelques années. Une analyse plus poussée de ces trois cas a été présentée par (Guyomard et al. 2023).



Figure 1 : Office Notarial de l'Avenue du Jeu de Paume avant et après rénovation (2012) par Coveris

La façade double peau a aussi été un sujet d'intérêt pour les architectes, ingénieurs et chercheurs et l'état de la littérature à son sujet peut être qualifié de prolifique. L'étude plus de 40 articles montre que seuls 7 portent sur de la rénovation, et un seul propose une comparaison sur un cas réel (Aruta et al. 2023). La plupart des études sur les façades double peau portent sur la validation de modèles numériques

avec des montages expérimentaux en laboratoire ou proposent une approche très numérique de l'impact de la façade double peau sur le comportement et la performance du bâtiment par Simulations Thermique Dynamiques (STD) ; elle peut notamment se centrer sur les paramètres de conception et leur influence (Pelletier et al. 2023).

À la suite de ces retours d'expériences et cet état de l'art, nous pouvons conclure que la solution de rénovation par façade double peau, bien que présentant certains avantages, n'a pas été suffisamment considérée. Son temps d'étude long et son incertitude quant à la fiabilité de ses performances selon ses paramètres de conception et d'usages sont des freins majeurs pour sa généralisation. C'est pourquoi nous nous intéressons dans cette étude au développement d'un moyen simple et rapide de comparaison de différentes typologies de rénovation, en incluant la rénovation par ajout de façade double peau.

2. CONCEPT ET METHODOLOGIE

Pour généraliser l'usage de la façade double peau dans le secteur de la rénovation, il est nécessaire de pouvoir la proposer en phase de préconception des projets de rénovation. Pour cela nous avons besoin d'un outil nous permettant de rapidement comparer les différentes solutions entre elles selon plusieurs critères tels que la consommation énergétique, le coût et l'impact carbone de la solution.

Afin de cadrer notre étude, nous avons défini un périmètre :

- Nous ne considérons que des rénovations, sans extension du bâtiment. Il est également nécessaire que nous ayons la description initiale du bâtiment avant rénovation ;
- La géométrie des bâtiments est simplifiée pour être des parallélépipèdes de quelques étages ;
- Pour chaque orientation, la composition des parois (opaque ou vitré) est homogène ;
- Nous considérons les besoins en chauffage et en climatisation. Le travail sur les systèmes énergétiques se feraient dans un 2^{ème} temps et repose sur des considérations pratiques (accessibilité, reprise possible de la distribution...) ;
- Nous comparons les modèles sur la base d'un scénario d'utilisation de bureau classique, mais avec absence de ventilation naturelle du bâtiment par les fenêtres de la façade primaire. Nous ne modifions pas les usages du bâtiment ;

Une fois ce périmètre d'étude décrit, il faut ensuite définir les rénovations souhaitées avec une description géométrique et les différentes compositions de ces rénovations. En effet, sur chaque façade il est possible d'y installer ou non une façade double peau, cette dernière pouvant varier en dimension, et les compositions des différentes rénovations pouvant également différer (type de vitrage, type d'isolant, position de l'isolant, finition...).

Nous souhaitons également proposer en parallèle une étude structurelle sur le dimensionnement au vent des façades double peau. Elles sont à l'heure actuelles couvertes par des règles RAGE (Règles de l'Art Grenelle Environnement) qui sont des règles métiers à appliquer pour des cas spécifiques mais ces règles ne couvrent pas tous les type de façade double peau qu'il est possible de réaliser (Qualibat 2014). A l'heure actuelle, ces règles stipulent qu'une façade double peau doit être dimensionnée avec les règles Eurocode comme un mur rideau classique sauf si la façade répond à plusieurs critères sur sa perméabilité en permanence. Si ces critères sont respectés, il est possible d'appliquer un coefficient de réduction de la pression du vent de 0.6 avec une valeur minimale de 400Pa. Cela permet de réduire le dimensionnement structurel des façades double peau et impacter le coût de la solution. L'objectif de cette étude est de confirmer ou non tout d'abord ces règles, mais également de les étendre

potentiellement à d'autres configurations de façade double peau. Cette étude est réalisée en mécanique des fluides numériques avec le code de calcul *opensource* OpenFoam et ne sera pas présentée ici.

Dès lors que le périmètre de notre étude est défini, il est nécessaire de développer un outil permettant de répondre à nos différents critères tels qu'un temps d'étude court, un large choix de conception étudié selon des critères pertinents lors de la phase de préconception.

3. OUTIL MULTICRITERE POUR L'AIDE A LA CONCEPTION DE FAÇADES DOUBLE PEAU

Considérant ce cahier des charges, nous avons fait le choix d'une modélisation paramétrique avec Grasshopper qui est un logiciel de programmation visuelle couplé au logiciel de CAO (Conception Assistée par Ordinateur) Rhinocéros. Il permet la génération de modèles sur la base d'un certain nombre de paramètres d'entrées tels que la hauteur, longueur et largeur du bâtiment, le nombre d'étage, le % de surface vitrée, la présence ou non de façade double peau, etc. Ce dernier, couplé avec les modules HoneyBee et Ladybug est largement utilisé pour la modélisation paramétrique de modèles énergétiques avec EnergyPlus (Ida 2018). Nous avons choisi ce code de STD car il est *opensource* et présente l'avantage d'intégrer des modèles aérauliques pour la description des écoulements en ventilation naturelle. EnergyPlus a par ailleurs été validé et comparé à de nombreuses reprises dans le cadre d'étude sur des façades double peau pour la partie écoulement et rayonnement solaire (Catto Lucchino et al. 2021).

L'architecture globale de l'outil utilisé est présentée ci-dessous :

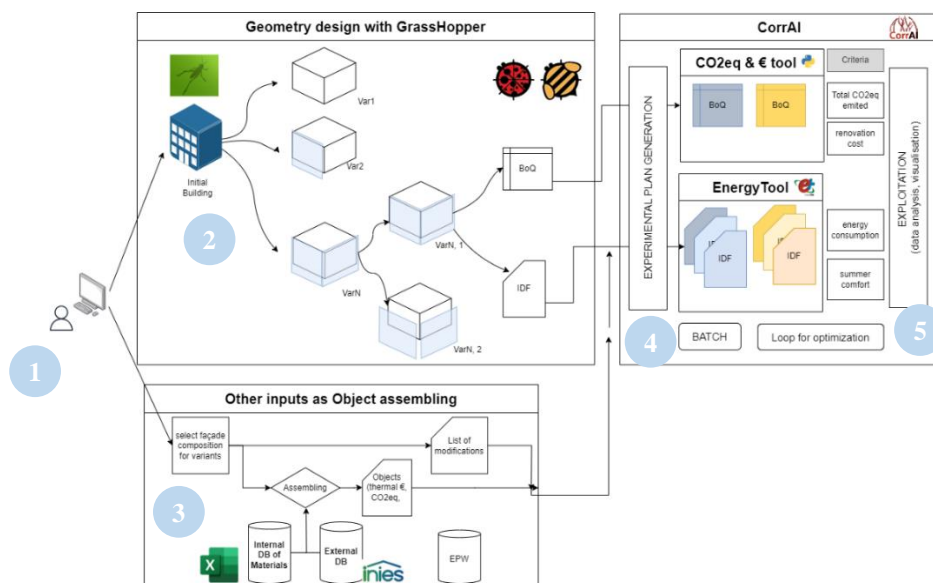


Figure 2 : Architecture globale de l'outil de conception

Le fonctionnement de l'outil est aujourd'hui le suivant :

1. Saisie initiale : L'utilisateur saisit les principales caractéristiques du bâtiment existant. Ensuite, pour chaque façade, il décrit s'il considère l'ajout d'une façade double peau et alors les épaisseurs et hauteurs variables, etc. Il saisit aussi les compositions considérées. **2. Génération automatique des géométries :** La géométrie du bâtiment existant et toutes les géométries de DSF demandées sont générées sur le logiciel Grasshopper. Le module HoneyBee permet l'export automatique de fichier .idf, et les métrés (bill of quantities) sont aussi exportés directement en csv. **3. Base de données :** Une base de

données spécifique a été créée pour décrire les différents matériaux et compositions possibles. A l'échelle matériaux, elle se base sur les règles Th-BAT pour les caractéristiques thermiques puis à l'échelle de composants, des extraits de la base de données INIES pour l'impact carbone des matériaux liés à la rénovation, et de connaissances métiers de Coveris pour les coûts. **4. Simulation** : Sur la base des fichiers idf et des métrés générés pour chaque géométrie, ainsi que les configurations à simuler, un bloc codé en python permet de définir le plan d'expérience et ensuite de réaliser les simulations. Un code maison permet de parser le fichier idf et de faire les modifications, avant de réaliser les simulations par batch et de récupérer en sortie les consommations d'énergie. Le coût global et le bilan carbone sont calculés sur la base de données et des métrés. **5. Exploitation des résultats** : les résultats sont exportés et réassemblés dans un fichier de sortie. Des graphes dynamiques sont alors générés nous permettant d'analyser les différents critères entre eux. Nous présenterons ces graphes dans le cas d'étude.

Le nombre de variantes possibles de rénovations étant élevé, il est essentiel d'avoir une optimisation de calcul selon des critères définis au préalable. Cet aspect n'étant pas encore pris en compte dans cette étude, nous nous limiterons donc à certaines configurations dans notre cas d'étude. A ce stade, l'aide à la décision se limite à une représentation détaillée et dynamique des résultats. Des méthodes plus abouties pourront être intégrées par la suite.

4. APPLICATION A UN CAS D'ETUDE

Le bâtiment considéré est composé de façades en murs rideaux légèrement isolés, avec un double vitrage d'époque. Les compositions et valeurs des parois retenues pour les simulations sont présentées dans le *tableau 1*. Pour une prise en compte de la dégradation de ces façades au cours du temps et la présence de ponts thermiques importante, nous avons dégradé de manière arbitraire leur performance de 50% en moyenne. Pour ce qui est des coûts et du carbone, un surcoût de 150€/m² est ajouté pour les vitrages de la façade double peau dû à sa complexité accrue et nous nous basons sur une durée de vie de 50 ans pour le potentiel de réchauffement global de tous les matériaux.

Partie opaque	Nom	Composition	U (W/m ² .K)	Facteur Solaire	Transmission Lumineuse	€/m ²	kgCO ₂ eq/m ²
	Existant	Brique 20cm/laine de verre 5 cm/espace ventilé/cassette composite	0.75	-	-	-	-
	20cm LV ext	Brique 20cm/laine de verre 20cm/espace ventilé/cassette composite	0.18	-	-	300	55
	20cm LB ext	Brique 20cm/laine de bois 20cm/espace ventilé/cassette composite	0.21	-	-	350	63
Vitrages	Existant	Double vitrage ancien menuiserie aluminium	3.29	50	70	-	-
	SV 65/50 alu	Simple vitrage menuiserie aluminium	5.61	50	65	650	130
	SV 65/50 bois	Simple vitrage menuiserie bois	5.5			700	100
	DV 60/35 alu	Double vitrage menuiserie aluminium	1.5	35	60	750	191
	DV 60/35 bois	Double vitrage menuiserie bois	1.4			800	161
	TV 50/30 alu	Triple vitrage menuiserie aluminium	1.15	30	50	850	252
	TV 50/30 bois	Triple vitrage menuiserie bois	1.05			900	222
Stores	Fs 0.6	Store toile facteur solaire 0.6	-	60	-	150	27.5
	Fs 0.3	Store toile facteur solaire 0.3	-	30	-	150	27.5

Tableau 1 : Compositions et valeurs des parois considérées

Le bâtiment carré de 20 mètres par 20 mètres s'étend sur deux étages pour une hauteur totale de 6 mètres de haut. Les niveaux n'ont pas de séparation internes. Il n'y a que deux zones thermiques dans

le bâtiment. Les géométries des façades double peau sont identiques sur toutes les faces : 1 mètre d'épaisseur, recouvrement intégral de la façade et dépassement de 1 mètre au-dessus du niveau de toiture pour une ventilation côté acrotère par ouverture de la façade. Les géométries considérées apparaissent sur la figure 4 et sont un modèle sans ajout de façade double peau (a), un avec une façade double peau côté Sud (b) et un avec les quatre façades recouvertes par une double peau (c).

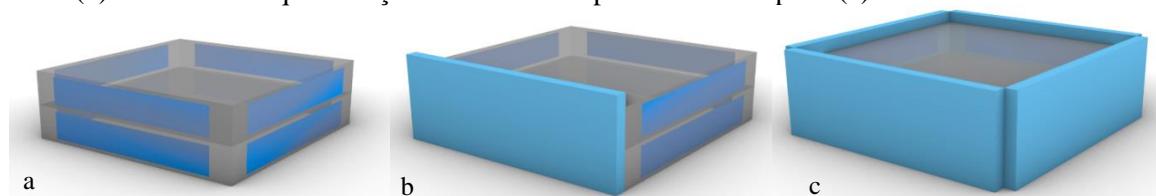


Figure 3 : Modèles géométriques générés par Grasshopper (a. sans double peau, b. double peau Sud et c. double peau sur les 4 faces)

Les différentes possibilités de rénovations sont présentées dans le *tableau 2*. Nous proposons également une comparaison avec une rénovation de référence, que nous définissons comme la dépose de la façade existante par des murs rideaux plus performants avec une épaisseur d'isolant plus importante et des vitrages qui répondent aux standards de performances actuelles.

Le nombre de paramètres étant élevé (type de vitrage, type de partie opaque, orientation des façades, filtration du store, ouverture façade double peau, etc.), nous avons procédé à quelques simplifications parmi les choix possibles afin d'obtenir des combinaisons réalistes. Nous écartons par exemple les possibilités de ne rénover que la partie opaque de la façade Est et Nord tout en conservant le reste en composition existante.

		Avec double peau 4 côtés			
		Sans double peau	Avec double peau Sud	Sans variations entre double peau	Variation double peau Nord
Opaque primaire	Sud	Existant 20cm LV ext 20cm LB ext	Existant 20cm LV ext 20cm LB ext	Existant	Existant
	Est				
	Nord				
	Ouest				
Vitrage primaire	Sud	Existant DV 60/35 alu DV 60/35 bois TV 50/30 alu TV 50/30 bois	Existant Existant DV 60/35 alu DV 60/35 bois TV 50/30 alu TV 50/30 bois	Existant	Existant
	Est				
	Nord				
	Ouest				
Vitrage double peau	Sud		SV 65/50 alu SV 65/50 bois DV 60/35 alu DV 60/35 bois	SV 65/50 alu SV 65/50 bois DV 60/35 alu DV 60/35 bois	SV 65/50 alu SV 65/50 bois
	Est				DV 60/35 alu DV 60/35 bois SV 65/50 alu SV 65/50 bois
	Nord				
	Ouest				
Ventilation double peau	Sud		10 cm/30 cm/60 cm		10 cm/30 cm/60 cm
	Est				
	Nord			10 cm/30 cm/60 cm	Non ouvrable
	Ouest				10 cm/30 cm/60 cm
Stores double peau	Sud		Fs 0.6 Fs 0.3		Fs 0.6 Fs 0.3 Sans store
	Est				
	Nord				
	Ouest				

Tableau 2 : Récapitulatif des différentes solutions de rénovation selon les modèles géométriques considérés

Nous avons ensuite simulé ces différents cas avec comme scénarios de simulation une activation de la ventilation naturelle pour les façades double peau entre le 1 mai et le 30 septembre en continu, et une activation des stores sur cette même période avec comme valeur seuil 300 W/m² perçus par la façade. Nous distinguons deux configurations pour le modèle avec 4 double peau en intégrant un changement indépendant la double peau Nord dans le second cas, qui n'a que des doubles vitrages, pas de ventilation et l'absence de store. Ces combinaisons génèrent un total de 603 simulations, pour un temps total de calcul d'environ 7 heures (Core i7, RAM 40Go, sans parallélisation).

Les solutions de façades double peau sur les 4 faces et avec double vitrage sont trouvées les plus efficaces en termes de consommations énergétiques totales, pour les coûts les plus élevés (voir *figure 4a*). Les solutions avec façade double peau (Sud uniquement ou 4 côtés) génèrent les besoins en climatisation les plus faibles, du fait de la génération d'un masque solaire à l'extérieur du bâtiment. Elles sont légèrement moins performantes sur les besoins en chauffage, et s'accompagnent d'un coût plus élevé que les rénovations sans double peau. D'autres scénarios restent à intégrer à cette analyse : double vitrage clair ou très occultant, une variation de l'étanchéité, climat diversifié, etc. En outre, nous n'avons ici pas exploité la potentielle récupération de chaleur que peut proposer une solution par façade double peau.

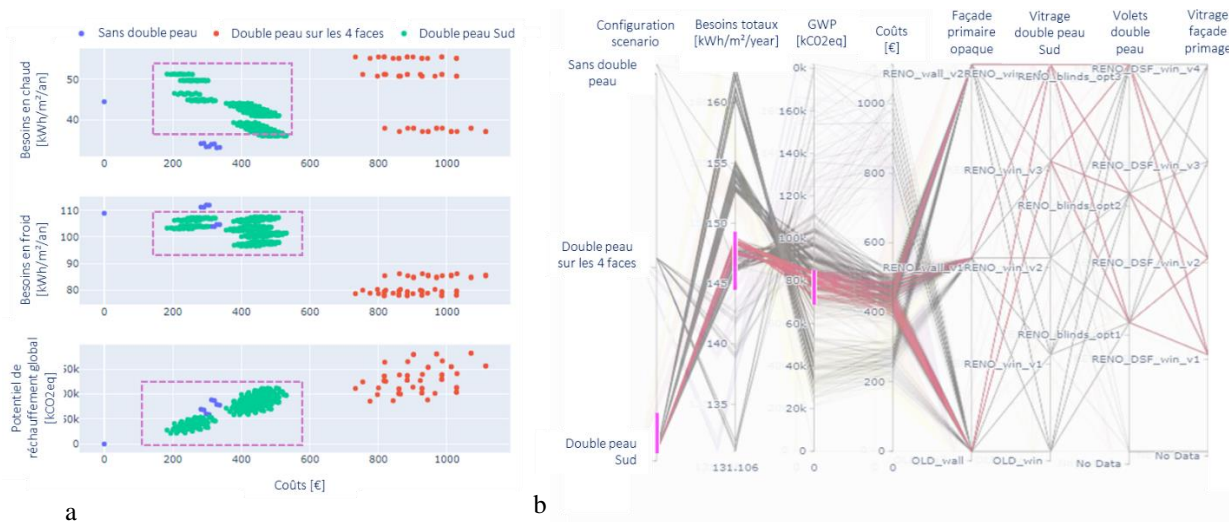


Figure 4 : a. Résultats combinés des simulations (a. Plot des besoins en chauffage, climatisation et émission en kgCO₂eq en fonction du coût, b. Zoom sur le cas double peau Sud avec représentation en coordonnées parallèles).

Pour aider à l'analyse d'un nombre élevé de scénarios de rénovation, des outils de visualisation (tel que présenté en *figure 4b*) permettent d'affiner un choix éclairé entre des possibilités de rénovations dont les impacts sur nos indicateurs sont parfois contradictoires. Aux coûts des matériaux et travaux pourraient par exemple s'ajouter l'économie réalisée sur les pertes sèches de productivité et coûts liés aux rénovations sur parois primaires qu'éviteraient l'ajout de double peau. De plus, le potentiel de réchauffement global, pour l'instant calculé sur la base d'une analyse de cycle de vie des matériaux employés lors des rénovations sur un horizon 50 ans, pourrait être confronté à un calcul des émissions carbonées liées à l'énergie économisée pour proposer un temps de « retour carbone » sur investissement.

5. CONCLUSION

L'outil présenté ici permet la comparaison d'un grand nombre de scénario de rénovation, au regard de divers critères. Pour éviter des temps de calculs excessifs, il faut cependant être vigilant sur le nombre

et typologies de cas testés, en proposant dès le départ des combinaisons réalistes mais variées. Afin de couvrir un plus grand nombre de situations, des travaux de boucle d'optimisation et choix logiques de scénarios sont en développement et seront à intégrer pour permettre, par exemple, l'étude des différentes typologies dans divers climats.

Par ailleurs, les résultats obtenus peuvent être renforcés par la considération d'un plus grand nombre de scénarios : typologies de vitrages, récupération de chaleur, modification de l'étanchéité du bâtiment après rénovation, etc. Enfin, un aspect primordial de cette étude est l'établissement des indicateurs et outils d'aide à la décision. Les pistes évoquées (amortissement de la rénovation par rapport aux consommations d'énergies, gain CO₂ émis lors de la phase d'utilisation du bâtiment) faciliteraient la comparaison des solutions entre elles. Une rénovation par façade double peau peut permettre de rénover le bâtiment en site occupé, et de conserver l'architecture existante du bâtiment : ce type d'aspect de la rénovation est difficilement quantifiable, et joue pourtant un rôle clé dans la sélection d'un scénario de rénovation plutôt qu'un autre. Cet article illustre toute la complexité de la solution de rénovation par ajout d'une façade double peau, dont les avantages et freins à leur exploitation nécessitent des études au cas par cas.



METABUILDING LABS Project has received funding from the European Union's Horizon 2020 Research and Innovation Programme under Grant Agreement No. 953193. The sole responsibility for the content of this document lies entirely with the author's view. The European Commission is not responsible for any use that may be made of the information it contains.

6. BIBLIOGRAPHIE

- Aruta, Giuseppe, Fabrizio Ascione, Nicola Bianco, Teresa Iovane, and Gerardo Maria Mauro. 2023. "A Responsive Double-Skin Façade for the Retrofit of Existing Buildings: Analysis on an Office Building in a Mediterranean Climate." *Energy and Buildings* 284 (April). <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.112850>.
- Catto Lucchino, Elena, Adrienn Gelesz, Kristian Skeie, Giovanni Gennaro, András Reith, Valentina Serra, and Francesco Goia. 2021. "Modelling Double Skin Façades (DSFs) in Whole-Building Energy Simulation Tools: Validation and Inter-Software Comparison of a Mechanically Ventilated Single-Story DSF." *Building and Environment* 199. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.107906>.
- "Décret N° 2019-771 Du 23 Juillet 2019 Relatif Aux Obligations d'actions de Réduction de La Consommation d'énergie Finale Dans Des Bâtiments à Usage Tertiaire - Légifrance." n.d. Accessed March 4, 2024. <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000038812251>.
- GhaffarianHoseini, Ali, Amirhosein GhaffarianHoseini, Umberto Berardi, John Tookey, Danny Hin Wa Li, and Shahab Kariminia. 2016. "Exploring the Advantages and Challenges of Double-Skin Façades (DSFs)." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 60: 1052–65. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.01.130>.
- Guyomard, Hugo, Antoine Dugué, Ewen Tanneau, Baptiste Durand-Estebe, Myriame Ali-Oualla, and Delphine Lacanette. 2023. "Renovation of Office Buildings with Double Skin Façade. Analysis of Cases and Design Discussion." In . Bern: Advanced Building Skins.
- Ida, Aletheia. 2018. "Multivalent Analysis of Double-Skin Envelope Dynamic Hygrothermal Louver System."
- Pelletier, Kate, Christopher Wood, John Calautit, and Yupeng Wu. 2023. "The Viability of Double-Skin Façade Systems in the 21st Century: A Systematic Review and Meta-Analysis of the Nexus of Factors Affecting Ventilation and Thermal Performance, and Building Integration." *Building and Environment*. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109870>.
- Qualibat. 2014. *Guide : Facade Multiple Double Peau Ventilée Naturellement Sur l'extérieur. Règles de l'art Grenelle Environnement 2012*.

Detecting CO₂ anomalies using machine learning: case study of a library

Ayoub Hannad*^{1,2}, Alain Godon³, Franck Mercier³, Charline Dematteo^{3,4}, Hassan Chehouani⁵, Marie-Lise Pannier²

¹ Mohammed VI Polytechnic University, Ben Guerir, 43150
660, Hay Moulay Rachid, Maroc

² Univ Angers, LARIS, SFR MATHSTIC, F-49000 Angers, France
62 avenue Notre Dame du Lac, 49000 Angers

³ Univ Angers, Polytech Angers, F-49000 Angers, France
62 avenue Notre Dame du Lac, 49000 Angers

⁴ Indiggo, 44000 Nantes, France
4 avenue Millet, 44000 Nantes

⁵ Laboratory of Processes for Sustainable Energy & Environment (ProcEDE), Cadi
Ayyad University, Marrakech, Morocco.

* ayoub.hannad@um6p.ma

RESUME. La qualité de l'air intérieur est un élément très important pour un environnement sain et confortable. L'utilisation des capteurs à faible coût, enregistrant les taux de CO₂ ou d'autres substances, s'est répandue ces dernières années. Cependant, la quantité et la complexité des données mesurées posent des problèmes pour l'identification des anomalies et l'extraction d'informations significatives. C'est là que les techniques d'apprentissage automatique excellent. Dans le cadre du projet ACQA, un micro-capteur composé de différents capteurs de qualité de l'air a été développé et déployé dans une bibliothèque universitaire. Cette étude examine la détection d'anomalies dans les niveaux de CO₂ enregistrés, en utilisant différents modèles d'apprentissage automatique : K-Nearest Neighbors, Random Forest (RF), Gradient Boosting Regressor et Decision Tree Regressor. Les modèles sont évalués en fonction de leur précision et de leur efficacité à détecter des anomalies. Les résultats sont quantifiés à l'aide des indicateurs R², RMSE et MAE, et montrent que le modèle RF est le plus précis.

MOTS-CLÉS : Qualité de l'air intérieur, Apprentissage automatique, Détection d'anomalies.

ABSTRACT. Indoor air quality is a very important element of a healthy and comfortable environment. The use of low-cost sensors recording CO₂ or other substances has become popular in recent years. However, the quantity and complexity of the data measured by these sensors present challenges for identifying anomalies and extracting meaningful information. This is where machine-learning techniques excel. As part of the ACQA project, a micro sensor composed of various air quality sensors was developed and deployed in a university library. This study examines the detection of anomalies in CO₂ levels recorded, using various machine-learning models: K-Nearest Neighbors, Random Forest (RF), Gradient Boosting Regressor and Decision Tree Regressor. The models are evaluated based on their accuracy and efficiency in detecting anomalies. The results, quantified using R², RMSE and MAE indicators, and show that the RF model is the most accurate.

KEYWORDS : Indoor air quality, Machine learning, Anomaly detection

1. INTRODUCTION

Energy efficiency in buildings has become a major concern worldwide. The need to reduce energy consumption and greenhouse gas emissions has led to a constant search for solutions to make buildings energy efficient. In addition, as the world become increasingly interconnected, people's lifestyles have

shifted towards spending a significant portion of their time indoors. Studies indicate that people are spending more than 80% of their time indoors (Diffey 2011). This includes time spent in residential buildings, offices, schools, and other indoor environments, which is why the quest for energy efficiency must not be at the expense of Indoor Air Quality (IAQ).

IAQ has become the objective of several studies especially after the pandemic of Covid-19, most of the studies focus on the public spaces such as classrooms (Di Gilio et al. 2021), aircraft cabins (Gameiro et al. 2023), Subway train (Park et Ha 2008), etc. There are two types of studies, first ones use high accurate expensive sensors installed for a short time to investigate specific IAQ issues, and the second ones use low-costs sensors for continuous monitoring. The low costs-sensors offer a cost-effective solution for continuous monitoring of various IAQ parameters, including CO₂ levels, temperature, humidity, VOCs, and particulate matter. They provide real-time data collection and enable the generation of large datasets for analysis. This data can be used in various applications such as building management and energy efficiency. By continuously monitoring IAQ parameters, building managers can make informed decisions regarding ventilation, heating, and cooling systems to create a healthier and more energy-efficient environment (Li et al. 2020).

However, the volume and complexity of the data generated by low-cost sensors present challenges in identifying anomalies and extracting meaningful insights. This is where machine learning (ML) techniques excel. ML is a branch of artificial intelligence that focuses on the development of algorithms and statistical models, enabling computer systems to learn from data and make predictions or decisions without being explicitly programmed (Senders et al. 2018). In the context of IAQ anomaly detection, ML models can be trained to predict the expected values of various IAQ parameters based on historical data. These predicted values can then be compared with the actual sensor readings to identify any significant deviations or anomalies. By continuously monitoring and comparing the predicted and actual data, the ML system can automate the detection and alerting of anomalies in real-time, enhancing the efficiency and accuracy of IAQ monitoring systems. Many studies focuses on the prediction of CO₂ levels using different ML models. Taheri et Razban (2021) develop and compare six ML models for the prediction of indoor CO₂ concentration to control the HVAC systems in classrooms. Kallio et al. (2021) investigate four models for the prediction of future office CO₂ concentration. Chen et al. (2018) tests four ML models for the prediction of CO₂, TVOC and HCHO. Our paper, do not focus only on the comparison between models and access their performance, but also on applying ML techniques to detect CO₂ anomalies. By training ML models on historical CO₂ sensor data, we aim to estimate and detect deviations from normal CO₂ levels.

2. MATERIALS AND METHODOLOGY

2.1. INSTRUMENTATION AND STUDY SITE

The device (Figure 2) used in this work was developed by the LARIS laboratory of Polytech Angers using low-cost micro-sensors. These sensors have been designed to measure a wide range of parameters, such as CO₂, temperature and humidity with a nondispersive infrared sensor, Carbone monoxide (CO), Ethanol (C₂H₅OH), and Nitrogen dioxide (NO₂) using microelectromechanical systems based metal oxide semiconductors gas sensors, and particulate matter (PM) using a laser scattering sensor, making them suitable for an IAQ study. Temperature, relative humidity, noise and brightness are also measured to inform on the occupants' overall comfort.



Figure 1: Device developed by LARIS lab.

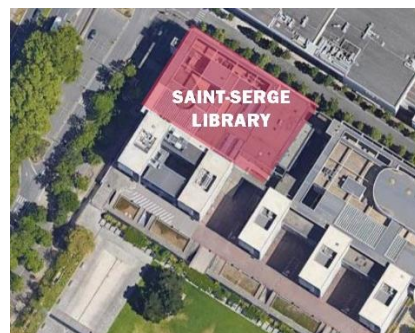


Figure 2: Saint-Serge library location.

The location chosen for the installation of the sensors is the Saint Serge library at the University of Angers (Figure 2); it was built in 1998, with a total surface area of 5004 m², and has an annual energy consumption of approximately 378.9 MWh. Additionally, the library has an average occupancy of 120 individuals, varying according to the time of the day and season. The selection of this site stems from the desire of the manager of the university libraries for carefully monitor IAQ in this location in response to the challenges posed by the Covid19 pandemic. The main objective of this monitoring is to detect pollutants levels in the air, an essential indicator for assessing ventilation and air circulation in the indoor environment. A high CO₂ concentration may indicate poor ventilation, which could potentially increase the risk of virus transmission (WHO 2021) (Ferrari et al. 2022). The sensors were strategically placed in the library to cover a variety of locations, ensuring comprehensive monitoring of IAQ. The sensor ENTRANCE was positioned on the first floor, near the main door to monitor variations due to entries and exits. The sensor PRINTZONE was placed on the first floor, close to the library printers, to assess their impact on air quality. The sensor STUDYSPOT was installed on level 1, near a work area most frequented by students. Finally, the sensor BOOKHALL was fixed on the second level, in a corridor near the book section.

2.2. METHODOLOGY

The study methodology is based on a systematic approach in three key steps (Figure 3), designed to (i) collect, (ii) analyze, (iii) estimate CO₂ data accurately, and detect anomalies. The first step focuses on collecting data from the four sensors. In this study, the only data used from our IAQ device was CO₂ concentration: we aim to predict the CO₂ concentration. Data pre-processing is also carried out in this step, involving the cleaning of the collected data. In this step, identifying outliers or incorrect values in the data involved by applying specific thresholds to each type of data, these thresholds represent values outside the measurement range of the sensors. The second step, dedicated to in-depth data analysis, comprises two parts: the first part involves measurements visualization and correlation with meteorological data, as well as data regarding the presence of occupants indoors. Here, correlations are utilized to identify parameters correlated with CO₂ data, by calculating the Pearson correlation coefficient between each parameter and the CO₂ data, insights are gained into which parameters are most strongly correlated with CO₂ levels. Which are later on employed as training parameters for the models. The second part entails the comparison of ML techniques for estimation. In this study, we employed Python programming language, leveraging the scikit-learn library, a popular ML toolkit in Python, to implement and compare various ML models for the estimation task. To assess the estimation performance of different ML models, three key metrics were used, which are coefficient of determination (R²), Root Mean Square Error (RMSE) and Mean Absolute Error (MAE). These metrics

allow us to assess the precision, dispersion and accuracy of our models. A set of regression models is used, namely the Gradient Boosting Regressor (GBR), the K-Nearest Neighbors Regressor (KNN), the Random Forest Regressor (RF) and the Decision Tree Regressor (DTR). For each model, a 10-fold cross-validation was performed by using the appropriate features for each sensor, Training values were taken randomly from the available year of data. During each iteration, nine parts were used for training and one part for validation, repeating the process 10 times. This method allows for rigorous assessment and comparison of each model's performance, after which the best-performing model for the estimation is selected. The third and final step is reserved for the estimation of IAQ values using the selected model, and the detection of any anomalies. This step is separated from the comparison of models and involves the training of our model on 11 months of data and making predictions for the last available month. Those 12 training and testing sets have been used for the anomaly detection step.

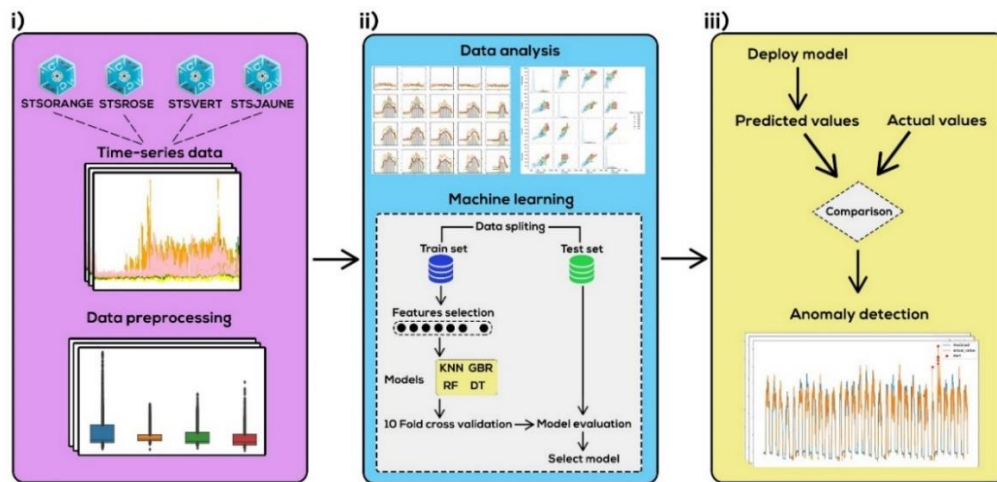


Figure 3: Methodology (i) collect, (ii) analyze, (iii) estimate.

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1. DATA DESCRIPTION

During this project, two types of data have been used. Firstly the CO₂ data is collected approximatively one year, from 13 July 2022 to 30 June 2023. The data is recorded for each minute and then averaged by computing the mean over every 10-minute interval. After the preprocessing, the percentage of data cleaned for each sensor was calculated enabling us to assess the loss of data resulting from the cleaning process. These percentages vary according to each sensor. It is important to note that despite cleaning, the percentage of data cleaned remains relatively low (always less than 0.74%). The second type of data is the occupancy. This data is collected by presence sensors at regular 30-minute intervals. However, for greater consistency with CO₂ data, the occupancy data was adapted by converting it into 10-minute intervals. This means that we have taken the presence value measured during each 30-minute interval and spread it over three consecutive 10-minute intervals.

The features used for estimation included temporal information such as day of year, hour, day of week, quarter, month, year, day of month, as well as number of occupants. The data predicted in this study specifically pertains to CO₂ levels, while the consideration of the other substance measured by our device (as input or output) will be explored in future works.

3.2. MODELS COMPARISON

Figure 4, Figure 5, and Figure 6 represent a set of boxplots for each model, illustrating the performance of the estimation in terms of R^2 , RMSE, and MAE. Table 1 shows the mean of each boxplot, representing the average values across the 10 cross-validation iterations. In 10-fold cross-validation, the fold of testing is taken randomly from the data, ensuring that the evaluation is not influenced by any specific ordering of data. Results indicates that the Random Forest Regressor is the best performing model for estimating CO₂ levels, with mean R^2 of 0.96, 0.95, 0.98 and 0.97 respectively for the STUDYSPOT, ENTRANCE, PRINTZONE and BOOKHALL sensors. The Gradient Boosting Regressor model on the other hand, comes in last, with mean R^2 of 0.88, 0.78, 0.89 and 0.87. In terms of RMSE and MAE, the Random Forest Regressor also showed the lowest values of 33.7, 25.7, 17.2, 19.3 ppm, and 20.5, 17, 11, 12.1 ppm respectively, indicating better overall accuracy.

	STUDYSPOT			ENTRANCE			PRINTZONE			BOOKHALL		
	R^2	RMSE (ppm)	MAE (ppm)	R^2	RMSE (ppm)	MAE (ppm)	R^2	RMSE (ppm)	MAE (ppm)	R^2	RMSE (ppm)	MAE (ppm)
GBR	0.88	61.9	40	0.78	54.4	37.6	0.89	45.3	31.4	0.87	41.6	28.4
KNN	0.92	50	29.9	0.86	44	27.3	0.94	34.4	21	0.91	32.9	19.9
RF	0.96	33.7	20.5	0.95	25.7	17	0.98	17.2	11	0.97	19.3	12.1
DTR	0.96	35.5	21.22	0.94	27.1	17.7	0.98	17.93	11.1	0.96	20.9	12.65

Table 1 : Model Performance by Sensor.

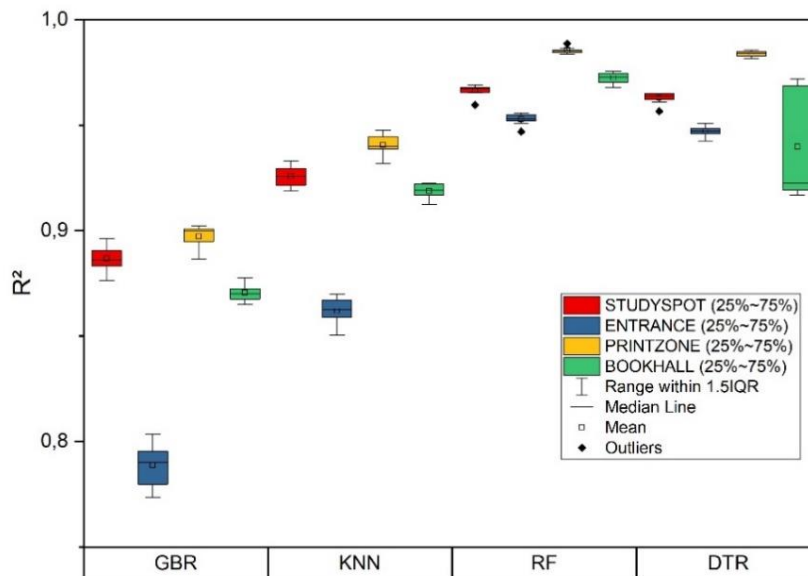


Figure 4: Boxplots of R^2 scores for estimation by sensors.

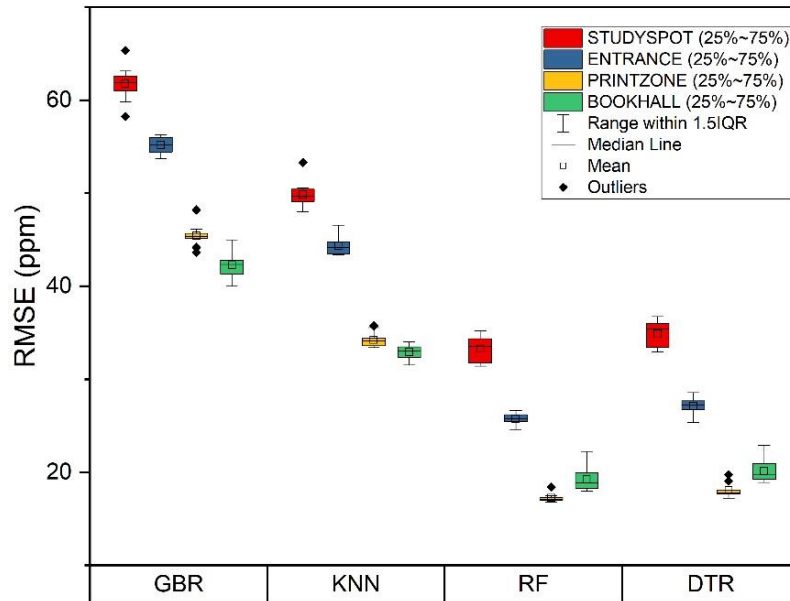


Figure 5: Boxplots of RMSE scores for estimation by sensors.

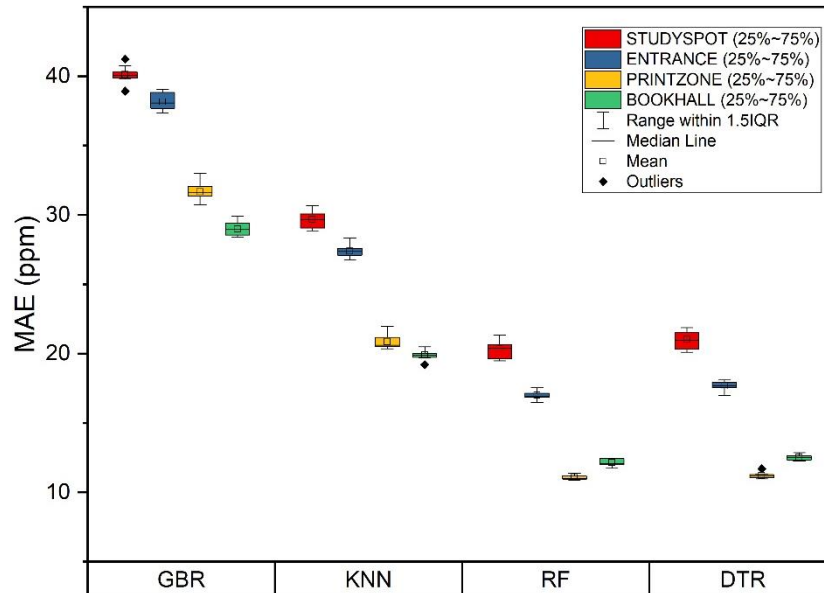


Figure 6: Boxplots of MAE scores for estimation by sensors.

3.3. ANOMALIES DETECTION

Anomaly detection involves identifying CO₂ values that deviate significantly from established estimation models. Anomalies can signal potential problems in the indoor environment, such as unexpected pollution levels or ventilation system malfunctions. To this end, the Random Forest model was used to estimate expected values of IAQ parameters, as it was the best-performing model in our case study.

Figure 7 and Figure 8 shows an example of August 2022, in which data of July 2022 and data from September 2022 to June 2023 are used for training, while data of August 2022 is used for detecting anomalies. Once the Random Forest model has been trained, we apply it to August data to estimate expected CO₂ levels knowing for the same time step the number of occupants, the year, the day of year, the quarter, the month, the day of month, the day of the week, and the hour. When the measured value

exceeds the bounds of the 95% prediction interval given by the RF model, it is considered as an anomaly. The results reveal that the STUDYSPOT sensor detected anomalies in most of occupied days. Figure 8 show graph of August 18th, where 11 anomalies are detected, we can remark that almost all anomalies are detected when the occupancy decrease significantly such as the midday break or at the end of work hours. Let's remind that the STUDYSPOT sensor is located in a highly occupied workspace where the CO₂ level can be high due to human activity. Additionally, it's important to note that we only have an idea about the occupancy of the entire library, not by specific zones. Therefore, when the total number of occupants decrease in the whole library, the area around the STUDYSPOT sensor may still have high occupancy levels. This can be seen during lunch time and on August 18, where the grey bars indicates a decrease of occupancy at the library scale and an increase CO₂ is measured by the STUDYSPOT sensor (orange line). In addition, at the end of the day, the CO₂ levels decreases more slowly than expected, as the share of students staying in the library may be larger in the STUDYSPOT than in the rest of the library. This approach enables us to identify the days and times when CO₂ levels are higher than expected, providing crucial information that can be useful to improve the IAQ. In our case, the solution might be to distribute the sensors more widely throughout the library, or to assess the number of occupants by zone. Additionally, our methodology distinguishes itself from the conventional threshold approach, such as using a threshold of 1000 ppm, because even below 1000 ppm, we can discern anomalous sources of CO₂ in the environment, allowing a more comprehensive assessment of IAQ.

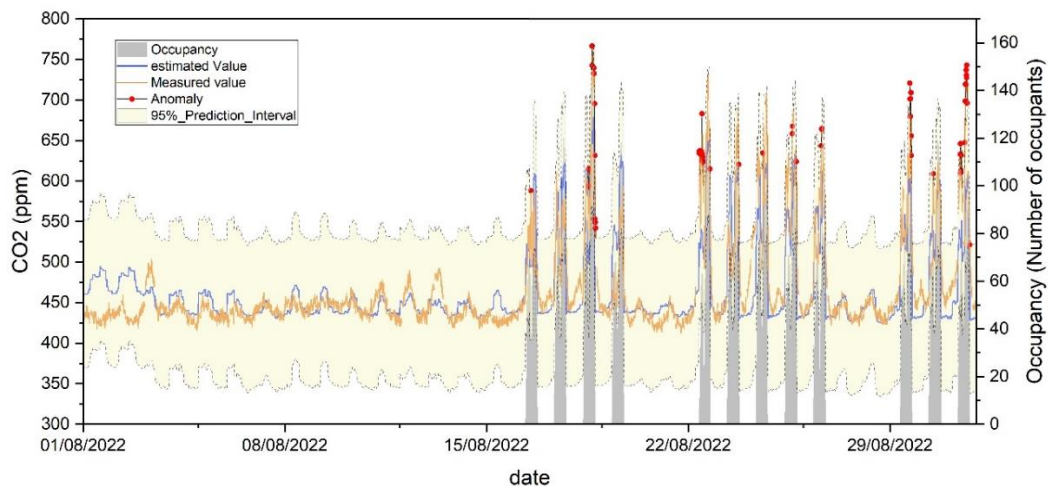


Figure 7: Graph of STUDYSPOT sensor anomalies for CO₂ in August.

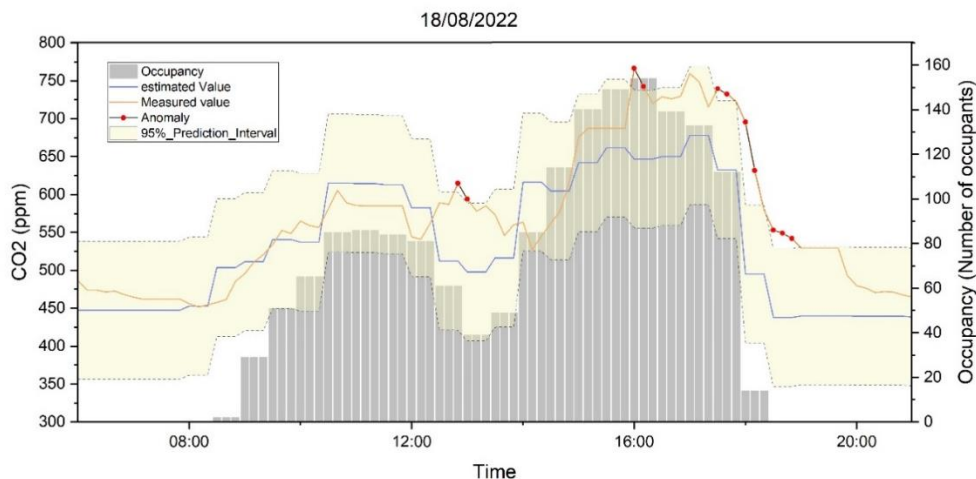


Figure 8: Graph of STUDYSPOT sensor anomalies for CO₂ in August 18th.

4. CONCLUSION

This study focused on developing an anomaly detection technique to identify CO₂ values that significantly deviate from normal concentrations, indicating potential issues within indoor environments. Four models namely K-Nearest Neighbors, Random Forest, Gradient Boosting Regressor and Decision Tree Regressor were compared. Results showed that Random Forest Regressor is the best performing model for estimating CO₂ levels, with mean R² of 0.96, 0.95, 0.98 and 0.97 respectively for the STUDYSPOT, ENTRANCE, PRINTZONE and BOOKHALL sensors, and lowest RMSE and MAE values of 33.7, 25.7, 17.2, 19.3 ppm, and 20.5, 17, 11, 12.1 ppm respectively, indicating better overall accuracy. It is important to note that this study was based on one year's data. Therefore, to further refine this work, it would be necessary to extend this analysis over several years and to add relevant features. Such an extension would enable better adaptation and training of the models, resulting in more accurate predictions. Additionally, expanding our evaluation to include other IAQ parameters will provide a more comprehensive understanding of indoor environmental quality. Furthermore, integrating derivatives into the models would allow predicted values to be calculated based on previous measurements, enhancing prediction accuracy and overall performance of the system.

5. ACKNOWLEDGEMENT

This work was performed within the frame of the research projects : CoLoC (Comfort of Connected Dwellings) granted by the “France Relance” plan for the preservation of R&D employment, and ACQA (Air Quality Acquisition and Characterization) granted by the University of Angers as part of the call for projects on participatory science.

6. BIBLIOGRAPHIE

- Chen, Shisheng, Kuniaki Mihara, et Jianxiu Wen. 2018. « Time series prediction of CO₂, TVOC and HCHO based on machine learning at different sampling points ». *Building and Environment* 146: 238-46. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.09.054>.
- Di Gilio, Alessia, Jolanda Palmisani, Manuela Pulimeno, Fabio Cerino, Mirko Cacace, Alessandro Miani, et Gianluigi de Gennaro. 2021. « CO₂ concentration monitoring inside educational buildings as a strategic tool to reduce the risk of Sars-CoV-2 airborne transmission ». *Environmental Research* 202 : 111560. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.111560>.
- Diffey, B.L. 2011. « An Overview Analysis of the Time People Spend Outdoors: Time Spent Outdoors ». *British Journal of Dermatology* 164 (4): 848-54. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2133.2010.10165.x>.
- Ferrari, S., T. Blázquez, R. Cardelli, G. Puglisi, R. Suárez, et L. Mazzarella. 2022. « Ventilation strategies to reduce airborne transmission of viruses in classrooms: A systematic review of scientific literature ». *Building and Environment* 222: 109366. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109366>.
- Gameiro Da Silva, Manuel, Evandro Eduardo Broday, et Celestino Rodrigues Ruivo. 2023. « Indoor Climate Quality Assessment in Civil Aircraft Cabins: A Field Study ». *Thermal Science and Engineering Progress* 37: 101581. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2022.101581>.
- Kallio, Johanna, Jaakko Tervonen, Pauli Räsänen, Riku Mäkynen, Jani Koivusaari, et Johannes Peltola. 2021. « Forecasting Office Indoor CO₂ Concentration Using Machine Learning with a One-Year Dataset ». *Building and Environment* 187: 107409. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107409>.
- Li, Wenzhuo, Choongwan Koo, Taehoon Hong, Jeongyoon Oh, Seung Hyun Cha, et Shengwei Wang. 2020. « A Novel Operation Approach for the Energy Efficiency Improvement of the HVAC System in Office Spaces through Real-Time Big Data Analytics ». *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 127: 109885. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109885>.
- Park, Dong-Uk, et Kwon-Chul Ha. 2008. « Characteristics of PM₁₀, PM_{2.5}, CO₂ and CO monitored in interiors and platforms of subway train in Seoul, Korea ». *Environment International*, Assessment of Urban and Regional Air Quality and its Impacts, 34 (5): 629-34. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2007.12.007>.
- Senders, Joeky T., Mark M. Zaki, Aditya V. Karhade, Bliss Chang, William B. Gormley, Marika L. Broekman, Timothy R. Smith, et Omar Arnaout. 2018. « An Introduction and Overview of Machine Learning in Neurosurgical Care ». *Acta Neurochirurgica* 160 (1): 29-38. <https://doi.org/10.1007/s00701-017-3385-8>.
- Taheri, Saman, et Ali Razban. 2021. « Learning-Based CO₂ Concentration Prediction: Application to Indoor Air Quality Control Using Demand-Controlled Ventilation ». *Building and Environment* 205 (novembre): 108164. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108164>.
- WHO. 2021. « Roadmap to Improve and Ensure Good Indoor Ventilation in the Context of COVID-19 ». 2021. <https://www.who.int/publications-detail-redirect/9789240021280>.

Low-Tech et énergie : une manière de repenser nos conceptions et usages énergétiques

Sacha Hodencq*¹, Guillaume Guimbretière², Emmanuel Laurent³

¹ Univ. Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP*, G2Elab, 38000 Grenoble, France

² Laboratoire TREE - UMR 6031, CNRS, Université de Pau et des Pays de l'Adour, Pau, France

³ Collectif La MYNE, 1 rue du luizet, 69100 Villeurbanne, France

*sacha.hodencq@univ-grenoble-alpes.fr

RESUME. L'écart entre les ambitions de transition énergétique et les effets observés d'accroissement des inégalités et de détérioration des conditions biophysiques d'habitabilité de la Terre invite la recherche en modélisation énergétique à un recul réflexif sur son activité. La démarche Low-Tech, portée par des collectifs et penseurs contemporains, invite à l'examen critique de nos activités, et permet de considérer des concepts peu explorés dans les travaux de recherche, tels que la sobriété, la justice énergétique ou encore le cosmocalisme. Cet article présente cette démarche via différentes perspectives, et esquisse son application à la modélisation énergétique depuis l'échelle de l'objet technique jusqu'à celle du territoire. Cela ouvre une variété de pistes de recherche allant d'aspects méthodologiques au développement de cas d'étude. Cet article est également une invitation à collaborer au sein d'une communauté transdisciplinaire : Low-Tech Recherche et Enseignement.

MOTS-CLÉS : Low-Tech, énergie, conception.

ABSTRACT. The gap between the ambitions of energy transition, and the observed effects of growth of both inequalities and deterioration of biophysical conditions of Earth habitability urge research in the field of energy modelling to experience a reflexive perspective. The Low-Tech approach, developed but contemporary thinkers and collectives, invite to the critical assessment of our activities, and enable to consider concepts understudied in research work such as energy sufficiency, justice or cosmocalism. This article introduces this approach through various perspectives and seeks to apply it to energy modelling from the scale of items to that of cities. It opens a variety of research tracks ranging from methodological approaches to use cases. This article also invites to collaboration with a transdisciplinary community: Low-Tech for Research and Teaching.

KEYWORDS: Low-Tech, energy, design.

1. INTRODUCTION

Dans leur conception et leurs usages, les systèmes énergétiques qui nous entourent ont des impacts importants, qu'ils soient environnementaux ou sociaux. La solution communément retenue est une transition de nature substitutive vers les énergies bas-carbone. Malheureusement, cela semble insuffisant dans les tendances économiques et de consommation de ressources actuelles (Bihouix 2019), avec une intensification des dynamiques de dépassement des limites planétaires et d'accroissement des inégalités. Avec la nécessité d'aborder différemment la question énergétique, la démarche Low-Tech apparaît comme un prisme intéressant pour explorer avec un regard critique la soutenabilité des systèmes techniques, tout en se préoccupant d'enjeux de justice et d'organisation.

Cet article a pour objectifs de (i) présenter la démarche Low-Tech via un rapide historique et une synthèse des définitions les plus récentes ; (ii) introduire l'intérêt de la Low-Tech appliquée au domaine de l'énergie, en se rapprochant de différents concepts existants en lien avec l'activité de modélisation énergétique ; (iii) inviter à la réflexivité et la collaboration pour toute chercheuse ou chercheur qui serait intéressé·e par l'initiation d'un travail collaboratif et ouvert sur la thématique Low-Tech et énergie.

2. HISTOIRE ET DEFINITIONS DES LOW-TECH

Le terme Low-Tech s'est construit par opposition au solutionnisme high-tech, et s'enracine dans un courant techno-critique historique. Ici, nous nous limitons à l'introduction d'auteurs techno-critiques majeurs de la littérature d'après-guerre, où dans le contexte des crises énergétiques et sociales des années 1960-70, la nature et la place de la technique dans nos sociétés sont questionnées (Socialter 2019). Les technologies souhaitables à développer sont ainsi définies comme intermédiaires par Ernst Friedrich Schumacher, conviviales par Ivan Illich, autonomes par André Gorz, libératrices par Murray Bookchin, ou encore démocratiques par Lewis Mumford. Ces approches ont en communs de mettre en avant la petite échelle, la sobriété, le respect de l'environnement, la place de la main d'œuvre ; et soulignent surtout la non-neutralité de la technique. La Low-Tech doit aujourd'hui relever les défis de la démocratisation, notamment par rapport aux technologies appropriées ; sans tomber dans l'écueil du marché de masse par rapport à l'innovation frugale.

De nombreux auteurs s'accordent sur la difficulté de définir la démarche Low-Tech, notamment entre approche matérielle et politique, et vus l'aspect systémique dans la considération des techniques (Carrey, Lachaize, et Carbou 2020), la variété de définitions des termes « technique » et « technologie » selon les disciplines (Mateus et Roussilhe 2023) ou simplement l'hétérogénéité des points de vue au sein de ce mouvement (Tanguy, Carrière, et Laforest 2023).

Il est difficile de savoir où est utilisée pour la première fois l'expression Low-Tech. En France, l'expression devient visible il y a une dizaine d'années avec la création de l'association Low-Tech Lab en 2013 et la sortie du livre *L'Âge des Low-Tech* de l'ingénieur Philippe Bihoux en 2014. La Low-Tech est alors pensée comme un objet technique aux attributs reprenant ceux pensés dans les années 70 : le point de départ est un questionnement des besoins (Bihoux 2014) et les Low-Tech une réponse technique **Durable** (réparable, robuste, modulaire, et limitant leurs impacts écologiques, sociaux ou sociétaux sur tout leur cycle de vie), **Accessible** (en termes de coûts, de ressources et de savoir-faire) et **Utile** (réponse aux besoins de base) (Low-Tech Lab 2024). Les dispositifs conçus favorisent le développement d'une culture technique forte partagée dans les groupes sociaux. Avec le recul d'une vision systémique, les Low-Tech peuvent-être vues comme les « briques techniques élémentaires d'une société pérenne, équitable et conviviale » (Carrey, Lachaize, et Carbou 2020). En 2022, un travail de synthèse de l'ADEME présente la Low-Tech comme une démarche plutôt qu'une solution technique finale (Bonjean et al. 2022). Cette dernière étant finalement pertinente et efficace dans un contexte et pour des utilisateurs donnés, elle se doit d'être **locale** et favorisant l'**autonomie**. La démarche Low-Tech est alors garante d'une durabilité forte, de résilience collective et de transformation culturelle (Keller et Bournigal 2022).

L'ouvrage *Perspectives Low-Tech* (Mateus et Roussilhe 2023) offre une prise de recul sur ces définitions. Les auteurs, partant de la définition de la démarche Low-Tech de la Fabrique Écologique (*pourquoi-quoi-comment produire ?*), y désignent un oubli important : qui se pose ces questions, et qui

y répond ? Ils invitent ainsi à réfléchir à « comment reprendre part, collectivement et démocratiquement, à l'orientation technique de nos sociétés ? ». Concernant le triptyque *utile-durable-accessible*, ils soulignent que la notion d'utilité et de besoins associés est très difficile à qualifier car relative, et sans doute peu pertinente s'il s'agit de réduire nos consommations. Ils reformulent ainsi l'utilité avec la notion de *suffisance*, qui ne peut s'incarner que collectivement et dans le respect des limites planétaires. Ils posent ainsi la question : « Qu'est-ce qui nous suffit collectivement pour nous épanouir dans un monde contraint ? » ; et concluent à nouveau sur l'importance de la démocratie dans nos choix techniques pour y répondre.

Ainsi, la démarche Low-Tech est bien loin de la technophobie ou du low-cost avec lesquels elle est parfois confondue : elle associe aux considérations de soutenabilité et d'équité un regard critique sur nos systèmes techniques et les conditions sociales, culturelles et politiques les ayant engendrés. Au-delà d'avantages quantitatifs en termes de maîtrise de l'énergie ou d'économies, la Low-Tech peut également donner confiance en la capacité d'action citoyenne, offrir des moments conviviaux autour de la pratique manuelle, ou encore accompagner la présentation des enjeux énergétiques.

Si cette démarche est issue de mouvements citoyens et de leurs connaissances expérientielles, la recherche peut contribuer à son développement. La Low-Tech pénètre le milieu académique de plusieurs façons : les low-tech pour la recherche (instrumentation scientifique low-tech), la recherche sur la Low-Tech (le développement de solutions techniques), la Low-Tech pour l'enseignement ou l'enseignement sur la Low-Tech (Guimbretière, Hodencq, et Balland 2022). Le concept Low-Tech est lui-même objet de recherche : Tanguy *et al.* ont ainsi mené une revue de la littérature et des entretiens avec des acteurs du domaine pour clarifier les contours de ce concept. Elles ont ainsi dégagé 7 principes clés de la Low-tech (Tanguy, Carrière, et Laforest 2023), impliquant des changements – **Techniques** (avec l'économie de ressources, et l'allongement de la durée de vie) – **Sociaux** (avec l'appropriation, l'adéquation aux besoins) – **Organisationnels** (avec la dépendance au contexte, la résilience et la collaboration). Les auteurs insistent en particulier sur les principes aujourd'hui peu présents dans les discours sur la soutenabilité (e.g. l'adéquation aux besoins en fonction du contexte, l'appropriation) et qui apparaissent comme des points critiques dans le développement de la démarche. Ces différents principes invitent à penser des systèmes énergétiques plus justes et soutenables.

3. DEMARCHE LOW-TECH APPLIQUEE A L'ENERGIE

La démarche Low-Tech permet de considérer les problématiques liées à la conception et aux usages énergétiques, en particulier à l'échelle des quartiers et bâtiments. Cette section commence par relier cette démarche à des concepts de la littérature avant de présenter les pistes de recherche qu'elle ouvre.

3.1. SOBRIETE, JUSTICE ENERGETIQUE ET COSMOLOCALISME

Les changements sociaux et organisationnels qu'appelle la démarche Low-Tech et qui apparaissent comme critiques ont notamment été explorés sur des systèmes énergétiques par le mouvement du **Cosmolocalisme** (Kostakis et al. 2018). Le principe phare de ce mouvement est : *design global, manufacture local* – une conception développée, partagée et améliorée mondialement ; et une fabrication avec prise en compte des ressources (matérielles, énergétiques), conditions biophysiques, compétences et besoins au niveau local. On a ainsi une mutualisation des produits et outils de production, dont l'accessibilité réduit les coûts d'investissements et de maintenance, et un système de production à

but non-lucratif et « à la demande », évitant obsolescence programmée et surproduction. Kostakis *et al.* présentent notamment des cas d'hydroliennes et éoliennes de petites échelles suivants ces principes.

Concernant les changements techniques, la démarche Low-Tech permet de considérer les enjeux de soutenabilité forte des composants et systèmes énergétiques sur l'ensemble de leur cycle de vie, avec comme lignes directrices :

- la diminution de consommation de ressources matérielles et énergétiques.
- l'augmentation de la durée de vie, de la robustesse et de la réparabilité.

Ces deux lignes directrices permettent tout d'abord de réduire drastiquement la consommation de ressources matérielles dans le déploiement des systèmes énergétiques, le développement de sources d'énergies renouvelables ayant été identifié comme très consommateur de ressources, et incertain dans sa dynamique de déploiement (Vidal, Le Boulzec, et François 2018).

Ensuite, la diminution de consommation énergétique se rapporte à la notion de sobriété, dont la démarche Low-Tech est souvent rapprochée. La **sobriété énergétique** a été identifiée comme un levier de choix pour réduire les impacts socio-écologiques du secteur de l'énergie en complément d'autres leviers (développement d'énergie renouvelable en remplacement d'énergie carbonée, efficacité énergétique), notamment dans les pays développés (Ivanova et al. 2020). Si la contribution de la sobriété à la transition énergétique est jusqu'ici rarement explorée par rapport au seul recours à la technologie (Samadi et al. 2017), elle commence à apparaître dans des scénarios de référence en France, avec les scénarios Transition(s) 2050 de l'ADEME (dont un scénario Low-Tech !) et Futurs énergétiques de RTE en plus des travaux historiques de l'association négaWatt, et dans le monde avec la mention explicite de politiques de « sufficiency » dans le rapport du GIEC en 2022. La sobriété énergétique peut se définir comme la réduction de la demande d'énergie de manière durable sans descendre en dessous des besoins fondamentaux des personnes (Bierwirth et Thomas 2019). Aussi, sobriété et justice énergétique sont deux notions complémentaires.

La **justice énergétique** comprend trois volets : le premier concerne l'accès équitable à l'énergie (justice de distribution), le deuxième la reconnaissance de différentes perspectives et des situations de précarité (justice de reconnaissance), et le troisième l'accès aux espaces de participation et de prise de décision (justice de procédure) (Jenkins et al. 2016). La justice énergétique, et en particulier ses dernières facettes, sont très peu considérées dans les outils de modélisation énergétique (Vågerö et Zeyringer 2023). Aussi des approches Low-Tech pourraient permettre de les explorer et désinvisibiliser, là où, comme évoqué précédemment, la démocratie technique est au cœur des démarches Low-Tech. En outre, l'accessibilité financière et l'ouverture des connaissances de la démarche tendent à favoriser l'accès et la réparabilité de systèmes énergétiques dans des zones isolées ou pour les plus précaires.

3.2. APPROCHES METHODOLOGIQUES ET APPLICATIFS POUR LA CONCEPTION LOW-TECH

La démarche Low-Tech, en se faisant le prisme intégrateur de différents concepts clés, peut permettre de réenvisager les méthodologies de conceptions des systèmes énergétiques aux échelles locales. Des méthodes de conception via le prisme Low-Tech commencent par questionner le besoin, et cherchent au maximum à intégrer les personnes utilisatrices à la conception, mobilisant des pratiques de recherche participatives. Colin et Martin (Colin et Martin 2023) présentent par exemple des principes de conception pour des objets low-tech plaçant la personne utilisatrice au centre de la démarche. La

modélisation énergétique d'un territoire ou d'un quartier peut ainsi intégrer des procédés de modélisation participative (McGookin, Ó Gallachóir, et Byrne 2021), pour replacer le modèle au contact du contexte réel d'usage. Ces approches n'ont pas pour objectif une forme d'acceptabilité sociale superficielle, mais bien une intégration sur l'ensemble du processus de conception, une clé pour des politiques énergétiques soutenables. Les low-tech étant des objets praticables et perceptibles, ils sont de bons candidats d'objets frontières entre sciences et société.

En outre, des processus de modélisation suivant la démarche Low-Tech sont ouverts et collaboratifs, permettant de bénéficier de connaissances à l'échelle mondiale, appliquées en réponse à un besoin exprimé localement : on retrouve la démarche de cosmocalisme. Prenant acte des menaces à une société conviviale d'Ivan Illich, Lizzaralde et Tyl proposent des recommandations dans cette voie, à la fois pour la conception de produits et pour les systèmes sociotechniques dans lesquels ils s'insèrent sur l'ensemble de leur cycle de vie (Lizzaralde et Tyl 2018). On ne cherche ainsi pas à développer une solution unique applicable partout, mais bien un système favorisant l'autonomie et prenant en compte les ressources et besoins locaux tout en étant soutenable à l'échelle mondiale.

Des méthodes de conceptions Low-Tech intègrent différents critères techniques, écologiques, économiques et sociaux ; mais considéreront également l'accessibilité du système à la compréhension, et à la compétence pour sa fabrication, son entretien et sa réparation. Kathleen Mallard (Mallard 2020) a développé une telle méthodologie comprenant un ensemble d'indicateurs et modes d'évaluation associés ainsi qu'une mise en dialogue des parties prenantes, appliquée à une hydrolienne pour micro-réseau isolé. Le Centre Scientifique et Technique du Bâtiment propose également 17 indicateurs de démontabilité, réemployabilité et recyclage des matériaux et composants du bâtiment, complémentaires de mesures d'impacts environnementaux (CSTB 2023).

De telles méthodes permettent d'explorer des cas d'étude concrets de systèmes énergétiques Low-Tech, à différentes échelles et pour différents enjeux, tels que présentés dans le Tableau 1.

Échelle	Exemples - Travaux
Objet technique	Petit éolien – hydrolien, capteurs à air chaud, solaire thermique à concentration (Bonjean et al. 2022), métallurgie solaire (Carrey, Lachaize, et Carbou 2020), micro-méthanisation, solaire photovoltaïque direct (Decker 2023)
Bâtiment	Habitat low-tech, expérimentations « Biosphères » 1-3 (Low-Tech Lab 2024), Low-tech dans les bâtiments collectifs (Inddigo 2023)
Quartier et ville	Concepts et pratiques pour une ville (s)low tech (Florentin et Ruggeri 2019; Lopez et al. 2021), Micro-réseaux gérés en Communs (Giotitsas et al. 2022)

Tableau 1 : Échelles et exemples d'application de la démarche Low-Tech pour l'énergie.

Différents travaux et enjeux peuvent intervenir sur ces exemples : des modèles d'optimisation pour la conception technique de composants ou systèmes, avec un équilibre économique et la minimisation des impacts socio-écologiques, mais également des contraintes liées aux verrous normatifs. Ces cas d'étude peuvent également donner lieu à des approches comparatives dans des modèles de simulation multi-énergie, considérant de manière systémique et interdisciplinaire les avantages et limites de systèmes low-tech par rapport aux systèmes actuels. On pourra par exemple s'interroger sur le type de vecteur énergétique à mobiliser en fonction de l'usage sur un territoire : gaz, électricité issue du réseau ou de ressources locales, bois, solaire - selon une variété de critères (e.g. exergétiques, économiques,

organisationnels, ...). Au-delà de la modélisation, les pratiques de recherche peuvent également réinterroger l'appropriation des techniques ou le lien social par des approches participatives.

Par ailleurs, ces méthodes doivent s'articuler avec un recul critique sur les systèmes techniques, qui comme on l'a vu, se trouve aux racines du mouvement Low-Tech. On prendra ainsi garde de considérer, dans l'exercice de conception et dans ses résultats, différents effets (Bihouix 2014) : effet rebond ; effet sillon (ou dépendance au sentier, i.e. difficulté à s'écarter d'un modèle de système technique une fois engagé dans ce modèle) ; effet de parc, qui rend compte de l'inertie de la mise en œuvre d'une technologie performante dans un parc existant ; ou encore effet d'échelle. Concernant la réflexion sur les échelles, différents auteurs recommandent de rendre visible les flux énergétiques et leurs impacts (Florentin et Ruggeri 2019; Mateus et Roussilhe 2023), d'autant que la sobriété facilite cette exploration de nos dépendances en les rendant moins nombreuses et plus lisibles. Cette question d'échelle permet également de s'interroger sur la notion d'autonomie énergétique (ou d'autoconsommation) parfois mise en avant dans les modèles énergétiques : quelle échelle pertinente pour échapper à l'autonomie autarcique, et viser une autonomisation collective par le choix de nos interdépendances ?

Enfin, pour aller au bout de cet exercice critique de réflexivité, nous pouvons nous interroger sur les crises écologiques et énergétiques en cours, et les considérer au sein même de nos questions de recherche. Tomlinson *et al.* invitent ainsi à penser nos recherches pour l'étude, la conception et le développement de systèmes sociotechniques dans le présent abondant pour une utilisation dans un futur de rareté d'énergie et de matière (Tomlinson et al. 2013).

4. UN ESPACE DE COLLABORATION : LOW-TECH RECHERCHE ET ENSEIGNEMENT

Après avoir présenté une recherche sur la Low-Tech dans la section précédente, nous proposons une manière de mettre en œuvre des pratiques de recherche Low-Tech à travers un travail qui se veut ouvert et démocratique. Afin d'engager une réflexion collective et sur le long terme, nous proposons de prendre cet article comme point de départ d'un cycle d'ateliers collaboratifs sur la démarche Low-Tech appliquée à l'énergie. Pour cela, nous pouvons bénéficier de la communauté Low-Tech Recherche et Enseignement (LowTRE). Lancée en 2020, cette communauté rassemble aujourd'hui 240 membres se rassemblant sur un forum en ligne ainsi que dans des événements (e.g. webinaires, ateliers de travail en ligne et journées d'échange), et est notamment composée d'enseignants-chercheurs, doctorants, étudiants, membres du milieu associatif et membres d'entreprises.

Une publication sur ce forum a ainsi été initiée¹. Elle permettra d'ouvrir un espace transdisciplinaire et de faire le lien entre cet article et la suite d'ateliers ouverts, d'échanges et de productions qui en découleront et enrichiront notre vision. Seront notamment considérés : une version évolutive de cet article pour éviter l'effet « figé » de la publication ponctuelle d'un article sur un domaine en évolution rapide, ou encore des publications complémentaires voire un dossier dédié.

5. CONCLUSION

Cet article a pour intention de présenter la démarche Low-Tech et de discerner les pistes de recherche qu'elle ouvre dans le domaine de l'énergie aux échelles du bâtiment et du territoire. Low-Tech ou non, il nous paraît essentiel de considérer les aspects critiques et sous-étudiés que sont la sobriété, la justice

¹ <https://forum-lowtre-ecosesa.univ-grenoble-alpes.fr/t/low-tech-et-energie-lancement-dateliers-collaboratifs/772>

énergétique, ou encore la sauvegarde des matériaux ; via des approches ouvertes et participatives en réponse à des besoins exprimés localement. Cela passe par une variété d'indicateurs permettant d'évaluer des enjeux sociaux, écologiques, économiques et techniques, et un recul critique quant au développement et à la gestion de nos systèmes énergétiques. Des perspectives à ce constat consistent en un travail collaboratif et transdisciplinaire sur la question, dont nous avons tenté de réunir les conditions nécessaires pour que toute personne concernée puisse rejoindre la réflexion. Peuvent dès lors être développées des méthodologies, cas d'études et approches comparatives, ainsi qu'une réflexion de fond sur nos questions de recherche, prenant acte de la nécessité de penser les crises en cours et à venir.

6. BIBLIOGRAPHIE

- Bierwirth, Anja, et Stefan Thomas. 2019. « Energy Sufficiency in Buildings ». *Wuppertal Institute for Climate, Environment and Energy*, 2019, eceee concept papers édition. <https://www.energysufficiency.org/libraryresources/library/items/energy-sufficiency-in-buildings-concept-paper/>.
- Bihouix, Philippe. 2014. *L'Âge des low tech. Vers une civilisation techniquement soutenable: Vers une civilisation techniquement soutenable*. Le Seuil.
- . 2019. « La transition énergétique peut-elle être low-tech ? » *Revue internationale et stratégique* 113 (1): 97-106. <https://doi.org/10.3917/ris.113.0097>.
- Bonjean, Anne-Charlotte, Erwann Fangeat, ADEME, Astrid Forget, Alan Fustec, Camille Habe, Romain Jaeger, et al. 2022. « État des lieux et perspectives des démarches « low-tech ». » ADEME. <https://bibliothèque.ademe.fr/dechets-economie-circulaire/5421-demarches-low-tech.html>.
- Carrey, Julian, Sébastien Lachaize, et Guillaume Carbou. 2020. « Les low-techs comme objet de recherche scientifique. Vers une société pérenne, équitable et conviviale ». *La Pensée écologique* N° 5 (1): 7-7.
- Colin, Clément, et Antoine Martin. 2023. « The user experience of low-techs: from user problems to design principles ». *Journal of User Experience* 18 (2): 68-85. <https://doi.org/10.5555/3604890.3604892>.
- CSTB. 2023. « Ecoscale - L'évaluation environnementale du CSTB ». <https://evaluation.cstb.fr/fr/ecoscale/>. 2023.
- Decker, Kris De. 2023. « Direct Solar Power: Off-Grid Without Batteries ». *LOW←TECH MAGAZINE*. 25 août 2023. <https://solar.lowtechmagazine.com/2023/08/direct-solar-power-off-grid-without-batteries/>.
- Florentin, Daniel, et Charlotte Ruggeri. 2019. « #12 / Édito : ville (s)low tech et quête d'une modernité écologique : Urbanités ». 2019. <http://www.revue-urbanites.fr/12-edito/>.
- Giotitsas, Chris, Pedro H. J. Nardelli, Sam Williamson, Andreas Roos, Evangelos Pournaras, et Vasilis Kostakis. 2022. « Energy Governance as a Commons: Engineering Alternative Socio-Technical Configurations ». *Energy Research & Social Science* 84 (février): 102354. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2021.102354>.
- Guimbretière, Guillaume, Sacha Hodencq, et Martial Balland. 2022. « Une approche de la Low-tech dans l'Enseignement Supérieur et la Recherche ». *La pensée écologique* (blog). 2022. <https://lapenseeecologique.com/une-approche-de-la-low-tech-dans-lenseignement-superieur-et-la-recherche/>.
- Inddigo. 2023. « Mettre en œuvre les low-tech dans les bâtiments collectifs ». Inddigo, le blog. 4 avril 2023. <https://blog.inddigo.com/le-lab-inddigo/mettre-en-oeuvre-les-low-tech-dans-les-batiments-collectifs-2052/>.

- Ivanova, Diana, John Barrett, Dominik Wiedenhofer, Biljana Macura, Max Callaghan, et Felix Creutzig. 2020. « Quantifying the Potential for Climate Change Mitigation of Consumption Options ». *Environmental Research Letters* 15 (9): 093001. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab8589>.
- Jenkins, Kirsten, Darren McCauley, Raphael Heffron, Hannes Stephan, et Robert Rehner. 2016. « Energy justice: A conceptual review ». *Energy Research & Social Science* 11 (janvier): 174-82. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2015.10.004>.
- Keller, Arthur, et Emilien Bournigal. 2022. « Infographie « Low-tech : Assurer durablement l'essentiel pour tous » regroupant les critères de toute démarche d'innovation low-tech ». In *Wikipédia*. <https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Low-tech&oldid=212050891>.
- Kostakis, Vasilis, Kostas Latoufis, Minas Liarokapis, et Michel Bauwens. 2018. « The Convergence of Digital Commons with Local Manufacturing from a Degrowth Perspective: Two Illustrative Cases ». *Journal of Cleaner Production* 197 (octobre): 1684-93. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.09.077>.
- Lizarralde, Iban, et Benjamin Tyl. 2018. « A framework for the integration of the conviviality concept in the design process ». *Journal of Cleaner Production, Technology and Degrowth*, 197 (octobre): 1766-77. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.03.108>.
- Lopez, C, N Le Bot, O. Soulard, P Detavernier, A. Heil Selimanovski, F Tedeschi, Ph Bihouix, et A. Papay. 2021. « La ville Low Tech ». ADEME - Institut Paris Region - AREP. <https://bibliothèque.ademe.fr/urbanisme-et-batiment/5219-la-ville-low-tech.html>.
- Low-Tech Lab. 2024. « Low-tech Lab – Les actions du Low-tech Lab ». 2024. <https://lowtechlab.org/fr/le-low-tech-lab/les-actions>.
- Mallard, Kathleen. 2020. « Démarche de conception multicritère de système de production d'énergie : application à une hydrolienne durable et résiliente pour micro-réseau isolé ». Phdthesis, Université Grenoble Alpes [2020-.....]. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-03102861>.
- Mateus, Quentin, et Gauthier Roussilhe. 2023. *Perspectives low-tech*. Editions Divergences. <https://www.editionsdivergences.com/livre/perspectives-low-tech>.
- McGookin, Connor, Brian Ó Gallachóir, et Edmond Byrne. 2021. « Participatory methods in energy system modelling and planning – A review ». *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 151 (novembre): 111504. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111504>.
- Samadi, Sascha, Marie-Christine Gröne, Uwe Schneidewind, Hans-Jochen Luhmann, Johannes Venjakob, et Benjamin Best. 2017. « Sufficiency in Energy Scenario Studies: Taking the Potential Benefits of Lifestyle Changes into Account ». *Technological Forecasting and Social Change* 124 (novembre): 126-34. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2016.09.013>.
- Socialter, Hors-série N°6. 2019. *L'avenir sera Low-Tech*. <https://www.socialter.fr/produit/hors-serie-n-6>.
- Tanguy, Audrey, Lisa Carrière, et Valérie Laforest. 2023. « Low-tech approaches for sustainability: key principles from the literature and practice ». *Sustainability: Science, Practice and Policy* 19 (1): 2170143. <https://doi.org/10.1080/15487733.2023.2170143>.
- Tomlinson, Bill, Eli Blevis, Bonnie Nardi, Donald J. Patterson, M. SIX Silberman, et Yue Pan. 2013. « Collapse informatics and practice: Theory, method, and design ». *ACM Transactions on Computer-Human Interaction* 20 (4): 24:1-24:26. <https://doi.org/10.1145/2493431>.
- Vågerö, Oskar, et Marianne Zeyringer. 2023. « Can We Optimise for Justice? Reviewing the Inclusion of Energy Justice in Energy System Optimisation Models ». *Energy Research & Social Science* 95 (janvier): 102913. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2022.102913>.
- Vidal, Olivier, Hugo Le Boulzec, et Cyril François. 2018. « Modelling the Material and Energy Costs of the Transition to Low-Carbon Energy ». Édité par L. Cifarelli et F. Wagner. *EPJ Web of Conferences* 189: 00018. <https://doi.org/10.1051/epjconf/201818900018>.

Collecte de données multi-paramètres dans des logements : une base de données exhaustive pour l'évaluation du confort intérieur

Valentin Hoyet^{1,2*}, Maxime Robillart^{2,3,4}, Marie-Lise Pannier^{1*}

¹ Univ Angers, LARIS, SFR MATHSTIC, F-49000 Angers, France

² Kocliko, 74 cours Aristide Briand, 33000 Bordeaux, France

³ Univ. Bordeaux, CNRS, Bordeaux INP, I2M, UMR 5295, F-33400, Talence, France

⁴ Arts et Métiers Institute of Technology, CNRS, Bordeaux INP, Hesam Université, I2M, UMR 5295, F-33400 Talence, France

*marie-lise.pannier@univ-angers.fr

RESUME. L'évaluation du confort intérieur dans les logements revêt une importance croissante pour garantir des environnements sains et agréables. Toutefois, ce type d'évaluation dépend de la disponibilité de données collectées en situation réelle. Cet article présente une base de données, recueillie depuis juin 2022, dans trois maisons et six appartements de participants volontaires, situés dans deux zones géographiques françaises. La base de données offre un aperçu détaillé des paramètres environnementaux (température, humidité, taux de CO₂, niveau sonore) et du comportement des occupants (gestion des ouvertures de fenêtres) sur une période étendue. Le ressenti thermique a aussi été collecté pendant une courte période. Les possibilités offertes par cette base sont multiples et l'article expose son intérêt pour l'étude du confort au travers d'exemples. Les conclusions visent à identifier les usages actuels, éclairer sur les pratiques plus ou moins optimales et à formuler des recommandations pour un confort intérieur amélioré, tenant compte des préférences des occupants et de la qualité environnementale.

MOTS-CLÉS : Base de données, Confort intérieur, Logement.

ABSTRACT. Assessing indoor comfort in housing is becoming increasingly important to ensure healthy and pleasant environments. However, data collected in real-life situations are required to perform such assessment. This article presents a database, collected since June 2022, in three houses and six apartments of volunteer participants, located in two French geographical areas. The database provides a detailed overview of environmental parameters (temperature, humidity, CO₂ and noise levels) and occupant behavior (management of window openings) over an extended period. Thermal feedback was also collected over a short period. The possibilities offered by this database are manifold, and the article uses examples to illustrate its relevance to the study of indoor comfort. The conclusions are aimed at identifying current practices, shedding light on more or less optimal ventilation practices and formulating recommendations for improved indoor comfort, taking into account occupant preferences and environmental quality.

KEYWORDS : Database, Indoor comfort, House.

1. INTRODUCTION

Plus de 80 % de notre temps est occupé par des activités en intérieur (Diffey 2011). Pour assurer bien-être et santé aux individus, les ambiances intérieures doivent alors être saines et confortables, aussi bien sur les plans hygrothermiques, que lumineux, acoustique ou encore de la qualité de l'air intérieur. Cet article s'inscrit dans le cadre de travaux en lien avec le maintien du confort thermique estival dans des logements sociaux, sans utilisation de systèmes de rafraîchissement actif. L'objectif global du projet est de mieux comprendre le ressenti thermique des occupants, d'identifier les pratiques ayant une

influence sur le confort thermique et de fournir des conseils aux occupants et aux bailleurs pour leur suggérer une gestion thermique plus optimale. Pour cela, des études en lien avec la prédiction individualisée du ressenti thermique (Hoyet et al. 2022) et avec la gestion des ouvertures de fenêtres (Hoyet et al. 2023) sont en cours. Avant de déployer les modèles et méthodes développés à l'échelle du parc de logements sociaux, de premières analyses sont menées sur quelques logements. Pour cela, une base de données de confort thermique est nécessaire. Des bases de données contenant des données de confort thermique mondiales – telle que la très utilisée base ASHRAE (Földvary Licina et al. 2018) – régionales (Du et al. 2022), ou plus locales (Oze Energies 2016) existent déjà. Les données disponibles dans ces bases concernent peu les logements situes en France et ne permettent pas de réaliser l'ensemble des analyses envisagées. Il a donc été choisi de développer une base de données spécifique au projet, en demandant à des participants volontaires d'installer des équipements connectés à leurs domiciles pour mesurer des données d'ambiance et des evenements d'ouverture ou de fermeture des fenêtres.

Cet article présente la base de données actuellement constituée pour étudier le confort thermique dans des logements en été. Après une description des équipements de mesures du confort et des logements instrumentes, quatre exemples d'analyse des résultats sont traites ; ils visent notamment à mieux comprendre les ressentis et comportements lies au confort thermique.

2. METHODOLOGIE DE COLLECTE DES DONNEES

La création de la base de données s'inscrit dans un contexte de sciences participatives. Des équipements connectés permettant d'évaluer le confort intérieur sont fournis à des participants volontaires, accompagnes de fiches expliquant comment les installer et les mettre en fonctionnement. Au besoin, des informations complémentaires sont transmises par mail ou téléphone aux participants. Deux types d'équipements de mesure (references au Tableau 1) sont fournis : d'une part une station connectée Netatmo permettant d'enregistrer plusieurs paramètres du confort intérieur, et d'autre part des capteurs d'ouverture de fenêtre enregistrant chaque evenement d'ouverture ou de fermeture.




	Équipements	Grandeurs mesurées	
Données d'ambiance		Station Météo Netatmo (à gauche) / Capteur de la qualité de l'air intérieur Netatmo (à droite)	<u>Intérieur</u> : température [C], humidité [%], taux de CO ₂ [ppm], niveau sonore [dB], pression [hPa] <u>Extérieur</u> : température [C], humidité [%]
Ouvertures des fenêtres		Aqara Door and Windows Sensor (en haut) / Philio PST02-C (en bas)	Ouvertures ou fermetures de fenêtres
Transmission des données d'ouverture		Box domotique eedomus / Passerelle ZiGate	-

Tableau 1 : Equipements connectés utilises pour la collecte de données.

Les capteurs Netatmo mesurent toutes les 5 min des paramètres d'ambiance intérieure : la température, l'humidité relative, le taux de CO₂, le niveau sonore et la pression. Les capteurs de type « Station Météo » sont fournis avec un module extérieur enregistrant la température et l'humidité relative. La transmission des données se fait en Wifi via la box internet des participants. Les données mesurées sont stockées par Netatmo et peuvent être extraites à différents pas de temps via une API. En cas d'absence de connexion à internet, une carte de stockage permet d'enregistrer les données mesurées pendant une semaine.

Des capteurs d'ouverture de fenêtres sont également mis à disposition. Ils permettent d'enregistrer chaque événement d'ouverture ou de fermeture de fenêtre. Pour des raisons de complexité d'approvisionnement en capteurs, deux technologies ont été fournies aux participants. Certains ont reçu des capteurs Aqara, transmettant les données en Zigbee ; d'autres ont reçu des capteurs Philio, transmettant les données en Z-Wave. Pour s'assurer de la cohérence des informations transmises par ces deux types de capteurs, deux logements ont été équipés des deux technologies. Les données sont collectées par une box domotique eedomus, communicant nativement via le protocole Z-Wave, mais pouvant communiquer en Zigbee après ajout d'une passerelle. La box domotique transmet ensuite les informations en passant par la box internet du logement. En l'absence de connexion à internet, les événements d'ouvertures ou de fermetures ne peuvent être enregistrés. Les données sont stockées temporairement par eedomus et sont extraites quotidiennement grâce à une API.

En complément, des questionnaires sont envoyés aux participants volontaires pour collecter des informations complémentaires sur leurs logements (surface, année de construction, ...) et sur leurs modes de vie (nombre d'occupants du foyer, période de congés, habitudes et raisons d'ouvertures des fenêtres, pratiques sportives, ...), pouvant éclairer les analyses sur la base de données. Pendant une courte période, des questionnaires ont également été transmis pour recenser des informations sur le ressenti des participants en termes de confort thermique. Il s'agissait pour les participants de renseigner quotidiennement une note correspondant à leur confort thermique à différents moments de la journée lorsqu'ils étaient chez eux.

Lors du déploiement à plus grande échelle de la base de données de confort, l'instrumentation sera simplifiée. Seuls des capteurs de température et d'humidité seront déployés pour limiter les coûts tout en permettant d'identifier des comportements et de donner des conseils d'amélioration du confort thermique, comme cela sera présenté au §4.3.

3. BASE DE DONNEES DE CONFORT EN LOGEMENTS

Un résumé des informations sur les logements des participants volontaires est disponible dans le Tableau 2. Neuf familles ont accepté d'installer des capteurs à leurs domiciles. Les caractéristiques des neuf logements sont assez variables, ce qui apporte de la diversité à la base de données. Six d'entre elles vivent en appartement et trois habitent des maisons. Les participants volontaires se trouvent majoritairement en Anjou. Deux participants habitent également en région Bordelaise. Les logements vont du studio au T6 de 140 m². Les années de construction sont variables et s'étalent des années 1970, aux années 2020 avec deux constructions récentes conformes à la RT2012. Sur les six appartements, deux sont traversants, mais les autres correspondent à des logements ne possédant des ouvertures que sur une façade ou deux façades adjacentes. Les appartements sont situés à différents étages allant du rez-de-chaussée au 3^{ème} étage. Notons qu'aucun appartement n'est situé au dernier niveau d'un

immeuble et qu'aucun n'est climatisé. Les participants ont tous déclaré avoir la possibilité d'occulter certaines de leurs fenêtres, que ce soit avec des stores ou avec des volets. En revanche l'ouverture des fenêtres les nuits d'été n'est pas toujours possible en raison du bruit de la rue, de questions de sécurité, pour éviter de faire entrer des insectes nuisibles, ou pour éviter une détérioration de la qualité de l'air intérieur lorsque les vignes sont traitées. Un à cinq occupants habitent les logements instrumentés. Les capteurs d'ambiance ont principalement été placés dans les pièces de vie, à l'exception d'un capteur qui a été placé dans le hall d'entrée. Le nombre de capteurs d'ouverture de fenêtre installés ne correspond pas au nombre de fenêtres dans les maisons. Des problèmes de communication entre la box domotique et des capteurs les plus éloignés de la box ont été rencontrés dans le logement H qui possède des murs épais. Dans les deux autres maisons, certaines pièces servent moins souvent et les occupants n'en ouvrent pas les fenêtres pour rafraîchir le logement ; ces fenêtres n'ont donc pas été équipées. Pour quatre participants, la collecte de données a débuté au cours de l'été 2022 avec l'enregistrement des données d'ambiance uniquement. Pendant quelques semaines de juillet et d'août 2022, les participants ont été invité à partager leur ressenti thermique en complétant quotidiennement un questionnaire. Des capteurs à placer sur les fenêtres et des box domotiques ont été remis aux participants au cours de l'été 2023 pour enregistrer les événements d'ouverture et de fermeture en plus des données d'ambiance.

Logement	A	B	C	D	E	F	G	H	I
Type	Appt.	Appt.	Appt.	Appt.	Appt.	Appt.	Maison	Maison	Maison
Lieu	Angers	Angers	Angers	Angers	Bordeaux	Bordeaux	Proche Angers	Proche Angers	Proche Angers
Surface	32 m ²	40 m ²	70 m ²	73 m ²	42 m ²	65 m ²	105 m ²	120 m ²	140 m ²
Const. (et réno.)	2014	2022	2014	1963	1985	2018	1971 (2000)	1860 (2019)	2023
Trav.	Non	Non	Oui	Oui	Non	Non	Oui	Oui	Oui
Étage	RdC	3 ^{ème}	2 nd	2 nd	2 nd	2 nd	-	-	-
Nb. occ.	2	1	2	4	1	1	4	5	1
Pièce	Pièce	Pièce	Pièce	Pièce	Pièce de	Pièce de	Hall	Pièce de	Pièce de
Temp.	de vie	de vie	de vie	de vie	de vie	de vie		de vie	de vie
Capteurs / Nb. fen.	3 / 3	4 / 4	7 / 7	7 / 7	3 / 3	3 / 3	6 / 8	4 / 12	7 / 11
Période	2023	2022 2023	2023	2022 2023	2023	2022 2023	2022 2023	2023	2023

Tableau 2 : Informations sur les logements de la base de données.

4. EXEMPLES D'UTILISATION DES DONNEES

Les possibilités offertes par la base sont multiples. L'étude des séries temporelles brutes donne de premières informations sur le confort. Elles peuvent être complétées par des études statistiques, ou en créant des modèles basés sur la physique ou de type boîtes noires. Des méthodes statistiques avancées, basées sur l'apprentissage automatique peuvent aussi être utilisées, par exemple pour détecter des anomalies (de Rautlin de la Roy et al. 2023). Dans la suite, de premiers exemples d'analyses des données simples sont présentés. Cette liste n'est pas exhaustive et d'autres analyses sont envisageables.

4.1. PREFERENCES DES OCCUPANTS EN TERMES DE CONFORT THERMIQUE

Disposant pour l'été 2022 de données quantitatives (mesures d'ambiance), et qualitatives (ressenti), une étude a été menée pour identifier des préférences en termes de confort estival. Une meilleure connaissance des préférences peut permettre : d'améliorer la précision des diagnostics du confort ; de

développer des modèles prédictifs du confort pouvant être intégrés dans des stratégies de gestion individualisées ; ou encore d'aider à la décision dans les logiciels de simulation thermique dynamique.

Pour le logement C, l'évolution de la température au cours de l'été 2022 est présentée à la Figure 1. Le ressenti est représenté sur le même graphique par un rond coloré. Les questionnaires sur le confort thermique ont débuté mi-juillet, ce qui explique l'absence de données au début juillet. L'absence de données de fin juillet à mi-août s'explique soit par l'absence de l'occupant, soit par l'oubli de compléter le questionnaire. D'après ce graphique, la température n'est clairement pas le seul paramètre explicatif du confort thermique. En effet, l'occupant peut déclarer avoir « très chaud » pour des niveaux de température inférieurs à ceux pour lesquels il déclare avoir un ressenti thermique « neutre ».

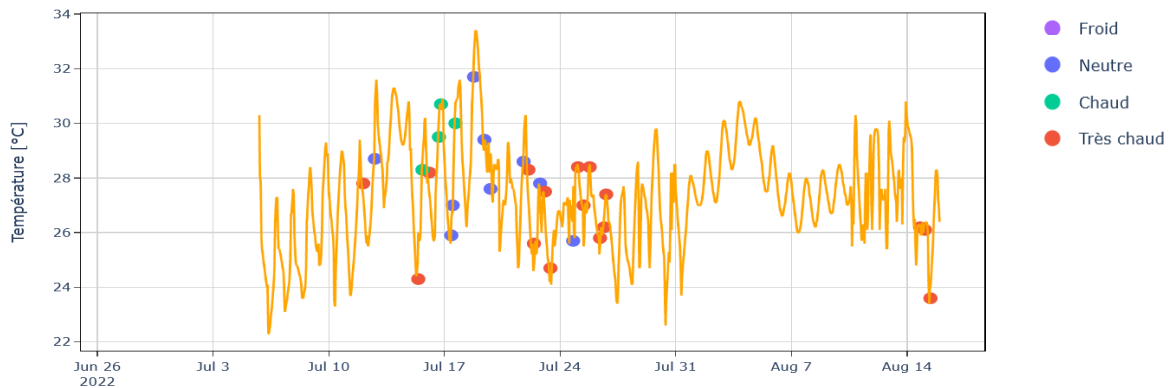


Figure 1 : Température et ressenti thermique de l'occupant du **logement C** pendant l'été 2022.

Afin de mieux comprendre quels autres paramètres peuvent expliquer la variabilité du ressenti, la corrélation de Spearman (1904) a été utilisée. Les corrélations entre le ressenti et les autres paramètres connus sont présentés à la Figure 2. Bien que les coefficients de corrélation soient relativement faibles, les paramètres les plus corrélés au ressenti sont la température, l'humidité, le taux de CO₂.

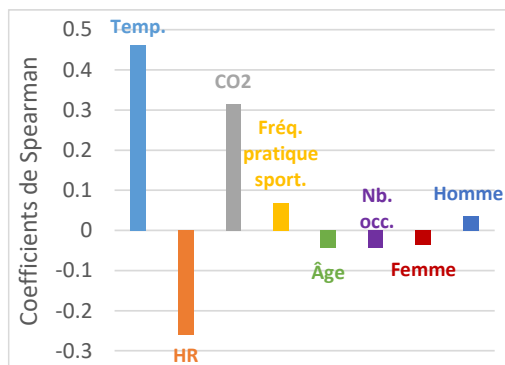


Figure 2: Corrélation de Spearman entre le ressenti et les autres paramètres connus, **tous logements confondus**.

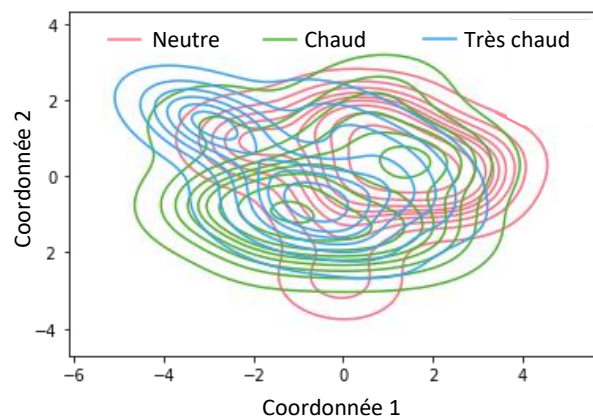


Figure 3: ADL pour le **logement B**.

En complément, des analyses discriminantes linéaires (ADL – équivalent des analyses en composantes principales mais applicables pour nos données discrètes et ordonnées) ont été réalisées par logement pour réduire la dimension et identifier si des combinaisons des paramètres permettent de séparer les trois classes de ressenti. L'outil Ordinalysis a été utilisé pour cela (Zine-El-Abidine et al., 2023). Le recouvrement important des lignes rose, verte et bleue dans l'ADL de la Figure 3, pour le logement B, montre que les paramètres à disposition ne sont pas suffisants pour bien prédire le ressenti.

Afin d’approfondir ces analyses, des paramètres supplémentaires seraient nécessaires (temps passé dans le logement par rapport aux temps passés en extérieur ou dans d’autres ambiances, état de santé, état de fatigue, paramètres physiologiques, etc.). De plus, pour pouvoir développer des modèles prédictifs du confort, basés sur l’apprentissage automatique, il faudrait collecter les ressentis à intervalle plus régulier et sur une période plus longue ; ce qui peut être très contraignant pour les participants.

4.2. ÉTUDE DU COMPORTEMENT EN PERIODE ESTIVALE

Le confort thermique peut être largement impacté par l’usage de la ventilation, surtout en été. Une autre analyse a consisté à étudier les pratiques des occupants en termes d’aération en période estivale. Des usages différents sont observés d’un logement à l’autre. Certains occupants aèrent toute la nuit ou très tôt le matin pour rafraîchir le logement (expl : logement I de la Figure 4). D’autres réalisent de nombreuses ouvertures ponctuelles en journée, qui contribuent parfois à faire augmenter la température intérieure (expl : logement A de la Figure 4). Ces événements inattendus ont été expliqués par les occupants : ils ouvrent leurs portes fenêtres pour accéder à leur terrasse arborée, donnant une sensation de fraîcheur. Dans un autre logement (D), il a été observé qu’une fenêtre reste ouverte en permanence, y compris en période caniculaire. Il s’est avéré, après échange avec les occupants, qu’il s’agit de la fenêtre de la cuisine, qui est maintenue en oscillo-battant pour évacuer les odeurs de cuisson.



Figure 4 : Évolution de la température et du nombre de fenêtres ouvertes dans les **logements A et I**.

Si des comportements non optimaux sont observés (e.g. : pas d’ouvertures nocturnes pour rafraîchir, et de longues ouvertures en journée qui réchauffent le logement), des conseils sont apportés aux occupants afin d’améliorer la gestion de leurs ouvertures, et de limiter l’inconfort estival. Pour conseiller davantage les occupants, la gestion des occultations pourrait être observée en plaçant d’autres capteurs.

4.3. MODELE DE DETECTION DES OUVERTURES DE FENETRES

Dans la section précédente, les conseils sont fournis aux occupants après analyse des données enregistrées par les capteurs d’ouverture. Une étude complémentaire a consisté à détecter si une fenêtre

est ouverte en analysant uniquement les séries temporelles de température intérieure et extérieure. Cela permet d'évaluer le comportement en termes d'aération sans avoir recours à des capteurs d'ouvertures de fenêtre, ce qui sera utile lors du déploiement de l'instrumentation à plus grande échelle. Des conseils pour l'amélioration du confort d'été peuvent alors être fournis aux occupants à moindre coût, en installant uniquement des capteurs de température dans les logements.

L'étude de la détection des ouvertures est décrite dans l'article de Hoyet et al. (2023). Un modèle basé sur la physique permet de détecter les ouvertures nocturnes en fonction, respectivement, d'une baisse ou d'une hausse de la température intérieure entre deux pas de temps consécutifs. Le modèle développé a montré de bonnes performances (écart de -15 à +13 % sur le nombre d'heures d'ouverture prédites) dans la détection d'ouvertures longues (de plus de 30 min), particulièrement en période caniculaire. Les performances du modèle, obtenues par comparaison avec les données labellisées sont affichées à la Figure 5, pour un logement ne faisant pas partie de la présente base de données. Des études sont en cours pour valider le modèle sur les logements A à I.

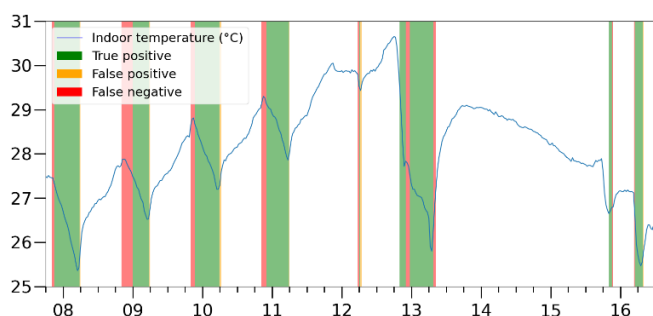


Figure 5: Qualité de la prédiction d'ouvertures dans le salon d'un appartement – figure issue de (Hoyet et al. 2023).

Dans la Figure 5, les zones en vert indiquent que l'algorithme identifie correctement une fenêtre comme étant ouverte. En jaune, la fenêtre est fermée mais l'algorithme la considère ouverte. Enfin, en rouge, l'algorithme prédit fermée une fenêtre en réalité ouverte.

Les imprécisions sur la prédiction ont deux principales origines. D'abord, les prédictions ont tendance à être décalées dans le temps par rapport aux événements réels (ouverture manquée sur le premier pas de temps, et détectée à tort après la fermeture). Ensuite, il existe également un risque de contagion par convection : l'ouverture d'une fenêtre dans une autre pièce peut faire baisser la température de la pièce étudiée, ce qui conduit l'algorithme à conclure à tort à l'ouverture des fenêtres de la pièce.

Pour aller plus loin, et inciter davantage les occupants à suivre les conseils fournis, des indicateurs complémentaires pourraient être affichés, tels que le nombre de degrés perdus (resp. gagnés) en ouvrant une fenêtre à un moment opportun (resp. en aérant à une période non optimale).

5. GESTION DE LA BASE DE DONNEES

Cette base de données a vocation à être développée, en intégrant d'autres participants ou en proposant d'autres capteurs connectés qui transmettraient leurs données via la passerelle domotique. Pour les futurs participants, un kit standard de capteurs sera proposé et un protocole sera mis en place pour le recueil du consentement. Il est prévu de mettre à disposition des participants un tableau de bord, reprenant les principales données mesurées, pour faciliter le suivi du confort (qui se fait actuellement en consultant plusieurs applications en parallèle). Concernant la diffusion des données, il est envisagé à terme de stocker les données, une fois rendues anonymes, sur les serveurs de l'université d'Angers et de les mettre à disposition pour qu'elles soient utilisées dans le cadre d'autres études. Les données ne seront toutefois pas mises à disposition en *open access* en temps réel, mais après un délai de quelques mois.

6. CONCLUSION

Cet article a présenté une base de données permettant d'évaluer le confort thermique dans des logements de participants volontaires, en particulier en période estivale. Pour chaque logement, des données d'ambiances sont enregistrées. Des événements d'ouverture ou de fermeture des fenêtres sont aussi collectés. De plus, le ressenti thermique des occupants a été recueilli sur une courte période. Actuellement, les données contenues dans cette base de données peuvent être transmises sur demande.

Les possibilités offertes par cette base sont multiples et quelques exemples d'exploitation ont été présentés. Premièrement, une exploration des préférences thermiques des occupants a été menée et a permis de mettre en évidence des améliorations possibles dans la collecte des données pour de futures études. Dans un second temps, la base de données a servi à mettre en évidence des comportements vis-à-vis de la gestion des ouvertures. Cela peut être fait en étudiant les événements d'ouvertures de fenêtres, ou en utilisant un modèle de prédiction des ouvertures se basant sur les séries temporelles de température. Connaissant les pratiques des occupants, des conseils peuvent leur être fournis pour les aider à améliorer leur confort estival, sans recourir à des systèmes de climatisation actifs. En complément de l'étude de la gestion des ouvertures de fenêtres, la gestion des occultations pourrait être étudiée pour améliorer la qualité des recommandations fournies.

D'autres exploitations des données sont envisageables, sur le confort d'hiver en particulier. De plus, certaines analyses pourraient être approfondies en utilisant par exemple des algorithmes d'apprentissage automatique. Finalement, cette base de données a vocation à être étendue pour tirer des conclusions plus générales sur le confort, à l'échelle d'immeubles ou de parcs de bâtiments.

7. REMERCIEMENTS

Ce travail a été réalisé dans le cadre du projet ANR CoLoC (Confort des Logements Connectés) du Plan de Relance, visant la préservation de l'emploi en R&D. Les auteurs remercient toutes les personnes qui se sont portées volontaires pour participer à l'étude en installant des capteurs à leur domicile.

8. BIBLIOGRAPHIE

- Diffey, B.L. 2011. « An overview analysis of the time people spend outdoors ». *British Journal of Dermatology* 164 (4): 848-54. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2133.2010.10165.x>.
- Du, Heng, Zhiwei Lian, Dayi Lai, Lin Duanmu, Yongchao Zhai, Bin Cao, Yufeng Zhang, et al. 2022. « Evaluation of the accuracy of PMV and its several revised models using the Chinese thermal comfort Database ». *Energy and Buildings* 271 (septembre): 112334. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112334>.
- Földváry Ličina, Veronika, Toby Cheung, Hui Zhang, Richard de Dear, Thomas Parkinson, Edward Arens, Chungyoon Chun, et al. 2018. « Development of the ASHRAE Global Thermal Comfort Database II ». *Building and Environment* 142 (septembre): 502-12. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.06.022>.
- Hoyet, Valentin, Mathieu Bouvillle, Maxime Robillart, et Marie-Lise Pannier. 2023. « Detecting night opening of windows in summer: a case study ». In *Congress on Measurement, Quality and Data Science (MQDS 2023)*, 12. Bordeaux. <https://www.proceedings.com/content/070/070984webtoc.pdf>.
- Hoyet, Valentin, Marie-Lise Pannier, Maxime Robillart, et David Rousseau. 2022. « Vers le développement de modèles prédictifs individualisés du confort thermique pour les logements connectés ». In *Conférence IBPSA France 2022*, 8. Châlons en Champagne, France. <https://univ-angers.hal.science/LARIS/hal-03687637v1>.
- Oze Energies. 2016. « Challenge data - Challenge: Oze Energies - Optimiser la consommation d'énergies ». 2016. https://challengedata2.ens.fr/fr/challenge/18/oze_energies_-_optimiser_la_consommation_denergies.html.
- Rautlin de la Roy, Enguerrand de, Thomas Recht, Akka Zemhari, Pierre Bourreau, et Laurent Mora. 2023. « Deep learning models for building window-openings detection in heating season ». *Building and Environment* 231 (mars): 110019. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110019>.
- Spearman, C. 1904. « The Proof and Measurement of Association between Two Things ». *The American Journal of Psychology* 15 (1): 72-101.
- Zine-El-Abidine, Mouad, Helin Dutagaci, et David Rousseau. 2023. « Ordinalis: Interpretability of multidimensional ordinal data ». *SoftwareX* 22 (mai): 101343. <https://doi.org/10.1016/j.softx.2023.101343>.

A methodology to detect changes in energy-consuming practices of residential occupants

Minh Phuong Huynh^{1,2,*}, Thomas Recht^{1,2}, Laurent Mora^{1,2}

¹ Univ. Bordeaux, CNRS, Bordeaux INP, I2M, UMR 5295, F-33400, Talence, France

² Arts et Metiers Institute of Technology, CNRS, Bordeaux INP, Hesam Université, I2M, UMR 5295, F-33400 Talence, France

* minh-phuong.huynh@u-bordeaux.fr

RESUME. Les occupants jouent un rôle important dans la consommation des bâtiments du secteur résidentiel. Des interventions visant à économiser l'énergie sont conçues et appliquées pour encourager les individus et les familles à mettre fin aux pratiques énergivores, les remodeler ou les changer en pratiques plus durables. Afin d'investiguer quand et comment les gens changent leurs pratiques, cet article propose une méthodologie complète explorant à la fois des données quantitatives et qualitatives collectées auprès des ménages. Selon les caractéristiques définies d'une pratique, les données sont collectées, extraites et soumises à des mécanismes de comparaison, tels que des tests d'hypothèses, afin de constater toute différence significative. Associée à des explications qualitatives, la conclusion sur le changement de pratique sera plus solide. Au début, sans aucune intervention, les premiers résultats de l'étude de la pratique du lavage de la vaisselle dans deux familles montrent que l'utilisation du lave-vaisselle est influencée à la fois par des facteurs internes (par exemple, la motivation à économiser l'électricité et l'argent) et des facteurs externes (par exemple, le type de contrat d'électricité), ainsi que par leur routine quotidienne de cuisine. À l'avenir, la modélisation d'activités basée sur le Réseau Bayésien basé sur les Conséquences fournira davantage d'informations sur la pratique, nous donnant des caractéristiques significatives pour représenter et comparer une pratique avant et après le déploiement d'interventions.

MOTS-CLÉS : comportement de l'utilisateur, théorie de la pratique sociale, techniques de détection de changement

ABSTRACT. Occupants play an important role in the consumption of buildings in the residential sector. Energy-saving interventions are designed and applied to encourage individuals and families to terminate energy-inefficient practices, recraft or change them into more sustainable ones. In order to investigate when and how people change their practice, this paper proposes a comprehensive methodology exploring both quantitative and qualitative data collected from households. Depending on the defined characteristics of a practice, data are collected, extracted, and fed to comparing mechanisms, such as hypothesis tests, in order to witness any significant difference. Combined with qualitative explanation, the conclusion of change in practice will be more solid. In the beginning, without any intervention, the initial results of studying dishwashing practice in two families show that the usage of the dishwasher is influenced by both internal factors (e.g. motivation to save electricity and money) and external factors (e.g. type of electricity contract), as well as linking to their daily cooking routine. In the future, activity modelling based on the Consequences-based Bayesian Network will provide further information about the practice, giving us meaningful characteristics to represent and compare a practice before and after deploying interventions.

KEYWORDS: user behavior, social practice theory, change detection techniques

1. INTRODUCTION

Occupants play an important role in the consumption of residential buildings. According to reports published by the International Energy Agency (IEA) and Eurostat, in 2021, the operation of buildings accounted for approximately 30% of global final energy consumption and the proportion increased in the following year. Witnessing the negative impact of energy and resource overconsumption, recently,

there has been a rise in attention and interest from individuals and nations in preserving resources and reducing environmental impacts, such as carbon footprint and pollution (e.g. the Net Zero Emission).

Despite visible problems, the choice to take and follow a new environment-friendly and sustainable lifestyle is influenced by numerous factors, coming from inside individuals as well as external support conditions. Therefore, the most considered question is: “How to make or encourage people to change their normal practices that they are familiar and comfortable with?”. The “LearningHome” ANR project aims to involve residential inhabitants in daily energy management, reaching the target of limiting environmental and economic impacts while getting the expected comfort. In order to avoid relapsing old habits, changing practices requires deliberate effort, discipline, and focus repetition in long term.

2. HOW CAN WE DETECT WHENEVER AN ENERGY-CONSUMING PRACTICE IS CHANGED?

2.1. THE MODEL OF A PRACTICE UNDER THE SOCIAL PRACTICE THEORY

Reckwitz stated that: “a practice (*Praktik*) is a routinized type of behavior which consists of several elements, interconnected to one other: forms of bodily activities, forms of mental activities, ‘things’ and their use, a background knowledge in the form of understanding, know-how, state of emotion and motivational knowledge” (Reckwitz 2002). Generally speaking, a practice is defined as a routinized behavior and activity carried by an individual or a group of members (e.g. a family) with a specific purpose, meeting their lifestyle needs, for food, comfort, education, health, etc. Presented in (Sahakian et al. 2021) (Du and Pan 2021), a practice consists of three elements that have a two-way interaction with each other (*Figure 1*): *Material element* is the infrastructure of living buildings and offices, the related tools and equipment used to perform the activities; *competence element* involves the skills and techniques users have to accomplish the task; and *meaning element* encompasses the inspiration, desires, etc. of the person who carries the practice.

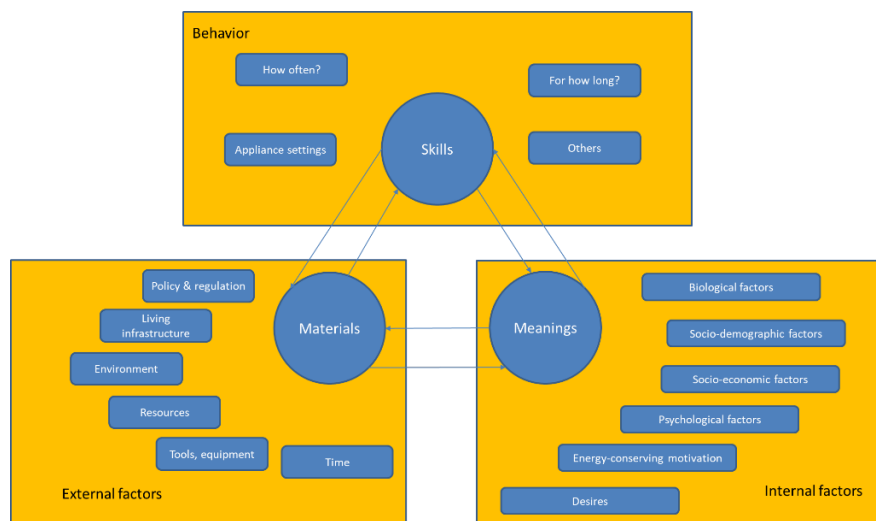


Figure 1 : The 3-element model of practice under the Social Practice Theory

In the domain of studying practices and their interaction, the occupant is the central agent that carries energy-consuming practices in residential buildings. The behaviors and practices are driven by both external and internal factors (Alam et al. 2017). While *external factors* include living environment, building infrastructure, policy and regulation, and time; *internal factors* are categorized as biological,

psychological, socio-economic, socio-demographic, and contextual factors. Psychological factors have been seen to be the most influential determinants (Alam et al. 2017), which are the target of various intervention strategies, either antecedent (e.g. commitment, goal setting, gamification, *etc.*) or consequence strategies (i.e. feedback, reward), promoting energy-efficient behaviors and practices.

2.2. WHAT HAVE BEEN DONE?

Numerous studies and projects have shown interest in the impact of individuals on their working and living spaces through social practices. On the one hand, some empirical studies investigated the relationship, meaning the positive or negative associations, between influencing determinants and energy-consuming behaviors and practices, such as psychological and socio-demographic factors, by using the Ordinary Least Squares regression model (Hess et al. 2018) or the Binomial Logistic regression model (Jessica Balest and Stawinoga 2022). On the other hand, longitudinal experiments were conducted in order to test the impact of several energy-saving interventions, in residential buildings (Eon et al. 2018) (Sahakian et al. 2021), or in offices (Iria et al. 2020). Descriptive statistics and hypothesis tests were used to compare predefined characteristics of studied behaviors and practices before and after interventions, such as usage patterns, or energy consumption.

Despite interesting results, some limitations can be pointed out. First and foremost, the conclusion of whether there is a change in practice was only made after the experiment period, which is the limited period when the interventions were deployed. In consequence, it is not possible to know the exact time when a practice began to change. Secondly, there was a lack of studies investigating the quantitative changes in occupants' psychological factors. Last but not least, the effectiveness of a specific intervention is not clearly examined since more than one intervention was conducted simultaneously (i.e. providing information, auditing, and feedback (Eon et al. 2018)).

2.3. OBJECTIVES

Identifying a change in energy-consuming practices required a combination of data analysis, statistical methods, and domain knowledge, which are shown in the studies and projects mentioned in the previous section. In addition, we expect to increase the detecting speed of the methodology, meaning to detect the change in practice in real-time or near-real-time, in order to investigate the effectiveness of the intervention. Whenever a change is detected, some questions may also arise from the researchers and participants: Does it follow towards the initial targets, or does it have a counter-productive effect? How much does it change? What are the impacts on the “agents”, e.g. occupants, resources, living environment, *etc.*? What are people's motives for behaving in these certain ways?

As a part of the “LearningHome” ANR project, the main objectives of the work presented in this communication are: to develop a comprehensive methodology that can detect whenever an individual or a family changes their energy-consuming practices; to evaluate the effectiveness of intervention strategies, while applying the methodology in different households and situations. In addition, through the change in an individual's psychological factors, we want to observe the development in individuals' awareness and motivation.

This paper focuses on proposing a methodology that is expected to detect changes in residential occupants' practices heading to the target of reducing energy consumption and environmental impacts. The methodology will be presented in the next section.

3. A PROPOSED DETECTING METHODOLOGY

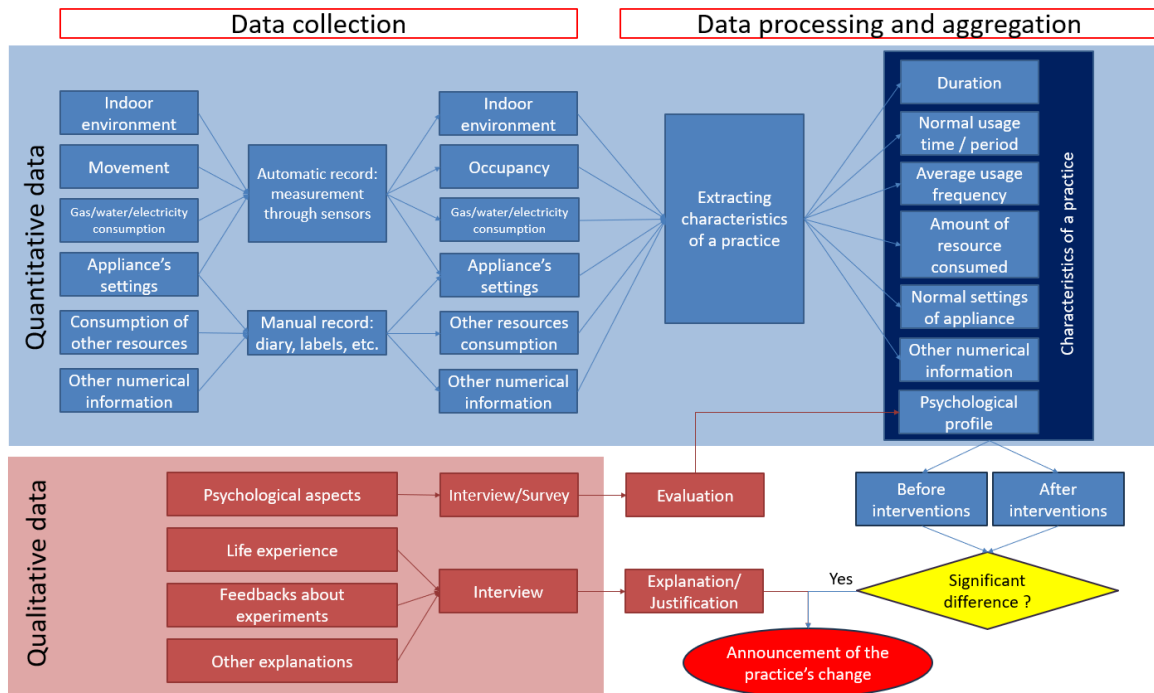


Figure 2 : The proposed methodology for detecting change in residential occupants' practices

Regarding the considering practice, several characteristics representing the energy-consuming practice need to be determined beforehand: the wants or desired outcomes of the practice from the occupants; the usage or operation of related tools and equipment; the amount of consumed resource (i.e. electricity, gas, and water), *etc.* The following step is to determine the source of this information and the collecting methods. *Figure 2* illustrates the operating sequence of the practice's change-detecting methodology, from collecting necessary data to extracting characteristics and information describing an energy-consuming practice. Overall, both quantitative and qualitative data are analyzed for a solid conclusion about a change in the practice of occupants. While quantitative data (the blue area) demonstrate the practice by numeric characteristics, qualitative data (the red area) provide deeper insights that explain the obtained results.

3.1. QUANTITATIVE DATA COLLECTION AND ANALYSIS

Quantitative information, such as the presence of occupants, resource consumption, or setting of appliances, is collected by either automatic measurement or manual records. Sensors are implemented to capture indoor environment data such as temperature in each room, CO₂ concentration, *etc.*, while electricity, water, and gas meters provide the resource consumption of appliances and the aggregation of the entire house. Such information that cannot be collected automatically from sensors can be collected manually by diaries, a mobile application, or a website platform. The collected data then are processed and extracted characteristics of the practice, including the activity records and statistical representation of the practice, e.g. amount of consumed resource, activities' frequency and duration, usage or settings of household appliances, *etc.*

Changes in personal psychology can also be interesting to observe and use to determine the change in practice. Therefore, several surveys and/or interviews can be organized before, during, and after the deployment of intervention, to evaluate moral values and determinant factors of individuals, e.g. social

norms, trust, economic value, emotions, attitudes, perceived behavioral control, *etc.* At each time, occupants will be asked to express their opinion about a statement or a question on 5-point and 7-point Likert scales. If a factor requires more than one scaled answer to be evaluated, the mean point of those answers will be chosen for that factor.

The selection of hypothesis tests depends on the nature of the data. Paired hypothesis tests, such as paired t-test, the Wilcoxon signed-rank test, or the McNemar's test, are used for comparing the observed variables and characteristics before and after the inventions. On the other hand, unpaired hypothesis tests, such as the Mann-Whitney U-test, are suitable for independent groups of samples, e.g. differences in shower lengths on weekdays and weekends. Towards the target of reducing resource consumption and environmental impacts, the hypothesis tests will be executed on the practice's numeric characteristics, with the null and alternative hypotheses:

- The null hypothesis H_0 : there is no difference in observed variables before and after intervention;
- The alternative hypothesis H_1 : there is a significant difference in observed variables before and after interventions;

3.2. QUALITATIVE DATA COLLECTION AND ANALYSIS

Explanations from participants are crucial to evaluate any obtained results. Qualitative data are collected through several interviews and surveys, including desires and motivations of the practice, life experience, *etc.* Pre-intervention survey is conducted, not only forming a numeric psychological profile of occupants, but also gathering qualitative information such as the desires of their practices, energy-conserving awareness, and motivations. During- and post-intervention surveys will be organized to collect: experience and feedback about the experiment, such as comfort, complaints, and effects of the new behavior on other practices; the new scaled answers for the psychological profiles; and explanation for the hypothesis test's result, whether or not there is a different in numeric practice's characteristics.

4. STUDY CASES

BX1 and CESTAS in-situ experiment sites are houses of two families living in the area of Bordeaux, France. Both families consist of a couple living with their children. While the wives are over 40 years old and work in justice and business areas, the children, who are from 16 to 21 years old, are studying commercial, art, industry, and audio-visual. The bias in experiments may come from the fact that the husbands have knowledge and experience in advanced energy technology and energy conservation since their working major relates to the field of Thermal, Energy, and Buildings.

Dishwashing practice, which is a typical household chore, is chosen to evaluate the proposed detecting methodology for several reasons. First of all, this practice relates to a single household appliance, which is the dishwasher. Despite a small contribution to the total household electricity consumption of the experiment sites, it would be simpler to investigate the usage of the dishwasher individually than the usage of the kitchen appliances while studying the cooking practice. Secondly, this practice has a synchronized interlock with other practices in the house, meaning that they can happen at the same time. Therefore, the change in dishwashing practice may not affect other practices, and may not be affected in reverse.

The usage of the dishwasher is investigated in two years, from 1/1/2021 to 31/12/2022. The time-series data are collected and preprocessed in a 30-minute timestep. Operation time, usage period, and the number of operation cycles per week are extracted from the cumulative electricity consumption. Eventually, these characteristics of the dishwashing practice are updated frequently and compared with historical data before interventions in order to observe any significant change.

5. RESULTS AND DISCUSSION

Parameters	Year	BX1 site	CESTAS site
Number of cycles per week	2021	3.77 ± 1.41	8.13 ± 3.34
	2022	3.96 ± 1.44	7.42 ± 2.4
p-value		0.33	0.06

Table 1 : The number of usage cycles per week of the dishwasher in BX1 and CESTAS in 2021 and 2022. The significance of the null hypothesis was evaluated at a 95% confidence level ($\alpha=0,05$)

Table 1 shows how frequently two families living in two experiment sites used the dishwasher. In 2021, the family BX1 used the dishwasher approximately 3.8 times per week on average, while in the following year, the average weekly usage cycles were nearly 4 times. On the other experiment site, the frequency of using the dishwasher was over 8.1 and about 7.4 cycles per week, respectively. One hypothesis explaining the difference between the number of operating cycles of the two families is their daily cooking routine. It appears to me that while the CESTAS family members want to enjoy homemade foods every day, leading to a large quantity of dirty dishes and cookware, the BX1 family prepares and cooks fewer meals each day. Performing the Wilcoxon signed-rank test for each family’s data, there is no significant difference in the number of usage cycles per week between these two years.

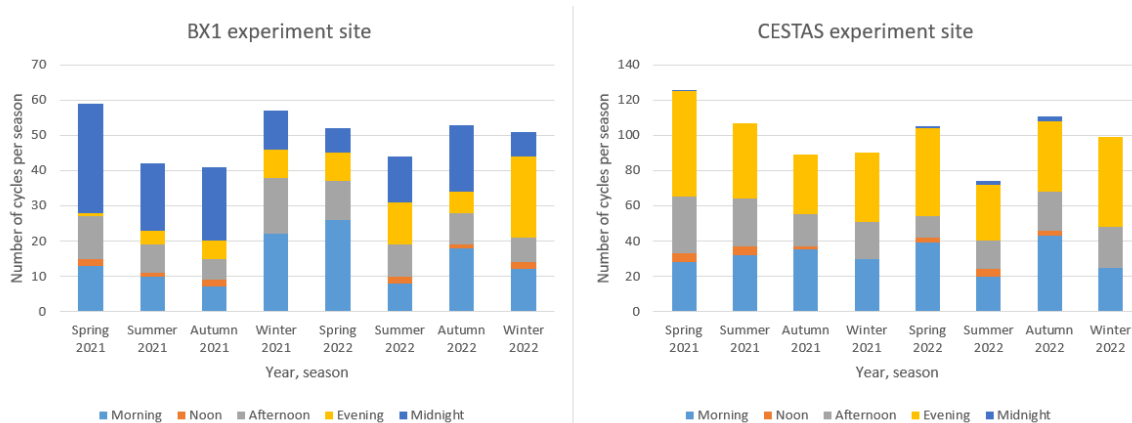


Figure 3 : The number of cycles the dishwasher in BX1 (left) and CESTAS (right) operated in specific periods of day each season in 2021 and 2022

Regarding the operation period of the dishwasher (Figure 3), there was a gradual decline in the number of usages in “Midnight” (dark blue) of the BX1 family. In specific, there were 31 over 59 times, which was more than 50%, the BX1 family used the dishwasher in this period in the spring of 2021. However, there were only 7 over 51 times in the winter of 2022, which was considered only 14%. On the other family, there were barely any operations in the late-night period. It seems that there is no interest from the occupants in the behavior of “operating the dishwasher in off-peak hours”.

As can be pointed out, there is potential for changing the dishwashing practice. From a financial point-of-view, families can be encouraged to reduce the energy and resources consumed by the dishwasher (e.g. reducing the weekly cycles). From the other environmental point-of-view, industrial detergents which are made from chemicals can be replaced by organic versions. This solution may not have time and financial benefits, but the waste will be less toxic than before. Another solution is to operate the appliance in off-peak hours by automatic time setting function on the appliance. Not only having a financial benefit, less CO₂ is released while generating electricity in this period. However, the effectiveness of the interventions depends on several factors, such as the type of electricity contract, the characteristics of the dishwasher, the motivation of family members, and other daily practices.

Investigated dishwashing practice's characteristics do not include the loading capacity of the appliance, the selected operation mode (e.g. normal, fast, eco), the amount of detergent used each time, the amount of electricity and water the dishwasher consumes, since implemented sensors do not provide such information. Therefore, additional data-collecting mechanisms (shown in *Figure 2*) are interesting to consider, such as implementing water meters at every end-use appliance or requesting occupants to provide such information manually. However, the deployment of these methods still needs serious study and preparation, since these can be seen as intervention strategies. Moreover, these additional data will be analyzed differently from the existing data, which contains historical information.

At this stage of the work, only historical electricity consumption data collected by sensors are analyzed statistically without any qualitative validation. Therefore, face-to-face meetings with the two families will be organized for the following purposes: conducting a survey to form a psychological profile; illustrating the initial results as shown above, interviewing for any explanation justified the results; discussing and deploying interventions that are most suitable for each family. After the deployment, numeric characteristics of the practice will be observed and compared to see any significant change or variation (as presented in Section 3).

From a former project, (Phan 2022) proposed a Consequences-based Bayesian Network to generate occupant activity profiles in domestic buildings, such as cooking breakfast, lunch, and dinner, and to simulate activity-related electricity consumption of household appliances. It shows us useful information, such as the most meaningful features linking to an activity, the distribution level of the appliance-related electricity consumption, and the simulation of the appliance's electricity consumption during a normal day. It could be promising to adapt his work in order to extract more information and characteristics of the practice, e.g. more complex relationships between the data and related activities, diversity in the usage of various domestic appliances while performing the practice.

6. CONCLUSION AND FUTURE WORK

The authors propose a methodology to detect any change in energy-consuming practices of residential occupants after the deployment of interventions. Numeric characteristics of an energy-consuming practice are collected, modelled, extracted, and fed to the testing algorithms in order to determine any significant changes in the quantitative data. Before applying energy-saving intervention, our study case shows that the dishwashing practice represented by the usage of the dishwasher possibly links to other practices and routines of the families (e.g. cooking activity), and is influenced by other factors, such as the type of electricity bill and motivation to save energy. A final conclusion will be made after considering the occupants' explanation.

Besides the statistical description, activity modelling based on the Consequences-based Bayesian Network as well as new data-collecting mechanisms are considerable for gaining more information and knowledge about the practices of residential occupants. In consequence, combining the change in statistical descriptions of the practice, the variation in activity model performance as well as the explanation from occupants, we can come out with a solid conclusion about the change in their energy-consuming practice.

Further in the project, a methodological framework will be applied to different composition families with intervention strategies being prepared by the team members of the project “LearningHome” ANR.

7. ACKNOWLEDGEMENTS

This work is part of the Research Front 3 of the “LearningHome” project, which was funded by the French National Research Agency (ANR), within cooperation between the I2M laboratory, the G-SCOP laboratory, GAEL, and the start-up Kocliko.

8. REFERENCES

- Alam, Md Morshed, Helen Bao, Patrick X.W. Zou, and Jay Sanjayan. 2017. “Behavior Change of Building Users and Energy Consumption.” In *Encyclopedia of Sustainable Technologies*, 189–96. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.10193-9>.
- Balest, Jessica, and Agnieszka Elzbieta Stawinoga. 2022. “Social Practices and Energy Use at Home during the First Italian Lockdown Due to Covid-19.” *Sustainable Cities and Society* 78 (March): 103536. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103536>.
- Du, Jia, and Wei Pan. 2021. “Evaluating Energy Saving Behavioral Interventions through the Lens of Social Practice Theory: A Case Study in Hong Kong.” *Energy and Buildings* 251 (November): 111353. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111353>.
- Eon, Christine, Xin Liu, Gregory M. Morrison, and Joshua Byrne. 2018. “Influencing Energy and Water Use within a Home System of Practice.” *Energy and Buildings* 158 (January): 848–60. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.10.053>.
- Hess, Ann-Kathrin, Robin Samuel, and Paul Burger. 2018. “Informing a Social Practice Theory Framework with Social-Psychological Factors for Analyzing Routinized Energy Consumption: A Multivariate Analysis of Three Practices.” *Energy Research & Social Science* 46 (December): 183–93. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2018.06.012>.
- Iria, José, Nuno Fonseca, Fernando Cassola, António Barbosa, Filipe Soares, António Coelho, and Aydogan Ozdemir. 2020. “A Gamification Platform to Foster Energy Efficiency in Office Buildings.” *Energy and Buildings* 222 (September): 110101. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110101>.
- Phan, Ly Huynh. 2022. “Modélisation de l’activité Des Ménages Dans Le Bâtiment Résidentiel Instrumenté.” PhD thesis, Université de Bordeaux, France.
- Reckwitz, Andreas. 2002. “Toward a Theory of Social Practices: A Development in Culturalist Theorizing.” *European Journal of Social Theory* 5 (2): 243–63. <https://doi.org/10.1177/13684310222225432>.
- Sahakian, Marlyne, Henrike Rau, Eoin Grealis, Laurence Godin, Grégoire Wallenborn, Julia Backhaus, Freja Friis, et al. 2021. “Challenging Social Norms to Recraft Practices: A Living Lab Approach to Reducing Household Energy Use in Eight European Countries.” *Energy Research & Social Science* 72 (February): 101881. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2020.101881>.

Hyperparameter optimization of artificial neural network in building energy simulation

Mahdi IBRAHIM*¹, Pascal BIWOLE^{1,3}, Salah Eddine OULDBOUKHITINE ¹, Fatima Harkouss², Farouk FARDOUN²

¹ Université Clermont Auvergne, CNRS, SIGMA Clermont, Institut Pascal, F-63000, Clermont-Ferrand, France

² Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Al Maaref University, Beirut, Lebanon

³ MINES Paris, PSL Research University, PERSEE—Center for Processes, Renewable Energies and Energy Systems, CS 10207, 06 904 Sophia Antipolis, France

*mahdi97ibrahim@hotmail.com

Artificial Neural Networks (ANNs) play a significant role in emulating Building Energy Simulation (BES), forecasting building energy consumption, and optimizing energy retrofit measures. The determination of the appropriate ANN's architecture is a complex issue. Hyperparameter optimization (HPO) involves aligning ANN prediction results with data to achieve optimal performance by tuning the ANN's hyperparameters. This method is applied to retrofit an existing low-energy building. To construct the ANN for retrofit measures, data obtained through Latin Hypercube sampling are utilized. The ANN is used to predict the hourly energy consumption, the hourly energy generation, and thermal comfort in the retrofit scenario. The results underscore the importance of HPO in achieving predictions with an ANN, demonstrating an R^2 error exceeding 0.9.

KEYWORDS: hyperparameter optimization, building energy simulation, artificial neural network, machine learning, building retrofitting

Les réseaux neuronaux artificiels (RNA) jouent un rôle significatif dans l'émulation de la simulation énergétique des bâtiments (BES), la prévision de la consommation d'énergie des bâtiments et l'optimisation des mesures d'amélioration de l'efficacité énergétique. La détermination de l'architecture appropriée pour les réseaux neuronaux artificiels dans l'émulation de BES est une question complexe. L'optimisation des hyperparamètres (HPO) consiste à aligner les prédictions des ANN sur des données afin d'obtenir des performances optimales en ajustant les hyperparamètres de l'ANN. Cette méthode est appliquée à la rénovation d'un bâtiment existant à faible consommation énergétique. Les données obtenues par échantillonnage hypercube latin sont utilisées pour construire l'ANN pour les mesures de rénovation. Le RNA est utilisé pour prédire la consommation d'énergie horaire, la génération d'énergie horaire, et le confort thermique dans le scénario de rénovation. Les résultats soulignent l'importance de l'optimisation des hyperparamètres pour obtenir des prédictions avec un RNA, démontrant une erreur R^2 dépassant 0,9.

MOTS CLES : optimisation des hyperparamètres, simulation énergétique des bâtiments, réseaux neuronaux artificiels, apprentissage automatique, rénovation des bâtiments

1. INTRODUCTION

According to the French Agency for Ecological Transition (Ademe, 2023a), the building sector accounts for 44% of the total energy consumed in France, making it a significant contributor to global energy consumption. Estimates indicate that new buildings represent less than 2% of the entire building stock (Ademe, 2023b). Consequently, building energy retrofitting has been proposed as a solution to mitigate high energy consumption in buildings.

In this context, Building Energy Simulation Optimization (BESO) is employed to reduce building energy consumption by incorporating retrofit measures (Pan et al. 2023). To assess whether the optimization algorithm has achieved convergence, the hypervolume, an indicator developed by Zitzler and Thiele (Eiben 1998), could be used to evaluate the convergence conditions. This indicator calculates the volume of the hypercube formed by optimal solution in the objective space. Typically, achieving convergence of this indicator requires approximately 1000 iterations of Building Energy Simulation (BES) (Harkouss, Fardoun, and Biwole 2018b; 2018a). Conducting an annual simulation with the BES model could take 16 minutes, resulting in a significant computational burden of approximately 11 days for optimizing the model (Zhan, He, and Huang 2023; Bre, Roman, and Fachinotti 2020). Hence, BESO incurs a high computational cost. To alleviate this computational burden, meta-modeling is proposed.

Meta-modeling is a stochastic approach utilized to capture the correlation between the input and output of the building energy model, facilitating the creation of a computationally lighter model. Meta models allow for more efficient exploration of the parameter space, enabling rapid analysis of various scenarios and configurations. This capability can be particularly valuable in optimization tasks or when investigating complex system behaviors. Additionally, these models can be seamlessly integrated with optimization algorithms, allowing for automated parameter tuning and optimization. This integration streamlines the optimization process and can lead to faster convergence to optimal solutions.

Artificial Neural Network (ANN) is a machine learning model, which serves as meta-model to emulate building energy simulation (BES). This model comprises a collection of connected units or nodes known as neurons. Analogous to synapses in a biological brain, each connection can transmit a signal from the receiving neuron to neighboring neurons. In each connection, the output is computed by a nonlinear function of the inputs called the activation function. Defining all these mentioned hyperparameters, such as the number of neurons, activation function type, and number of hidden layers, contributes to constructing the architecture of the ANN. This study applies a new framework used to optimize the hyperparameters of ANN for emulating BES in building energy retrofitting.

2. BASE CASE STUDY CHARACTERIZATION

The base case study is a low-energy residential building as depicted in Figure 1, located in Cébazat village near Clermont-Ferrand City in France. The building was constructed in 2010 and comprises three floors, housing 18 apartments with a total area of 1599.2 m². This building was chosen due to the availability of experimental data.



Figure 1 : Exterior view of the base case study

Table 1 presents the thermo-physical characteristics of the building's envelope. The external walls insulation material is Xtherm Itex 32E expanded polystyrene (Anon 2023), with a thermal resistance of $R= 3.4 \text{ m}^2\text{K/W}$. The roof is constructed with a wooden framework and topped with roman tiles, incorporating cellulose fiber insulation with a thermal conductivity of $0.125 \text{ W/m}\cdot\text{C}$. For the windows, insulating double glazing filled with argon (4/16/4) is utilized, of U-value of $1.4 \text{ W/m}^2\cdot\text{C}$ and a PVC frame.

Components	Layers (Out to in)	U-value coefficient ($\text{W/m}^2\cdot\text{C}$)
External wall	1 cm wood cladding	0.12
	15 cm expanded polystyrene	
	18 cm Concrete	
	10 cm expanded polystyrene Plaster (BA13)	
Internal wall	18 cm Concrete	0.25
	15 cm expanded polystyrene	
Ground floor wall	23 cm Concrete deck	0.3
	15 cm Extruded polystyrene	
Roof	20 cm insulation material ($U=0.125 \text{ W/m}^2\cdot\text{C}$)	0.16
	1.3 cm Timber concrete	
Windows	Double glazing with argon 4/16/4	1.4

Table 1: Thermo-physical properties of building's envelope

3. METHODOLOGY

3.1. DEFINING NEURAL NETWORK INPUT PARAMETERS IN BUILDING ENERGY SIMULATIONS

After calibrating the TRN Build (TRNSYS ,2022) for the base case study using measured data, various retrofit measures are incorporated. The integrated passive and renewable retrofit measures on TRNSYS, are then employed as input parameters to construct the ANN model. In addition to the retrofit

measures, weather data and timestep are included. The input parameters adopted for building the ANN model are presented in Table 2.

Parameter Category	Parameter Type	Parameters
Time	Timestep	Hourly time step
Weather condition	Weather data	Ambient temperature Relative humidity Total solar radiation Wind speed Wind direction
Retrofit measures	Passive retrofit measure	External wall insulation thickness Window U-value Roof wall insulation thickness Heating setpoint temperature
	Renewable retrofit measure	Number of Photovoltaics Number of solar collector Number of domestic wind turbines

Table 2: Description of the adopted input parameter for neural network

3.2. MODEL SAMPLING

To train the ANN meta-model, data are required. Therefore, Latin Hypercube Sampling is adopted to provide data by generating samples of the BES, executing different sets of building parameter values for each one. Latin Hypercube sampling is a method employed to sample complex models, being the most widely used random sampling method for data generation and sampling within BES (Roman et al. 2020).

During sampling, the integrated yearly weather data remains the same across all yearly simulations. Each weather file comprises 8760 hourly weather data points spanning a year. Each retrofit scenario is simulated based on these 8760 hours. Subsequently, set of scenarios are sampled across multiple simulations. In essence, the simulated retrofit scenarios vary across simulations in accordance with the changing weather data throughout the year. In each simulation, the objective functions chosen in this study are:

- Hourly Energy Consumption
- Hourly Energy Generation

- Hourly Predicted Mean Vote (PMV)

3.3. HYPERPARAMETER OPTIMIZATION

Hyperparameter optimization (HPO) is a crucial step to ensure the optimal performance of deep learning algorithms, particularly in determining the architecture of ANN for emulating BES. Numerous methods have been developed to execute HPO to search for the suitable ANN architecture. (Morales-Hernández, Van Nieuwenhuysse, and Rojas Gonzalez 2023) conducted a survey on recent HPO algorithms for deep learning. It was concluded that the covariance matrix adaptation evolution strategy (CMA-ES) optimization algorithm stands out as one of the best for addressing single-objective HPO. CMA-ES is particularly effective for optimization problems characterized by non-linear, non-convex, noisy, or explicitly structure-lacking objective functions (Elsken, Metzen, and Hutter 2019). This algorithm is implemented in the Python programming language using the Optuna framework (Akiba *et al.* 2019).

In addressing HPO problems, data are partitioned into three datasets: training, validation, and testing. The training data is utilized to train the proposed model during each iteration of the optimization process. Validation data is employed to assess the performance of the trained model, and after optimization, testing data is used to evaluate the accuracy of the optimal model architecture.

The determination of learning rate, the number of neurons per hidden layer, the number of hidden layers, the type of optimizer, the activation function, and the batch size, is conducted to ascertain the hyperparameters of the ANN model. The implementation of the ANN is carried out using the Python programming language with PyTorch (Paszke *et al.* 2019), a deep learning library for Python.

4. RESULTS AND DISCUSSION

The computation is completed using a standard laptop computer (CPU: Core i5 12500H @ 2.50 GHz, GPU: NVIDIA T600, RAM: 32GB). The GPU is utilized for training and validation as it outperforms the CPU in computational time.

Regarding meta model construction, to determine the number of samples According to Jones, Schonlau, and Welch (Jones, Schonlau, and Welch 1998), it is advisable to ensure that the simulation dataset consists of at least ten times more instances than the number of inputs for black box models. Since our ANN model utilizes 7 retrofit measures, a total of 70 yearly simulations would be sufficient to build the model. However, in this case, 200 yearly simulations were used to develop the model, meaning 2 days. Then, optimizing the hyperparameters consumes 4 days. Hyperparameter optimization is performed once for all, and the optimal model is obtained as outlined in the conference article. Then, Training the model incurs a time cost of about 1 hour. Subsequently, the model simulates each building case studied, with a computational cost of 10 seconds per yearly simulation (iteration). Therefore, running the model for 1000 iterations would require approximately 166.7 minutes (3 hours). This approach allows the model to be trained for any building case studied, and then the parameters can be optimized, thus lowering the computational burden of optimization.

Table 3 presents the optimal values of hyperparameters that are used to train and validate the ANN. The results indicate that a five-layer ANN model with 253 neurons and Gelu activation function,

utilizing the 'Adam' optimizer with a Learning Rate of 0.001, provides the best prediction performance in both tasks.

Hyperparameter	Optimal Value
Number of hidden layers	5
Number of neurons in hidden layer	253
Type of activation	Gelu function
Type of optimizer	Adam optimizer
Batch size	50
Learning rate	0.001

Table 3: Optimal values of ANN's hyperparameter

The average of the three outputs (consumed energy, generated energy, predicted mean vote) mean square loss during iterations is depicted in Fig. 2. The loss remained constant from the 215th generation in training. The results imply a good convergence performance of the ANN model.

The achieved R² errors for consumed energy, generated energy, and predicted mean vote are 0.99, 0.98, and 0.9, respectively. These values demonstrate a highly precise model in comparison to (Ascione *et al.* 2017) where the R² error for energy consumption is reported as 0.96. Hence, the results underscore the importance of hyperparameter optimization in improving the architecture in ANN to emulate BES.

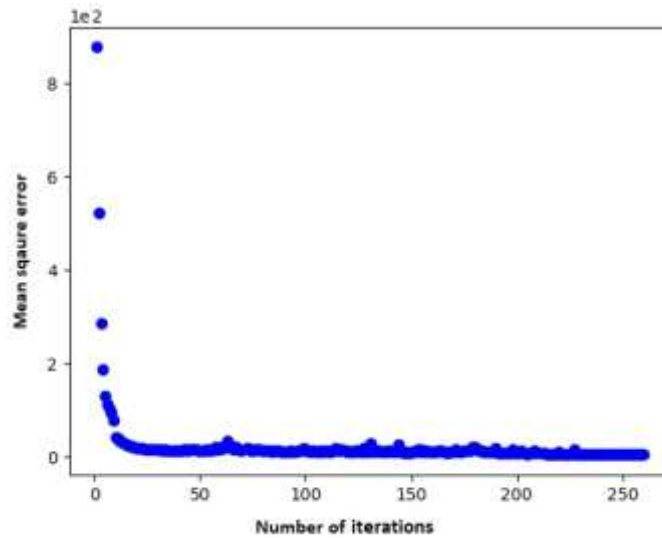


Figure 2: Mean square error loss of ANN per number of iterations

5. CONCLUSION

Building Energy Simulation (BES) is essential for assessing building energy efficiency, offering guidance for sustainable design decisions, and optimizing energy retrofit measures. However, optimizing BES involves a substantial computational burden. To alleviate this burden, an ANN is proposed as a meta-model to replace BES. HPO is employed to identify the optimal hyperparameters of the ANN with highest accuracy. The obtained R^2 errors for consumed energy, generated energy, and predicted mean vote are 0.99, 0.98, and 0.9, respectively. These results underscore the importance of hyperparameter optimization in enhancing the architecture of ANN. As future prospect built meta model will be used to investigated building retrofitting measures in 10 different locations for the climates of 2024, 2050 and 2080, thus producing thousands of simulations.

Future studies should concentrate on multiple outputs by expanding upon multi-objective HPO for ANN. ANNs can be developed to predict multiple outputs, and the model should be optimized based on the errors in predictions across various ANN outputs compared to real data. Moreover, HPO can be extended to different machine learning models, including Support Vector Machines, polynomial regression, Convolutional Neural Networks, and Recurrent Neural Networks.

6. ACKNOWLEDGMENT

The authors express their thanks to “Le Department de l’Allier” for their financial support for this works.

7. REFERENCES

- Akiba, Takuya, Shotaro Sano, Toshihiko Yanase, Takeru Ohta, and Masanori Koyama. 2019. “Optuna: A Next-Generation Hyperparameter Optimization Framework.” <https://doi.org/10.48550/ARXIV.1907.10902>.
- Ascione, Fabrizio, Nicola Bianco, Claudio De Stasio, Gerardo Maria Mauro, and Giuseppe Peter Vanoli. 2017. “Artificial Neural Networks to Predict Energy Performance and Retrofit Scenarios for Any Member of a Building Category: A Novel Approach.” *Energy* 118 (January): 999–1017. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.10.126>.
- Bre, Facundo, Nadia Roman, and Víctor D. Fachinotti. 2020. “An Efficient Metamodel-Based Method to Carry out Multi-Objective Building Performance Optimizations.” *Energy and Buildings* 206 (January): 109576. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109576>.
- Eiben, Agoston E., ed. 1998. *Parallel Problem Solving from Nature-PPSN V: 5th International Conference, Amsterdam, The Netherlands, September 27-30, 1998: Proceedings*. Lecture Notes in Computer Science 1498. Berlin ; New York: Springer.
- Elsken, Thomas, Jan Hendrik Metzen, and Frank Hutter. 2019. “Neural Architecture Search.” In *Automated Machine Learning*, edited by Frank Hutter, Lars Kotthoff, and Joaquin Vanschoren, 63–77. The Springer Series on Challenges in Machine Learning. Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-05318-5_3.
- Harkouss, Fatima, Farouk Fardoun, and Pascal Henry Biwolé. 2018a. “Multi-Objective Optimization Methodology for Net Zero Energy Buildings.” *Journal of Building Engineering* 16 (March): 57–71. <https://doi.org/10.1016/j.job.2017.12.003>.
- . 2018b. “Passive Design Optimization of Low Energy Buildings in Different Climates.” *Energy* 165 (December): 591–613. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.09.019>.
- Jones, Donald R., Matthias Schonlau, and William J. Welch. 1998. “Efficient Global Optimization of Expensive Black-Box Functions.” *Journal of Global Optimization* 13 (4): 455–92. <https://doi.org/10.1023/A:1008306431147>.
- “Le bâtiment en chiffres.” n.d. Accessed June 28, 2023. <https://www.ffbatiment.fr/le-batiment-en-chiffres>.

- “L'énergie en France.” n.d. Agir pour la transition écologique | ADEME. Accessed January 10, 2023. <https://agirpourlatransition.ademe.fr/particuliers/lenergie-france>.
- Morales-Hernández, Alejandro, Inneke Van Nieuwenhuysse, and Sebastian Rojas Gonzalez. 2023. “A Survey on Multi-Objective Hyperparameter Optimization Algorithms for Machine Learning.” *Artificial Intelligence Review* 56 (8): 8043–93. <https://doi.org/10.1007/s10462-022-10359-2>.
- Pan, Yiqun, Mingya Zhu, Yan Lv, Yikun Yang, Yumin Liang, Ruxin Yin, Yiting Yang, et al. 2023. “Building Energy Simulation and Its Application for Building Performance Optimization: A Review of Methods, Tools, and Case Studies.” *Advances in Applied Energy* 10 (June): 100135. <https://doi.org/10.1016/j.adapen.2023.100135>.
- Paszke, Adam, Sam Gross, Francisco Massa, Adam Lerer, James Bradbury, Gregory Chanan, Trevor Killeen, et al. 2019. “PyTorch: An Imperative Style, High-Performance Deep Learning Library.” <https://doi.org/10.48550/ARXIV.1912.01703>.
- Roman, Nadia D., Facundo Bre, Victor D. Fachinotti, and Roberto Lamberts. 2020. “Application and Characterization of Metamodels Based on Artificial Neural Networks for Building Performance Simulation: A Systematic Review.” *Energy and Buildings* 217 (June): 109972. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.109972>.
- “Suite of Tools - Features | TRNSYS : Transient System Simulation Tool.” n.d. Accessed July 4, 2023. <http://www.trnsys.com/features/suite-of-tools.php.html>.
- Zhan, Jin, Wenjing He, and Jianxiang Huang. 2023. “Dual-Objective Building Retrofit Optimization under Competing Priorities Using Artificial Neural Network.” *Journal of Building Engineering* 70 (July): 106376. <https://doi.org/10.1016/j.job.2023.106376>.

Conditions de validité pour l'inférence d'une performance globale d'enveloppe de bâtiment à logements collectifs à partir d'une mesure par échantillonnage

Sarah Juricic*¹, Fadi Lahlou¹, Simon Thébault¹, Arnaud Challansonnex¹

¹ Centre Scientifique et Technique du Bâtiment
84 avenue Jean Jaurès, Champs-sur-Marne 77420 France

*sarah.juricic@cstb.fr

RESUME. La mesure in situ de la performance intrinsèque globale de l'enveloppe d'un bâtiment peut devenir un outil indispensable à la garantie de performance énergétique des bâtiments. Si des méthodes existent pour la maison individuelle, le cas de la caractérisation de l'enveloppe des bâtiments à logements collectifs n'est traité aujourd'hui que par des mesures locales de transferts thermiques de la paroi ou de transmission à l'échelle d'un appartement. L'article propose donc une approche bayésienne pour dépasser le caractère mal posé de l'inférence d'une performance globale à partir d'un échantillon faible tout en intégrant les incertitudes et biais identifiés. L'indicateur global défini permet de prononcer un risque de contre-performance. Les résultats montrent que l'indicateur global détecte des contre-performances quand elles sont significatives et que l'indicateur est sensible aux mesures de transmission thermique des parois. La mesure d'un unique appartement ne semble en revanche pas suffire à rejeter l'hypothèse de conformité et ne doit pas être envisagée seule.

MOTS-CLÉS : Ubât, mesure par échantillonnage, inférence bayésienne

ABSTRACT. On site measurement of the global intrinsic thermal performance of a building would be highly beneficial to energy performance contracting. Some existing methods have been proven robust for measuring stand-alone houses, but performance of building flats has only been assessed through local heat transfer measurements, at wall or flat scale and extrapolation to the global performance has never been tackled. This paper proposes a Bayesian approach to overcome the ill-posed nature of global performance assessment by scarce sampling. The proposed method yields a global indicator that assesses in a probabilistic approach the risk for counter-performance of the building. Results show that the global indicator detects counter-performance when significant and that it is sensitive to wall heat transfer measurements. A single heat transmission at flat scale measurement is however insufficient to reject the performance hypothesis and should be supplemented by other flat or wall measurements.

KEYWORDS : HTC, sampling, Bayesian inference.

1. INTRODUCTION

Une réhabilitation thermique efficace du parc immobilier est aujourd'hui nécessaire pour atteindre les objectifs de décarbonation fixés par l'Union Européenne. La mesure de la performance thermique réellement atteinte pourrait dans ce cadre être un levier conséquent pour la fiabilisation de l'acte de rénover et ainsi garantir la performance prévue initialement (Mozzo 2001). La mesure de la performance thermique peut par exemple consister à mesurer un coefficient de transmission thermique $U_{bât}$ de l'enveloppe, ce qui permet non seulement d'obtenir un mesurande comparable à une grandeur calculable a priori mais de surcroît d'obtenir une grandeur intrinsèque à l'enveloppe (NF EN ISO 13786 : 2017).

Si des méthodes de mesures existent à l'échelle de la maison individuelle (Jack et al. 2018; Alzetto et al. 2018; Juricic et al. 2023), la performance de l'enveloppe de bâtiments de logements collectifs a plutôt été évaluée localement par des mesures de la transmission thermique U de parois (Meulemans 2019). Les mesures locales ne permettent cependant pas de se prononcer sur la performance intrinsèque globale de l'enveloppe car elles ne rendent pas bien compte de la variabilité possible de performance des parois et ne prennent pas en compte l'effet des ponts thermiques. Pour autant, une mesure de la performance de l'enveloppe à l'échelle d'un appartement s'avère possible (de Carvalho Araujo et al. 2023; Juricic 2024). Couplée à des mesures locales de U , ces mesures reviennent à effectuer un échantillonnage de l'enveloppe dans son ensemble.

Le verrou auquel ce travail s'attache à répondre est de pouvoir effectuer une évaluation de la performance globale à partir d'un échantillon de mesures. Plus précisément, la question est (1) de savoir comment inférer une évaluation de la performance à partir d'un échantillon réduit et (2) de déterminer à partir de quelle taille et type d'échantillon il est possible d'avoir une évaluation globale fiable.

La question de l'inférence à partir d'un échantillon réduit n'est en effet pas triviale car ces mesures forment un système d'équations *mal posé*, au sens où sa résolution est entachée d'incertitudes si ce n'est impossible. Le coefficient $U_{bât}$ global, dont le calcul direct est décrit en équation (1), ne peut pas être mesuré directement, sauf dans le cas hypothétique et peu répandu d'un très petit bâtiment de logements collectifs. De manière opérationnelle, on ne dispose que de N mesures de N appartements qui décrivent alors un système de N équations de type (2).

$$U_{bât} S_{déper} = \sum_i U_i S_{i,tot} + \sum_j \Psi_j L_{j,tot} \quad (1)$$

$$U_{appt\ n} S_{déper,n} = \sum_i U_i S_{i,appt\ n} + \sum_j \Psi_j L_{j,appt\ n} \quad (2)$$

Même en supposant que les coefficients de transmission thermique et que les ponts thermiques sont parfaitement homogènes sur toute l'enveloppe, ce système comporte plus d'inconnues que de mesures réalistement faisables sur le terrain pour des raisons opérationnelles et de coût. Quand bien même cela serait faisable, une résolution des moindres carrés sur ce type de systèmes rendrait mal compte des incertitudes de mesures et de la possible variabilité des mesures de U des parois instrumentées.

Cet article propose au contraire de changer de paradigme et, au lieu d'estimer un $U_{bât}$ global à partir de peu de mesures, s'attache à quantifier un risque de contre-performance par la mesure. La philosophie proposée est de poser l'hypothèse de base que le bâtiment a la performance prévue par le calcul et de soumettre l'hypothèse à l'épreuve des mesures. Si les mesures font mentir l'hypothèse alors preuve peut

être faite d'un bâtiment contre-performant. L'article montre d'abord comment objectiver le risque de contre-performance dans une approche bayésienne, en intégrant les mesures locales de U aussi bien que les mesures de l'enveloppe à l'échelle d'un logement. Ensuite, un plan d'expérience est déroulé pour évaluer la fiabilité de l'indicateur ainsi défini.

2. DE L'ECHANTILLON AU GLOBAL : METHODE D'EVALUATION PAR INFERENCE BAYESIENNE

2.1. PRINCIPE DE L'EVALUATION EN APPROCHE BAYESIENNE

Le principe général de l'évaluation globale de la performance consiste à évaluer le risque qu'il y ait une contre-performance significative par rapport à ce qui est prévu dans la note de calcul thermique (ou tout autre calcul faisant foi). Chacune des mesures effectuées dans le bâtiment est intégrée à l'évaluation et actualise le calcul du risque de contre-performance :

- plus il y a de mesures (logements ou parois) très au-dessus des prévisions de la note de calcul thermique, plus le risque de contre-performance est élevé ;
- si au contraire les mesures sont raisonnablement proches des valeurs ciblées par la note de calcul thermique, l'évaluation fera apparaître qu'il n'y a pas de raison de penser qu'il y a une contre-performance.

Pour quantifier l'évaluation du risque de contre-performance, on se place dans une approche bayésienne du problème. Illustrée ci-dessous en Figure 1, cette approche consiste à (I) initialiser les valeurs de performance locales (II) mettre à jour ces hypothèses avec les mesures effectuées (III) inférer un indicateur global de performance et le comparer à la valeur initiale cible.

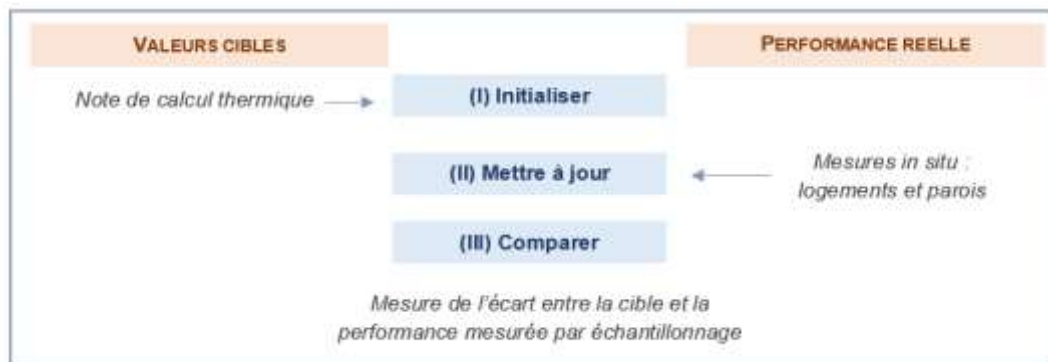


Figure 1 : Principe de l'approche bayésienne pour le calcul de l'indicateur global

On suppose par ailleurs que l'enveloppe du bâtiment est homogène et qu'une note de calcul thermique est disponible. Cette dernière est elle-même supposée suffisamment juste pour être interprétée.

L'approche bayésienne permet de traduire de manière effective sous forme de probabilité le degré de croyance en une hypothèse tout en évitant d'émettre des suppositions sur les distributions sous-jacentes dans lesquelles sont tirées chacune des mesures (Box and Tiao 1992). Concrètement, la philosophie est en effet de poser une hypothèse H_0 que la performance réelle intrinsèque est significativement proche de la performance prévue dans la note de calcul thermique. L'approche bayésienne permet donc de mettre à jour avec les mesures et de tester les limites de cette hypothèse.

2.1.1. Initialisation : attribution de distributions a priori

L'initialisation du problème en approche bayésienne revient à attribuer des distributions de probabilité a priori à chacune des variables. Comme l'hypothèse H0 suppose que le bâtiment est aussi performant que prévu par calcul, les distributions choisies sont des normales centrées autour des valeurs prévues dans la note de calcul thermique. Elles sont associées à une incertitude élargie de 30 %, conformément à l'équation (3), pour rendre compte de la possibilité d'une contre-performance (Farkh et al 2024), sans risque d'attribuer un prior ni non informatif ni trop informatif.

$$U_i \sim \mathcal{N} \left(\mu = u_{i, \text{note thermique}}, \sigma = \sqrt{\frac{1}{1,96} \times \frac{30}{100} \times u_{i, \text{note thermique}}} \right) \quad (3)$$

Sont aussi modélisées par des distributions normales, mais d'incertitude de 15 %, les coefficients de déperditions par les ponts thermiques (si explicitement comptabilisés dans la note de calcul thermique), ainsi que le coefficient de déperditions des fenêtres U_w . L'hypothèse sous-jacente du choix des 15 % d'incertitude est que les déperditions par les fenêtres sont plus certaines que celles des parois car caractérisées en usine. Leur mise en œuvre sur le terrain peut altérer leur performance, mais plutôt en tant que ponts thermiques qui n'auraient pas été comptabilisés. Cette hypothèse suppose tout de même qu'une visite d'inspection ait été réalisée in situ pour valider l'installation des ouvrants prévus dans la note de calcul thermique.

Les distributions a priori données à chacune des variables traduisent donc jusque-là la connaissance a priori que l'on peut avoir sur le bâtiment tel quel, c'est-à-dire que celui-ci est conforme à ce qui est prévu dans la note de calcul thermique. L'indicateur de performance globale qu'on peut calculer de manière probabiliste a priori sera ainsi centré sur la valeur de $U_{\text{bât}}$ cible calculée.

2.1.2. Mise à jour vers une distribution postérieure : intégration des mesures in situ

L'intégration des mesures in situ conduit à déclarer dans le modèle les variables qui font l'objet d'une mesure puis amène à l'étape d'estimation de la distribution des variables a posteriori. Cette étape fait appel au théorème de Bayes dont on peut dériver la distribution postérieure non normalisée d'une variable sachant des mesures en fonction de sa distribution a priori et de la vraisemblance des mesures $p(\theta|y) \propto p(\theta)p(y|\theta)$ (Gelman et al. 2020). L'évaluation de la distribution postérieure se fait de manière classique à l'aide d'un algorithme de Monte-Carlo à gradient (Hoffman and Gelman 2011).

L'étape finale consiste à normaliser un $U_{\text{bât}}$ global à partir de l'équation (1) à partir des distributions postérieures de chacune des variables. La méthode veille à conserver les distributions telles quelles, c'est-à-dire avec leur covariance, pour propager d'éventuelles colinéarités.

Notons enfin que si le calcul de l'indicateur global est basé sur la définition du $U_{\text{bât}}$, les hypothèses faites à l'étape (I) de ne conserver que les inconnues prises en compte dans la note de calcul thermique introduit une erreur de modèle qui peut éloigner l'indicateur du $U_{\text{bât}}$. Ainsi, il ne sera pas possible d'interpréter l'indicateur final en tant qu'estimation du $U_{\text{bât}}$ stricto sensu mais il reste par définition un indicateur de risque de contre-performance.

2.1.3. Analyse des distributions postérieures par la règle de décision HDI+ROPE

Pour statuer sur l'hypothèse H0 initiale de savoir si la performance du bâtiment instrumenté est au niveau de ce qui était prévu dans la note de calcul thermique, on compare la distribution postérieure de

l'indicateur (par son intervalle HDI pour *highest density interval*) à une zone prédéfinie dite ROPE traduisant l'hypothèse H_0 , autour de la valeur cible du coefficient $U_{bât}$ normalisé (ROPE pour *region of practical equivalence*). La méthode (Kruschke 2018; Schwaferts and Augustin 2020) prévoit 3 possibilités : (1) l'hypothèse H_0 est acceptée si la totalité du HDI (soit 94 % du postérieur) est dans la ROPE (2) l'hypothèse H_0 est rejetée si la totalité du HDI est en dehors de la ROPE ou (3) le HDI n'est ni entièrement dans la ROPE ni entièrement dehors, on ne peut alors pas se prononcer.

La zone ROPE est par nature subjective car elle traduit, à dire d'expert, la zone autour du $U_{bât}$ cible que l'on peut considérer comme assimilable à une performance conforme à la cible. A la différence des applications dans (Kruschke 2018), il n'est pas nécessaire de discriminer un postérieur situé à la cible d'un postérieur inférieur à la cible (qui traduirait une meilleure performance que prévue). Dans ce travail, la cible est normalisée donc la ROPE est fixée à $[-\infty ; 1,15]$ (soit 15 % d'erreur), le seuil est soumis à discussion dans la partie des résultats.

2.2. ECHANTILLONNAGE PAR MESURES LOCALES

La mise à jour de l'indicateur décrite dans l'étape (II) suppose qu'un échantillon de mesures locales est disponible. On suppose dans cette étude que deux types de mesures sont possibles : des mesures du U_{appt} , coefficient de transmission thermique de l'enveloppe d'un logement, et des mesures locales du coefficient de transmission surfacique d'une paroi U . Les mesures du U_{appt} sont faites selon le protocole de mesure Sereine pour le logement collectif (décrite dans (Juricic 2024) et (de Carvalho Araujo et al. 2023)). Ces mesures sont nécessairement faites aux angles (de Carvalho Araujo et al. 2023) et en priorité dans le ou les appartement(s) de plus grande(s) surface(s) déperditif(s) pour des raisons de minimisation des incertitudes liées aux flux de chaleur vers les espaces mitoyens (qui sont généralement les sources d'incertitudes majoritaires dans ces configurations). On considèrera une incertitude élargie de 20 % pour ces mesures. Quant aux mesures locales de U , elles sont supposées réalisées conformément à la norme ISO 9869-1. Ces mesures peuvent être uniques ou répétées sur un seul ou plusieurs types de paroi (plancher haut, bas, paroi courante, ...). On considère 10 % d'incertitude élargie.

3. ROBUSTESSE DE L'ÉVALUATION PAR INFERENCE

3.1. PLAN D'EXPERIENCES

Pour évaluer la fiabilité de l'indicateur global défini dans la section précédente, un plan d'expérience numérique est mis en place pour d'une part valider la détection de contre-performances manifestes et en évaluer les limites de détection et d'autre part pour mettre en évidence l'importance du nombre et de la qualité de l'échantillon de mesures. Pour cela, un bâtiment de 12 logements collectifs (R+3, logements traversants) est simulé avec et sans contre-performances, tel que précisé dans le Tableau 1 (Farkh, Leguillon, and Lahlou 2024).

	$U_{bât}$ (W/(m ² K))	Déviations du $U_{bât}$ (%)
Témoin	0,50	-
Défaut de mise en œuvre de l'isolant en face extérieure ($U_{paroi} + 220\%$)	0,63	+ 25,6 %
Pont thermique baies / mur sous-estimé ($\Psi = 0,4$ W/(mK))	0,56	+ 18,0 %
Pont thermique plancher bas / refend non traité ($\Psi = 0,43$ W/(mK))	0,52	+ 5,0 %

Tableau 1 : Contre-performances simulées pour évaluer la robustesse de l'indicateur global

On teste ensuite, pour chaque version, 4 plans de mesurage : 1 ou 4 mesures de U_{appt} accompagnée(s) ou non de mesures locales répétées de U de parois (plancher haut, plancher bas et paroi courante).

3.2. RESULTATS

La Figure 2 montre l'ensemble des résultats des indicateurs globaux simulés dans le plan d'expérience. Chaque cadran correspond à une simulation de performance différente : témoin ou avec contre-performances. L'initialisation de l'indicateur est dans chaque cadran identique, ce qui est cohérent avec une initialisation aux valeurs données dans la note de calcul thermique. Quant aux mises à jour, elles diffèrent dans chaque cas en fonction du plan de mesurage.

Le cas témoin, cadran supérieur gauche de la Figure 2, permet de vérifier la pertinence du seuil de 15 % pour la ROPE. Ici, quel que soit le plan de mesurage, l'indicateur global valide l'hypothèse de conformité à la note de calcul thermique. Un seuil pour la ROPE plus faible, par exemple à 10 % d'erreur, validerait l'hypothèse de performance pour tous les plans sauf celui de mesurage unique. Pour autant, un seuil plus faible rendrait non concluant le cas de 4 mesures U_{appt} en contre-performance 5,0 %, alors que la contre-performance n'est pas élevée. On en revient à la question de subjectivité du seuil et donc d'acceptabilité du niveau de contre-performance vis-à-vis d'un maître d'ouvrage.

On note sinon, pour le cas témoin et les simulations de contre-performances de 18,0 % et 5,0 %, qu'une seule mesure de U_{appt} sans mesures locales de U de parois ne produit pas de mise à jour significative comparée à l'initialisation. La mise à jour est significative pour le cas de contre-performance à 25,6 % (cadran supérieur droit) mais ne suffit pas à invalider l'hypothèse de conformité. On peut en déduire que cette unique mesure ne constitue pas un échantillonnage satisfaisant.

Dans tous les cas, on observe que des mesures de U de parois sont très influentes sur l'indicateur global. Elles permettent immédiatement d'exclure l'hypothèse H_0 dans la simulation de 25,6 % de contre-performance qui porte sur un défaut de mise en œuvre de l'isolant. En revanche, elles entrent en conflit avec les mesures U_{appt} car elles recentrent les mises à jour vers des valeurs performantes quand la contre-performance est due à un pont thermique. Ainsi, l'indicateur global pour la contre-performance de 18,0 %, due à un pont thermique baies/paroi courante, ne rejette jamais l'hypothèse de performance, même avec un seuil de ROPE à 15 %, inférieur à la contre-performance. Deux options sont à envisager : donner moins de poids aux mesures de U lors de la mise à jour du modèle bayésien ou donner moins de poids à l'initialisation qui pondère encore significativement les mises à jour mais avec le risque de perdre l'avantage de la régularisation. Une autre manière de voir ce verrou est d'admettre un seuil minimal de détection possible, qui serait différent du seuil de ROPE : en deçà d'une limite, le plan de mesurage donné ne peut pas avec certitude rejeter l'hypothèse de performance. L'articulation de cette limite avec le seuil de ROPE reste à définir.

Au contraire, si l'on ne dispose pas de mesures de U de parois, le nombre de mesures de U_{appt} suffit a minima à ne pas accepter immédiatement l'hypothèse H_0 de performance dans le cas de contre-performance de 25,6 % (cadran supérieur droit). En pratique, cela se traduirait par des mesures complémentaires sur site pour affiner le résultat. Avec l'amélioration de l'indicateur global proposée supra, on peut également supposer que 4 mesures de U_{appt} permettront d'entrer dans la zone de décision indéterminée et donc d'enclencher des mesures locales supplémentaires.

Si ces résultats mettent en évidence l'importance du plan de mesurage, des simulations complémentaires permettront d'affiner la pertinence de faire moins ou de plus de 4 mesures à l'échelle du logement et de cibler les mesures de U de parois. Une évaluation quantitative des ponts thermiques (Nardi et al. 2018) pourraient aussi être intégrée au plan de mesurage et intégrée dans un 2^e temps dans le modèle d'indicateur global. Ultérieurement, la robustesse du choix de certains hyperparamètres devra être confortée, comme ceux des incertitudes élargies des priors, choisis à dire d'expert à 30 % et 15 %.

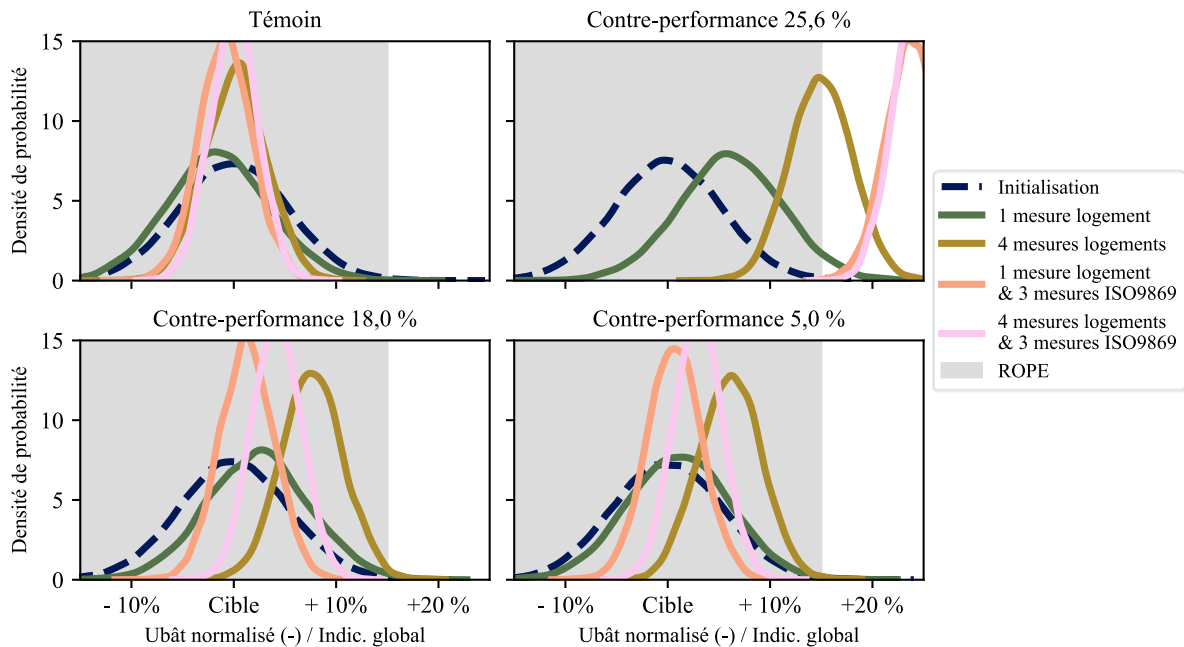


Figure 2 : Indicateur global pour 4 simulations de performance et 4 plans d'échantillonnage

4. CONCLUSION

Disposer d'une évaluation de la performance intrinsèque globale de bâtiments de logements collectifs robuste et opérationnelle permettrait de mettre en œuvre des dispositifs de vérification de la performance atteinte et d'aller vers de la garantie contractuelle. Or une mesure directe de la performance globale est difficilement envisageable, seules des mesures à l'échelle d'un appartement ou de transmission thermique de parois sont faisables. Extrapoler au bâtiment entier un échantillonnage restreint est un problème par nature mal posé.

L'approche bayésienne présentée dans cet article permet d'aborder la question de l'évaluation globale comme celle d'un risque de contre-performance au travers d'un indicateur global. Les mesures acquises permettent une mise à jour de l'indicateur qui diverge de l'hypothèse de performance si les mesures montrent un écart significatif avec la performance initialement ciblée. Un plan d'expérience a montré l'importance du nombre de mesures pour la mise à jour de l'indicateur global. En cas de contre-performance, celui-ci permet au mieux de rejeter immédiatement l'hypothèse de performance, sinon d'entrer dans la zone intermédiaire d'indétermination ce qui amène en pratique à proposer des mesures complémentaires sur site. Des pistes d'améliorations restent à explorer pour mieux aborder les cas de contre-performances dues uniquement à des ponts thermiques et ainsi éviter de faux-positifs de

l'indicateur global. Couplée à un protocole d'inspection qualitative des défauts sur site, la méthodologie proposée pourrait alors devenir un outil fiable pour l'évaluation de la performance thermique globale.

5. BIBLIOGRAPHIE

- Alzetto, Florent, Guillaume Pandraud, Richard Fitton, Ingo Heusler, and Herbert Sinnesbichler. 2018. 'QUB: A Fast Dynamic Method for in-Situ Measurement of the Whole Building Heat Loss'. *Energy and Buildings* 174 (September): 124–33. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.06.002>.
- Box, George E.P., and George C. Tiao. 1992. *Bayesian Inference in Statistical Analysis*. Wiley Classics Library.
- Carvalho Araujo, Lorena de, Simon Thébault, Laurent Mora, Thomas Recht, Alain Sempey, Patrick Schalbart, and Michaël Cohen. 2023. 'Development of a Short Duration Method to Assess the Envelope Thermal Performance of Multi-Family Housings'. *Building Simulation*, February.
- Farkh, Salem, Franck Leguillon, and Fadi Lahlou. 2024. 'Etude de l'impact de la mise en œuvre sur la performance d'isolation thermique de la paroi'. CSTB. <https://librairie.ademe.fr/urbanisme-et-batiment/6846-etude-de-l-impact-de-la-mise-en-oeuvre-sur-la-performance-d-isolation-thermique-de-la-paroi.html>.
- Gelman, Andrew, John B Carlin, Hal S Stern, David B Dunson, Aki Vehtari, and Donald B Rubin. 2020. *Bayesian Data Analysis*. 3d ed. CRC Press.
- Hoffman, Matthew D., and Andrew Gelman. 2011. 'The No-U-Turn Sampler: Adaptively Setting Path Lengths in Hamiltonian Monte Carlo'. arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1111.4246>.
- Jack, Richard, Dennis Loveday, David Allinson, and Kevin Lomas. 2018. 'First Evidence for the Reliability of Building Co-Heating Tests'. *Building Research & Information* 46 (4): 383–401.
- Juricic, Sarah. 2024. 'Influence Des Flux Mitoyens Sur La Précision d'une Mesure Sereine Du Coefficient de Transmission Thermique d'un Appartement Seul'. <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.30996.10882>.
- Juricic, Sarah, Mickaël Rabouille, Arnaud Challansonnex, Arnaud Jay, Simon Thébault, Simon Rouchier, and Rémi Bouchié. 2023. 'The Sereine Test: Advances towards Short and Reproducible Measurements of a Whole Building Heat Transfer Coefficient'. *Energy and Buildings* 299 (November): 113585.
- Kruschke, John K. 2018. 'Rejecting or Accepting Parameter Values in Bayesian Estimation'. *Advances in Methods and Practices in Psychological Science* 1 (2): 270–80
- Meulemans, Johann. 2019. 'An Assessment of the QUB/e Method for Fast In Situ Measurements of the Thermal Performance of Building Fabrics in Cold Climates'. In *Cold Climate HVAC 2018*, edited by Dennis Johansson, Hans Bagge, and Åsa Wahlström, 317–26. Springer Proceedings in Energy. Cham: Springer International Publishing.
- Mozzo, Martin A. 2001. 'Setting the Energy Baseline For Performance Contracts'. *Strategic Planning for Energy and the Environment* 21 (1): 12–19.
- Nardi, Iole, Elena Lucchi, Tullio de Rubeis, and Dario Ambrosini. 2018. 'Quantification of Heat Energy Losses through the Building Envelope: A State-of-the-Art Analysis with Critical and Comprehensive Review on Infrared Thermography'. *Building and Environment* 146 (December): 190–205.
- Schwaferts, Patrick, and Thomas Augustin. 2020. 'Bayesian Decisions Using Regions of Practical Equivalence (ROPE): Foundations'. Technical Report 235. University of Munich - Department of Statistics.

Influence des flux mitoyens sur la justesse d'une mesure Sereine du coefficient de transmission thermique d'un appartement seul

Sarah Juricic*¹, Simon Thébault¹, Arnaud Challansonnex¹ et Patrick Schalbart²

¹ Centre Scientifique et Technique du Bâtiment
84 avenue Jean Jaurès, Champs-sur-Marne
*sarah.juricic@cstb.fr

² Mines Paris, Université PSL, Centre d'Énergétique des Systèmes (CES)
75006, Paris

RESUME.

L'évaluation de la performance thermique globale de l'enveloppe d'un bâtiment par la mesure in situ peut devenir un outil indispensable à la garantie de performance énergétique, sous réserve d'exactitude et de fidélité adéquates à cette finalité. Si des méthodes existent pour la maison individuelle, le cas de la caractérisation de l'enveloppe des bâtiments de logements collectifs n'est traité jusqu'aujourd'hui que par des mesures locales de transferts thermiques. Cet article vise à évaluer l'opportunité de les compléter par des mesures de logements par échantillonnage, par nature très incertaines du fait des flux thermiques de et vers les espaces mitoyens. Notamment, via un cas d'étude numérique, l'influence de la variabilité spatiale des flux mitoyens sur la validité d'une mesure est évaluée sous trois climats et deux niveaux de performance thermique globale. Sont alors esquissées des limites opérationnelles d'une mesure in situ de la performance d'un logement seul. Les résultats confirment que ces limites dépendent du niveau d'isolation de l'enveloppe, comme supposé dans le bilan énergétique initial.

MOTS-CLÉS : Coefficient de transmission thermique, mesure, incertitudes

ABSTRACT.

Assessing the overall thermal performance of a building envelope from on-site measurements could be a game-changer to performance contracting if accuracy and precision are adequate. Measurement methods are available for house-testing but building blocks have so far only been assessed based on local thermal transfer measurements. This paper aims at evaluating the adequacy of individual flat performance measurement, made highly uncertain due to thermal transfers from and to adjacent zones. In particular, a numerical case study focuses on the influence of heat flux spatial variability on the precision of flat level performance measurement. Numerical tests are performed under three climates and two performance versions of the building model. Operational limits are thereby drawn and results confirm that acceptability of the measurement is dependent on the insulation level of the envelope, as was initially assumed in the energy balance.

KEYWORDS : thermal transfer coefficient, measurement, uncertainty

1. INTRODUCTION

La chaîne de valeur du bâtiment a, en 2019, une empreinte carbone de 153 Mt CO₂e, soit 25 % de l'empreinte annuelle de la France. Entre autres, la rénovation efficace du parc immobilier est incontournable pour diminuer ses émissions ainsi que lutter contre la précarité énergétique. Dans ce cadre, la mesure de la performance est identifiée comme un levier pour améliorer les pratiques et rendre possible la contractualisation de l'atteinte des performances lors de la construction ou de la réhabilitation

(Filière Bâtiment 2023). La mesure de la performance thermique intrinsèque de l'enveloppe, notamment du coefficient de transmission thermique $U_{bât}$ offre un mesurande fiable et comparable au calcul. Des méthodes existent en maison individuelle (Alzetto et al. 2018; Jack et al. 2018; Juricic et al. 2023) mais pas en immeuble de logements collectifs, dont la performance n'est aujourd'hui évaluée que localement.

À la différence d'une maison individuelle, la performance globale d'un immeuble ne peut que difficilement être mesurée directement et doit faire l'objet d'un échantillonnage, en mesurant un ou plusieurs logements séparément. Contrairement à la maison individuelle, la mesure d'un logement seul est perturbée par les flux thermiques provenant des espaces mitoyens qui influent significativement sur le bilan d'énergie de la zone, notamment dans un bâtiment rénové ou neuf. Dans la mesure où une instrumentation en fluxmètres extensive n'est que difficilement envisageable, l'évaluation de la performance à l'échelle d'un logement doit inclure l'incertitude parfois élevée de la nature des flux mitoyens (de Carvalho Araujo 2022).

Cet article se propose en particulier d'évaluer l'impact de l'incertitude due à la variabilité spatiale du flux thermique d'une paroi mitoyenne sur le résultat d'une mesure du $U_{bât}$ d'un appartement. Pour évaluer l'opportunité de différentes solutions d'instrumentation, des expérimentations sur site sont d'évidence coûteuses en temps et l'étude est menée sur la base d'expérimentations numériques. Un immeuble de logements collectifs est ainsi modélisé dans un logiciel de simulation thermique dynamique. Dans ce modèle, il est alors possible de modifier les conditions météorologiques, les caractéristiques du logement et les options d'instrumentation. Cet article présente ainsi les résultats obtenus dans les expérimentations numériques et dessine la viabilité théorique du mesurage du $U_{bât}$ d'un appartement en termes de fiabilité, répétabilité et reproductibilité.

2. ÉTUDE DE LA METHODE DE MESURAGE DU U_{BAT} D'UN APPARTEMENT

2.1. MESURAGE DU U_{BAT} D'UN APPARTEMENT

Le mesurage du $U_{bât}$ d'un appartement peut se faire identiquement à celle d'une maison individuelle : l'ambiance intérieure est contrôlée par des dispositifs de chauffage rapportés, les ouvertures occultées pour négliger les apports solaires, la ventilation coupée et bouches d'entrée et sortie d'air fermées hermétiquement. Les dispositifs de chauffage rapportés provoquent des flux aussi bien à travers les parois mitoyennes (notées 3 dans la Figure 1) qu'à travers la partie de l'enveloppe donnant sur l'extérieur, dès que les différences de température sont non nulles. Or seule l'enveloppe donnant sur l'extérieur est l'objet du mesurage. L'estimation du $U_{bât}$ doit donc d'abord estimer ou mesurer les transferts thermiques au travers des parois mitoyennes pour ne pas attribuer ces pertes ou gains au $U_{bât}$.

Une instrumentation des parois avec des fluxmètres assure en théorie une estimation directe des flux thermiques entrants ou sortants par les parois mitoyennes, or la mesure des flux mitoyens est soumise à plusieurs types d'incertitudes à propager : (I) aléatoire, liée au capteur, (II) systématique, liée au capteur, à la chaîne d'acquisition, *etc.* et (III) due à la variabilité spatiale du flux par les parois mitoyennes, notamment pour les parois hétérogènes. Les incertitudes aléatoires et systématiques peuvent être quantifiées et classiquement propagées (JCGM/WG1 2008). En revanche, l'incertitude de mesure due à la variabilité spatiale de flux thermique n'est pas connu a priori et très peu documenté dans la littérature (de Carvalho Araujo 2022). Idéalement, un échantillonnage de chacune des parois mitoyennes, dont les planchers hauts ou bas, avec un grand nombre de capteurs de flux permettrait d'évaluer les flux mitoyens

avec précision. De manière opérationnelle, un nombre restreint de capteurs contraint à limiter la mesure sur des parois supposées homogènes pour favoriser l'instrumentation de surfaces hétérogènes en flux.

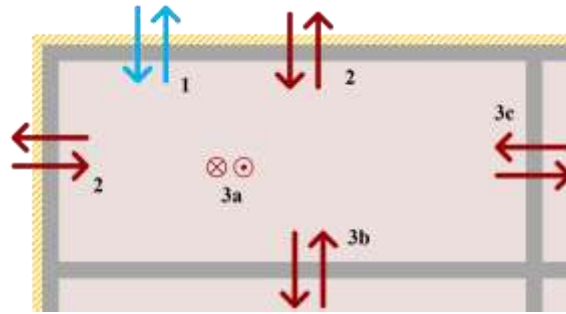


Figure 1 : Flux thermiques entrant et sortant d'un appartement lors d'une mesure : (1) Transferts par infiltration (2) Transferts par transmission vers l'extérieur (3) Transferts par transmission vers les zones mitoyennes verticales (a) ou horizontales (b & c)

Or ces flux présentent non seulement une variabilité spatiale non nulle, de 0,5 à 5 W/m² de différence, (de Carvalho Araujo 2022) mais contribuent de plus majoritairement au bilan d'énergie. Comme illustré dans le Tableau 1, à raison de quelques degrés d'écart au plus avec les zones mitoyennes, les transferts thermiques vers les zones mitoyennes dans un bâtiment rénové sont les plus grands contributeurs au bilan des transferts thermiques par transmission. Les incertitudes dues à la variabilité spatiales des flux sur une même paroi contribuent de facto fortement à l'incertitude totale de la mesure du $U_{bât}$.

Taux de mitoyenneté A_{mit}/A_{tot}	Logement en angle en étage intermédiaire : 80 %	Logement non en angle au premier/dernier niveau : 60 %	Logement en angle au premier/dernier niveau : 50 %
$T_{int} - \overline{T_{mit}} = 1 K$	79,2 %	58,8 %	48,7 %
$T_{int} - \overline{T_{mit}} = 2 K$	88,4 %	74,0 %	65,5 %
$T_{int} - \overline{T_{mit}} = 3 K$	91,9 %	81,0 %	74,0 %

Tableau 1 : Illustration des contributions des transferts mitoyens (Figure 1 (3)) aux transferts thermiques par transmission totaux (Figure 1(2)+(3)). Ici $T_{int} - T_{ext} = 20 K$, paroi mitoyenne en voile béton tel que $R_{mit} = 0,17 W/(m^2 K)$ et parois extérieures voile béton isolé tel que $R_{ext} = 3 W/(m^2 K)$

Ces constats amènent à trois corollaires : il est (1) préférable de baser l'échantillon de mesure sur les appartements qui minimisent le taux de mitoyenneté, (2) de diminuer l'écart de température avec les zones mitoyennes par une consigne de chauffe appropriée et (3) nécessaire d'évaluer quantitativement l'influence de la variabilité spatiale des flux thermiques vers les mitoyens sur la précision de la mesure de $U_{bât}$. Le dernier point fait l'objet de l'étude présentée ci-après.

2.2. CALCUL DU U_{BAT} ET EXPERIMENTATIONS NUMERIQUES

Pour évaluer l'influence de la variabilité spatiale des transferts thermiques au travers des parois mitoyennes est mise en place une expérimentation numérique basée sur des simulations thermiques dynamiques d'un modèle de bâtiment de type barre de quatre étages à logements traversants. La simulation est faite sous EnergyPlus, au pas de temps 5 minutes. Les infiltrations y sont modélisées avec le paramétrage BLAST, donc une dépendance bilinéaire à la différence de température et à la vitesse de

vent. Les ponts thermiques ne sont pas nativement paramétrés dans EnergyPlus mais sont ajoutés comme des surfaces additionnelles, sans échanges radiatifs, de performance faible et d'inertie non nulle car ils sont situés sur des éléments structurels en béton. Notons enfin que le premier essai a lieu le 2 janvier, ce qui laisse supposer que l'initialisation du solveur (au 1^{er} janvier) est possiblement influente sur le premier résultat, sans que cela invalide les conclusions.

La zone mesurée est un appartement en angle supérieur qui jouxte 3 zones mitoyennes (voir Figure 2) : une cage d'escalier non climatisée mais considérée comme un espace chauffé (sa surface non déperditive au sens de la réglementation), un appartement voisin au même étage et un appartement voisin au-dessous. La zone mesurée est maintenue à une température de 21 °C. Les zones mitoyennes, dont les températures sont opérationnellement non connues, sont simulées en évolution libre pour la cage d'escalier et selon 2 scenarii pour les appartements, montrés en Figure 2. Un essai consiste à récolter la puissance de chauffage, la température d'air intérieure, les conditions météorologiques et les flux mesurés sur les parois mitoyennes.

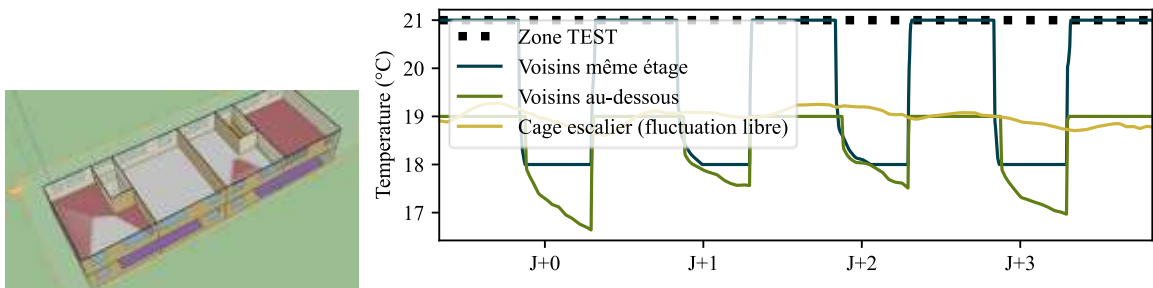


Figure 2 : Coupe du modèle de bâtiment (à g.) et conditions en température des simulations (à d.)

La simulation prévoit le préchauffage à la même température de la zone de test pendant 5 jours. On considère alors que le régime permanent est quasi-atteint, même si la variabilité journalière de la température et de l'ensoleillement influent encore sur le résultat. Le calcul du $U_{bât}$ se fait ainsi :

$$U_{bât} = \int_{t_{début}}^{t_{fin}} (P_h(t) - P_{inf}(t) - P_{mit}(t)) dt / S_{déperditive} \int_{t_{début}}^{t_{fin}} (T_i(t) - T_e(t)) dt + \delta \quad (1)$$

avec $P_h(t)$ la puissance de chauffage (W), T_i (resp. T_e) la température d'air intérieure (resp. extérieure) en °C. La puissance perdue ou gagnée par les infiltrations d'air $P_{inf}(t)$ (W) est modélisée, estimée et retirée du bilan. La puissance perdue ou gagnée du fait des flux mitoyens $P_{mit}(t)$ fait l'objet de l'étude, estimé à partir des fluxmètres posés sur les parois mitoyennes. Le terme δ désigne l'erreur de modèle, erreur qui vient de l'hypothèse non parfaitement juste de stationnarité du flux. $U_{bât}$ s'exprime en W/(m²K). Son équivalent non surfacique est le H_{tr} , exprimé en W/K et vaut $U_{bât} \cdot S_{déper}$.

Le calcul des incertitudes se fait selon les règles du GUM (eq. 2)

$$u_{U_{bât}} = 1,96 \times \sqrt{\left(\frac{\partial U_{bât}}{\partial P_h} u_{Ph}\right)^2 + \left(\frac{\partial U_{bât}}{\partial T_{ext}} u_{T_{ext}}\right)^2 + \left(\frac{\partial U_{bât}}{\partial T_i} u_{T_i}\right)^2 + \sum_{j=1}^n \left(\frac{\partial U_{bât}}{\partial \varphi_{mit,j}} u_{\varphi_{mit,j}}\right)^2} \quad (2)$$

L'expérimentation numérique vise alors à évaluer la fiabilité et la répétabilité de cette méthode de mesurage de $U_{bât}$ et son incertitude dans les conditions aux limites précitées et en faisant varier la durée de la mesure, les conditions météorologiques et climatiques. Dans cette première phase de travail, trois

climats ont été sélectionnés pour obtenir des conditions météorologiques variées et relativement représentatives de la variabilité météorologique française : Strasbourg, Nantes et Marseille. Les données utilisées sont des fichiers de données météorologiques annuels typiques dits TMY.

Pour limiter le coût computationnel, on limite le plan d'expérience à trois niveaux de variabilité spatiale des flux : cas bas de $0,5 \text{ W/m}^2$, cas médian de $2,5 \text{ W/m}^2$ et cas haut de 5 W/m^2 . Pour chaque climat typique, la simulation inclut deux mesures par mois soit 66 essais répartis sur toute l'année. De plus, quatre durées différentes sont étudiées : 12 h, 24 h, 36 h et 48 h pour évaluer l'opportunité de raccourcir la durée de la mesure.

2.3. EVALUER LA FIABILITE DU MESURAGE DU $U_{\text{BÂT}}$: L'INTERPRETABILITE PHYSIQUE

Chacune des estimations du $U_{\text{bât}}$, avec son intervalle de confiance, peut être comparée à une valeur de référence, connue dans le cas d'expérimentations numériques. Un critère d'interprétabilité (Juricic 2020) est alors utilisé et se calcule selon l'équation (3) :

$$I_{p\%} = \int_{ref - p\%}^{ref + p\%} U_{\text{bât}} dU \quad (3)$$

À titre d'illustration, la Figure 3 compare quatre estimations de $U_{\text{bât}}$ par rapport à une référence à $0,36 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. En se fixant une limite raisonnable d'erreur de 20 % autour de la référence, on peut calculer le critère d'interprétabilité $I_{20\%}$. Ce critère représente, grossièrement, la proportion de l'intervalle de confiance se trouvant dans la bande grise de 20 % autour de la référence. L'indice prend des valeurs de 0 (estimation très erronée) à 1 (estimation très satisfaisante). Dans la suite des travaux, on considère acceptable une estimation dont l'indice $I_{20\%}$ est supérieur à 0,7.

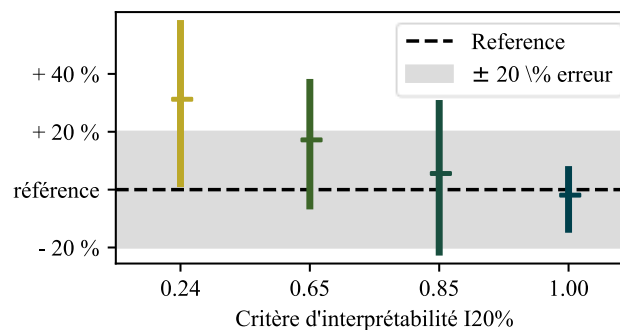


Figure 3 Critère d'interprétabilité $I_{20\%}$ pour établir l'acceptabilité d'une estimation

2.4. CAS D'ETUDE

Le cas d'étude est un immeuble de type barre de logements dite « Montreau ». Le logement Ouest, traversant, au dernier étage sert à l'expérimentation numérique. Il a un taux de mitoyenneté de 44 % et une surface habitable de $63,4 \text{ m}^2$. Il est modélisé en deux versions : une version performante avec un $U_{\text{bât}}$ de référence de $0,34 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$, une version moins performante avec un $U_{\text{bât}}$ de référence de $0,64 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. Cette différenciation permet d'évaluer l'influence de la variabilité des flux dans le cas où les flux mitoyens pèsent moins lourds dans le bilan d'énergie du bâtiment. Enfin, les ponts thermiques de la zone de test comptent pour environ 32 % des pertes par transmission (cohérent avec la fourchette habituellement rencontrée de 25 % – 30 % en rénovation) et le renouvellement d'air moyen par infiltrations s'élève à $0,2 \text{ vol/h}$.

3. RESULTATS

Les expérimentations numériques sont donc d’abord appliquées au cas d’étude dans sa version très performante. Les 3 scénarios de variabilité spatiale sont modélisés et propagés sur le résultat final d’estimation du $U_{bât}$. La Figure 4 montre un effet significatif sur l’acceptabilité des résultats. Rappelons que seul l’intervalle de confiance varie ici, le meilleur estimateur est fixe dans chacun des 3 cas. La moindre acceptabilité des résultats du cas de variabilité haute ne s’explique donc que par la très grande incertitude sur le résultat.

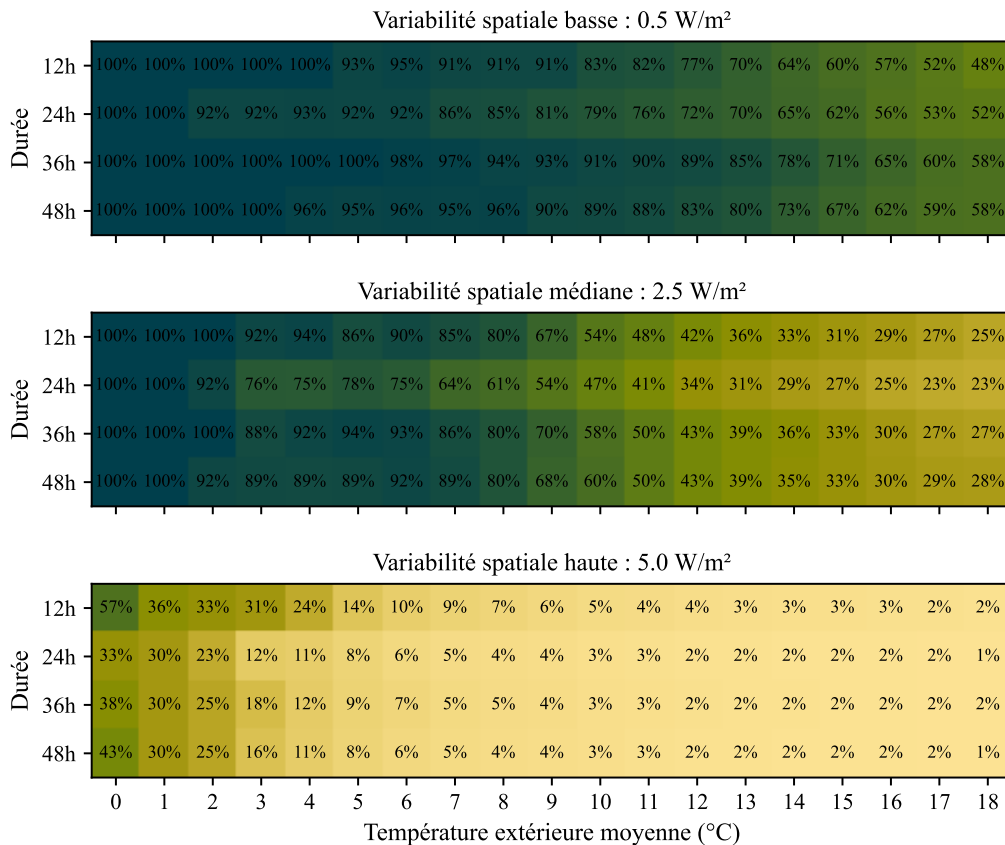


Figure 4 : Pourcentage d’essais considérés satisfaisants en fonction de la température extérieure, de la durée de l’essai et de la variabilité spatiale des flux mitoyens – Cas Montreal performant

Deux conclusions principales peuvent être tirées : une variabilité spatiale haute des flux mitoyens ne permet à aucun moment d’obtenir des résultats satisfaisants. Quand la variabilité spatiale des flux mitoyens est au contraire médiane ou basse, les essais en hiver donnent tous un résultat acceptable, voire en mi-saison dans le cas de la très faible variabilité. Soulignons que dans les 3 cas, les essais de durée de 24 h semblent être moins reproductibles que les essais de 12 h, pourtant plus courts. A priori, cela confirme que l’hypothèse de flux stationnaire n’est pas juste et que la variabilité journalière influe sur le terme d’erreur identifié dans l’équation (3). Cela sous-tend aussi que l’heure de démarrage, ici 08 : 00, est également influente. En l’absence d’étude plus approfondie, les essais plus longs sont préférables en termes de reproductibilité.

Pour la version moins performante du cas d’étude, le domaine de validité de la méthode de mesurage semble s’étendre à la mi-saison. Deux scénarios sont évalués : variabilité des flux médiane et haute. La

Figure 5, comparée à la figure précédente montre pour les deux cas une meilleure reproductibilité des essais. Le cas de haute variabilité des flux peut ici être acceptable en conditions hivernales. Cela confirme que quand le poids des flux mitoyens dans le bilan d'énergie de l'appartement est plus faible (ici une enveloppe extérieure moins performante pour des parois mitoyennes identiques), une forte incertitude influe moins sur l'estimation du $U_{bât}$.

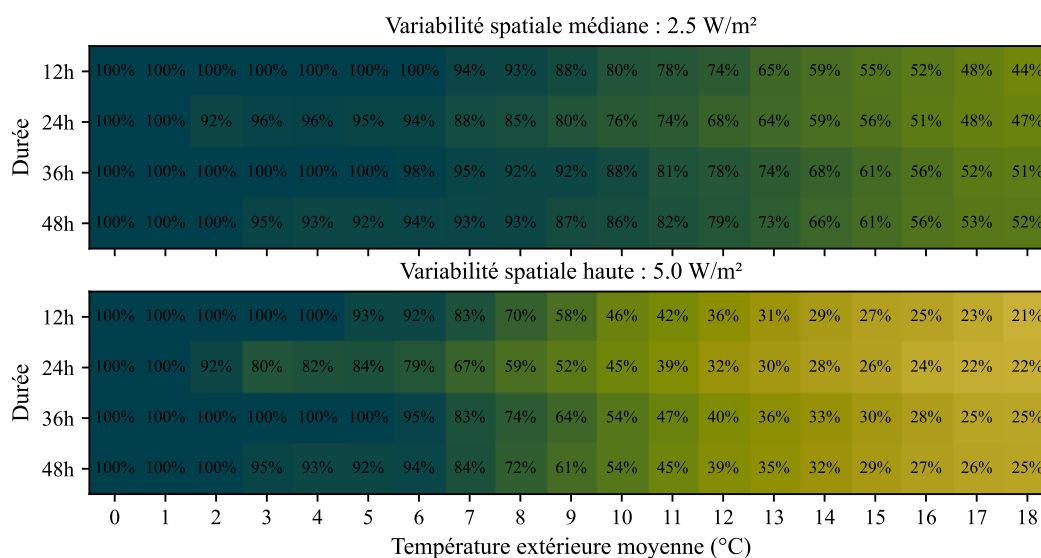


Figure 5 : Pourcentage d'essais considérés satisfaisants en fonction de la température extérieure, de la durée de l'essai et de la variabilité spatiale des flux – Cas Montreuil moyennement performant

Concrètement, ces résultats ébauchent un plan d'instrumentation en fonction de types de parois. Une paroi homogène donnant sur une zone chauffée uniformément, donnant vraisemblablement des flux de faible variabilité spatiale, pourra être parcimonieusement instrumentée tandis que des parois hétérogènes ou des parois donnant sur des zones de température disparates devront être fortement instrumentées. La Figure 6 donne ainsi un premier retour d'expérience de la variabilité réellement observés sur trois opérations menées dans le projet Sereine II. Sur les parois instrumentées de cinq fluxmètres ou plus, la dispersion observée va d'environ 1 W/m² à 12 W/m². Sur cinq de ces parois, un seul fluxmètre explique la grande dispersion des valeurs (zone mitoyenne non chauffée souvent), ce qui laisse à penser que ces cas de figure peuvent être anticipés.

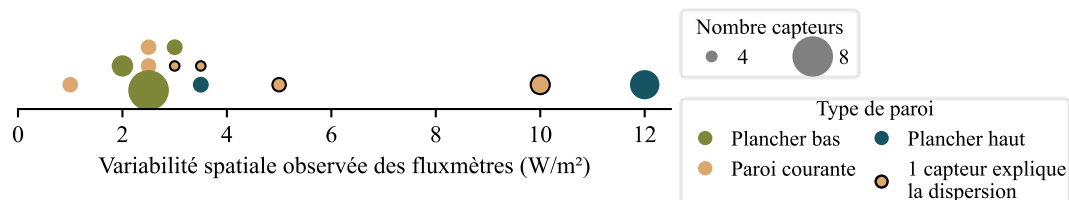


Figure 6 : Dispersion maximale des flux observées expérimentalement

Pour l'heure, le retour d'expérience actuel montre que le niveau de dispersion spatial « médian » peut être atteint sous réserve des conditions opérationnelles suivantes : absence de cloisons mitoyennes légères (de type plâtre + rails), absence de part et d'autre d'éléments chauffant directement le mur (convecteurs, réseaux d'eau chaude non calorifugés), absence de mobilier imposant (côté zone testée) et chauffage de l'ensemble des zones mitoyennes (entre 15 °C et 25 °C).

4. CONCLUSION

La mesure *in situ* de la performance thermique d'une enveloppe de bâtiment est identifiée par la filière comme un levier indispensable à la garantie de performance. Les techniques de mesurage, par exemple du coefficient de transmission thermique, doivent être fiables et reproductibles pour espérer être un jour adoptées largement. Les méthodes déployables aujourd'hui en maison individuelle ne peuvent être adaptées aux bâtiments de logements collectifs qu'à la condition de résoudre le verrou des flux thermiques mitoyens considérables qui perturbent alors la mesure.

Cet article s'est donc proposé d'évaluer l'influence de la variabilité spatiale de flux thermiques pour établir les limites opérationnelles d'une mesure du $U_{bât}$ d'un appartement seul. Les résultats ont montré que la validité et reproductibilité des mesures sont possibles quand les flux mitoyens présentent une variabilité spatiale modérée à faible en condition hivernale. Les résultats ont aussi montré que pour un bâtiment très performant, dans lequel les flux mitoyens sont majoritaires dans le bilan thermique d'un logement, une instrumentation lourde des parois hétérogènes en flux est préférable, pour éviter de propager des hypothèses hautes de variabilité et ainsi invalider l'essai.

Cette étude a donc esquissé le domaine de validité d'une méthode de mesurage du coefficient de transmission thermique d'un logement seul. Les résultats appellent à des expérimentations sur site pour caractériser *in situ* la dispersion des flux en fonction du mode constructif et du type de paroi ; appellent aussi à une analyse plus fine de l'impact de l'heure de démarrage et de la durée de l'essai pour évacuer le risque d'un biais important de la mesure à cause du déphasage.

Notes : ce travail est financé par le programme PROFEEL 2. Les figures sont accessibles aux personnes en déficience visuelle (colormap bamako_r de (Crameri et al. 2020)).

BIBLIOGRAPHIE

- Alzetto, Florent, Guillaume Pandraud, Richard Fitton, Ingo Heusler, and Herbert Sinnesbichler. 2018. 'QUB: A Fast Dynamic Method for in-Situ Measurement of the Whole Building Heat Loss'. *Energy and Buildings* 174 (September): 124–33
- Carvalho Araujo, Lorena de. 2022. 'Identification of the Intrinsic Energy Performance of Multi-Family Housing and Tertiary Sector Buildings from in-Situ Measurements'. Université de Bordeaux.
- Crameri, Fabio, Grace E. Shephard, and Philip J. Heron. 2020. 'The Misuse of Colour in Science Communication'. *Nature Communications* 11 (1): 5444.
- Filière Bâtiment. 2023. 'Feuille de Route Décarbonation Du Cycle de Vie Du Bâtiment'.
- Jack, Richard, Dennis Loveday, David Allinson, and Kevin Lomas. 2018. 'First Evidence for the Reliability of Building Co-Heating Tests'. *Building Research & Information* 46 (4): 383–401.
- JCGM/WG1. 2008. 'Evaluation of Measurement Data -- Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement'. 100:2008. Joint Committee for Guides in Metrology.
- Juricic, Sarah. 2020. 'Identifiability of Thermal Performance of a Building Envelope from Poorly Informative Data'. Université Savoie Mont-Blanc.
- Juricic, Sarah, Mickaël Rabouille, Arnaud Challansonnex, Arnaud Jay, Simon Thébault, Simon Rouchier, and Rémi Bouchié. 2023. 'The Sereine Test: Advances towards Short and Reproducible Measurements of a Whole Building Heat Transfer Coefficient'. *Energy and Buildings* 299 (November): 113585.

Mesure mobile participative du stress thermique dans le Grand Paris

James Kamara^{1,2}, Frédéric Filaine¹, Arnaud Grados³, Nassim Fillaoui¹, Basile Chaix⁴, Julien Bigorgne⁵, Martin Hendel^{1,2}, Laurent Royon¹

¹ Université Paris Cité, LIED UMR 8236, CNRS, F-75013, Paris, France

² Univ Gustave Eiffel, ESIEE Paris, département SEED, F-93162, Noisy-le-Grand, France

³ Université Paris Cité, MSC, UMR 7057, CNRS, F-75013, Paris, France

⁴ Sorbonne Université, INSERM, Institut Pierre Louis d'Épidémiologie et de Santé Publique, Nemesis research team, F-75012, Paris, France

⁵ APUR-Atelier Parisien d'Urbanisme, F-75013, Paris, France

RESUME.

Les îlots de chaleur urbains, combinés à des vagues de chaleur, peuvent poser des problèmes sanitaires majeurs, notamment des risques de surmortalité suite à un stress thermique cumulé excessif des habitants. Le projet ANR « Vagues de chaleur, îlots de chaleur urbains, et bien-être et santé : une approche par capteurs embarqués » (H3Sensing) associe épidémiologie, urbanisme et microclimatologie pour caractériser le profil d'exposition au stress thermique d'habitants du Grand Paris et leurs réponses physiologiques.

Cet article présente un dispositif de mesure portatif de paramètres microclimatiques visant à caractériser le stress thermique. Des mesures dans l'habitat seront aussi réalisées par un dispositif fixe prototypé, en plus de mesures de paramètres physiologiques et des questionnaires à partir d'une étude de science participative.

L'utilisation de capteurs low-cost et peu encombrant sera discuté, notamment sur la fiabilité des données et la structure du dispositif, à commencer par la première phase de tests et de caractérisation d'un des capteurs : l'anémomètre à fil chaud.

MOTS-CLÉS : mesure microclimatique, stress thermique, science participative

ABSTRACT.

Urban heat islands, combined with extreme heat waves, can provoke public health risks following high cumulative exposure to heat stress. Where previous studies focus on outdoor nighttime air temperatures, the "Heat waves, urban Health islands, Health: a mobile sensing approach" (H3Sensing) research project aims to characterize Greater Paris inhabitants' exposure to heat stress over several days and their physiological responses.

This article will present a mobile prototype which measures microclimatic parameters. In-home microclimatic measurements, physiological measurements and surveys will complete the citizen-science data set.

Initial prototyping and testing of the microclimatic measurement kits and sensor characterization are presented, and the use of low-cost sensors is discussed.

KEYWORDS : microclimatic measure, heat stress, citizen science

1. INTRODUCTION

Avec l'accentuation du réchauffement climatique, le nombre et l'intensité des phénomènes caniculaires risquent d'augmenter, quels que soient les scénarios de réchauffement des températures globales avec des risques de surmortalité. En effet, les épisodes caniculaires augmentent les risques de déshydratation, d'insolation voire de malaise cardiaque parfois mortel. En ville, ces risques sont aggravés par le phénomène d'îlot de chaleur urbain (ICU) provoqué par la bétonisation, la concentration de population et des activités industrielles, comme ce fut le cas à Paris lors de la canicule de 2003. Pour cet épisode, des recherches postérieures ont mis en évidence des corrélations entre surmortalité des habitants et températures nocturnes dans leur quartier. (IPCC WGI 2021 ; Laaidi et al. 2012)

Le stress thermique caractérise l'état physiologique dans lequel le corps doit fournir un effort pour réguler sa température interne. Celui-ci ne dépend pas uniquement de la température de l'air, mais également de l'humidité, du vent et des échanges radiatifs (cf. Fig 1). Dans la vie quotidienne, il est très variable au cours de la journée suivant le lieu dans lequel évolue la personne, qu'il s'agisse des transports, des lieux de vie ou d'activité, dans un environnement intérieur ou extérieur. De la même manière, le métabolisme influe aussi sur la résistance individuelle au stress thermique. Cela complique la caractérisation des profils d'exposition au stress thermique des habitants, comparativement aux températures d'air par exemple.

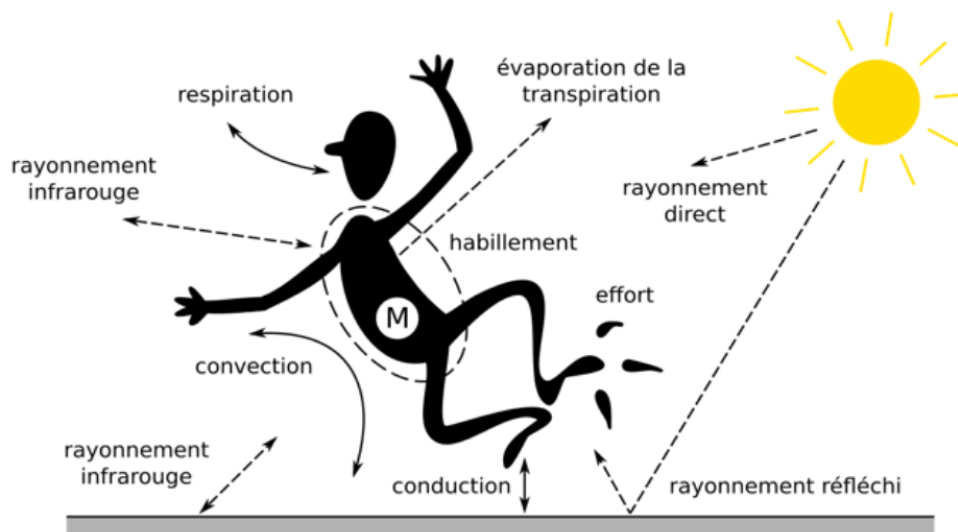


Figure 1 : Représentation schématique des différents échanges thermiques du corps humain (Havenith 1999)

Pour répondre à ce défi, le projet ANR « Vagues de chaleur, îlots de chaleur urbains, et bien-être et santé : une approche par capteurs embarqués » (H3Sensing) prévoit une enquête participative auprès de 180 habitants du Grand Paris, croisant notamment mesures microclimatiques et physiologiques. Cet article présente les premières phases de prototypage du dispositif de mesure portatif qui sera utilisé pour caractériser le stress thermique d'un piéton tout au long de périodes de mesure de 4 jours consécutifs (une en hiver et une en été). De plus, il présentera les premières caractérisations des capteurs et les

perspectives posées, notamment par la prise en compte de l'utilisation de capteurs low-cost dans l'amélioration du prototype.

2. MATERIEL ET METHODE

Environ 180 habitants du Grand Paris seront recrutés pour l'étude, choisis selon différents critères (âge, localisation, ...) pour dresser et cartographier un panel significatif d'exposition au stress thermique. Les participants seront démarchés par mail, par téléphone et sur une campagne de publicité ciblée. Ils seront munis d'un dispositif de mesure portatif qui caractérisera les conditions microclimatiques rencontrées lors de leurs déplacements et activités quotidiennes, mais aussi d'un dispositif fixe installé dans leur habitat. En complément, des paramètres physiologiques (température et sudation du corps, pouls, ...) seront mesurés par deux bracelets connectés. Un téléphone portable permettra de suivre leurs déplacements et délivrer des questionnaires sur la qualité du sommeil ou le ressenti thermique (Thermal Sensation Vote). (Tiantian et al. 2022)

Dans l'ensemble, l'étude fera appel à la production et l'étalonnage de 25 dispositifs portatifs et fixes. Chaque participant sera observé sur une période de 4 jours en hiver et 4 jours en été. Le stress thermique sera caractérisé à partir de méthodes de filtrage et d'analyse de plusieurs indicateurs, faisant le lien entre les conditions climatiques, les déplacements, l'habillement et le ressenti thermique (Migliari 2022 ; Pellegrini et Casella 2021)

Le dispositif portatif est actuellement composé des capteurs listés au Tableau 1.

Un thermo-hygromètre sous abri solaire mesure température et humidité de l'air, deux anémomètres à fil chaud, orientés à 90° l'un de l'autre, mesurent vitesse et direction du vent, la mesure de température du globe noir est utilisée pour calculer la température moyenne radiante selon la méthode ASTM à partir de la vitesse du vent et de la température de l'air. (LSI-Lastem 2024)

Parmi les capteurs utilisés, le thermo-hygromètre sous abri et le globe noir de 5 cm sont des instruments fournis par LSI-Lastem pour leur kit de mesure mobile de la température de bulbe mouillé (WBGT) Heat Shield. Ces instruments ont été utilisés dans plusieurs études scientifiques. (LSI-Lastem 2023 ; Surabhi et al. 2019 ; Detommaso 2021)

Paramètre	Instrument	Fournisseur	Incertitude
Température d'air (°C)	Thermistance sous abri	LSI-Lastem	+0,5°C
Humidité relative (%)	Hygromètre capacitif sous abri	LSI-Lastem	±2 %
Vitesse de vent (m/s)	Anémomètre à fil chaud	Modern Device	±1,5 m/s
Température de globe noir	Pt100 et globe noir de 5cm	LSI-Lastem	±0,3°C
Température de globe blanc	Pt100 et globe blanc de 5cm	LSI-Lastem	±0,3°C
Intensité lumineuse (lux)	Photo-résistance sur 16bits	Lite-On	±0.01 lux

Tableau 1 : Paramètres microclimatiques mesurés et instrumentation

La fiabilité de ces capteurs sera testée en comparaison à des capteurs LSI-Lastem de référence, à savoir une Pt100 et un globe noir Pt100 de 15 cm de diamètre conforme à la norme ISO 7726 et/ou trois radiomètres quatre composantes en enceinte climatique et en conditions extérieures réelles.

En particulier, le temps de réponse du globe noir de 5 cm est de l'ordre de 10 à 20 minutes, ce qui ne permet pas de suivre l'évolution de la température moyenne radiante en temps réel. Pour compenser

cette limitation, une photorésistance est prévue pour déceler les variations soudaines d'ensoleillement. Ce capteur est sensible aux proches infrarouges et à la lumière visible et permettra de faire la différence entre lumière artificielle et lumière du soleil, permettant de distinguer entre mesures en intérieur et en extérieur (Lite-On 2014).

En complément, un globe blanc de 5 cm est ajouté présentant un albédo supérieur à 0,7 et une émissivité de l'ordre de 0,9. Celui-ci sera ainsi moins sensible à l'ensoleillement direct par rapport à un globe noir, L'étude de la différence entre globes noir et blanc pourrait permettre de détecter les variations soudaines d'ensoleillement, à l'image du globe anémo-radiomètre (Nakayoshi et al. 2015).

Les capteurs sont montés sur un support fixé à un sac à dos (voir Fig 2). Les premiers prototypes ont permis de souligner la facilité de transport du dispositif et sa légèreté. Une attention particulière est portée pour limiter l'encombrement et concevoir un design convenable pour une utilisation quotidienne par un public non scientifique. Ces capteurs doivent être placés au-dessus de l'épaule et en dehors du sac-à-dos pour assurer une mesure la plus fidèle de l'environnement microclimatique auquel est exposé le participant (Bartoli et al. 2022).

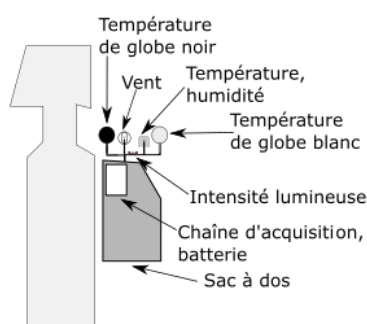


Figure 2 : Schéma simplifié du dispositif

Pour piloter l'ensemble, une carte Arduino Uno R3 est utilisée en communication I2C avec la plupart des capteurs à l'aide d'un multiplexeur. L'ensemble du dispositif est alimenté par une batterie d'une autonomie de 10 heures minimum. Un accéléromètre permet d'indiquer si la personne est en mouvement avec le dispositif et une LED de contrôle permettra d'indiquer l'état de marche du système. Dans le cas d'une personne en mouvement, les données sont enregistrées sur une carte SD toutes les secondes, sinon toutes les 10 minutes en cas d'immobilité prolongée, par exemple lorsque le sac-à-dos est posé au sol au bureau ou dans le logement.

Pour répondre aux contraintes d'encombrement posées par un tel dispositif et aux conditions d'utilisation, les capteurs utilisés sont petits, légers et à faible coût pour être facilement remplaçables. Par conséquent, la qualité de ces capteurs doit être caractérisée en laboratoire et comparée à des capteurs scientifiques de référence.

Par ailleurs, la mesure mobile risque d'entraîner de nombreux biais entre la mauvaise utilisation du dispositif, le dysfonctionnement d'un capteur et son usure (sensor drifting), des problèmes électroniques ou dans l'acquisition de données, nécessitant la mise en place d'une analyse statistique de la base de données (Pereira et Glisic. 2023).

Pour réduire les biais d'utilisation, des explications seront données aux participants, en plus d'un guide d'utilisation, par les assistants de recherche.

De plus, la caractérisation des capteurs portera sur leur fiabilité d'une part et, compte tenu de la forte variabilité spatiale des conditions microclimatiques, leur temps de réponse. La suite de l'article portera sur la caractérisation des anémomètres à fil chaud.

3. CARACTERISATION DES ANEMOMETRES A FIL CHAUD

Sur le dispositif portable, deux anémomètres à fil chaud à faible coût fournis par Modern Device sont utilisés pour caractériser le vent dans deux directions orthogonales (Modern Device 2017).

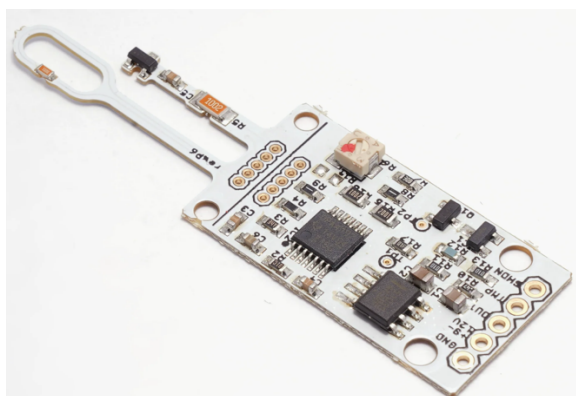


Figure 3 : Photo de l'anémomètre Modern Device RevP6 (longueur maximum : 56.6mm, largeur maximum : 17.2mm)

Ils sont étalonnés en soufflerie face à l'écoulement via des expériences menées simultanément avec un anémomètre à fil chaud de référence (modèle Testo 405i) en imposant des paliers de vitesse de 30 secondes dans une gamme allant de 0 à 20 m/s. Les capteurs 1 et 2 correspondent à un jeu de capteurs sur le sac à dos. Les résultats de ces mesures ont été consignés dans la Figure 4 ci-dessous.

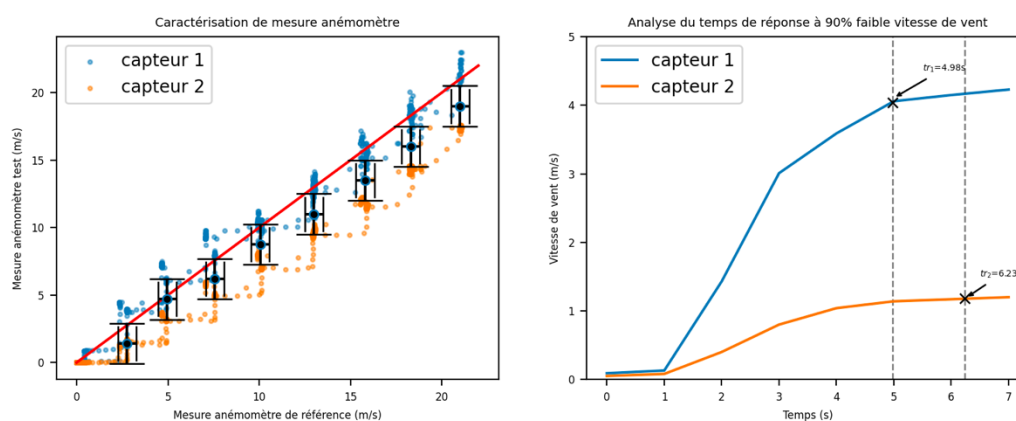


Figure 4 : a) Étalonnage des anémomètres b) temps de réponse à un palier de vitesse imposé

La Fig 4a confronte la vitesse du vent des anémomètres Modern Device avec celle de l'anémomètre de référence pour la même orientation. Dans l'ensemble, les capteurs Modern Device reproduisent de manière satisfaisante les mesures de référence, mais l'on peut déjà remarquer que le capteur 1 tend à

surestimer la mesure lorsque le capteur 2 la sous-estime. Sur la base de ce premier jeu de mesures, l'incertitude des capteurs Modern Device peut être estimée à environ $\pm 1,5$ m/s.

La Fig 4b met en évidence le temps de réponse des capteurs à un créneau de vitesse de vent. Pour de faibles vitesses de vent, inférieures à 5 m/s, on observe un temps de réponse à 90 % proche de 5 secondes environ, ce qui est compatible et acceptable dans le cadre de l'utilisation prévue du dispositif.

4. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Dans cet article, les premières phases de conception d'un dispositif de mesure portatif ont été présentées, ainsi que les premières caractérisations des anémomètres à fil chaud utilisés, en vue de qualifier le stress thermique avec précision.

La suite des premiers travaux consistera à caractériser les autres capteurs bas coût et à sélectionner les indicateurs de stress thermique pertinents au regard des informations microclimatiques, de déplacement, d'habillement et physiologiques qui seront récoltées. Des premiers tests en conditions réels seront réalisés pendant l'été 2024.

D'autres améliorations seront étudiées pour rendre le dispositif plus compact et mieux protéger les capteurs les plus fragiles ainsi que la chaîne d'acquisition, ainsi qu'améliorer l'autonomie du dispositif en vue de son déploiement pendant l'été 2025.

5. REMERCIEMENTS

Cette recherche est financée par le projet ANR H3Sensing (ANR-21-CE36-0012-02) et par la Fondation de l'Université Gustave Eiffel.

6. BIBLIOGRAPHIE

- Bartoli Riccardo, Frédéric Filaine, Sophie Parison, Martin Hendel. 2022. "Mise au point d'un dispositif de mesure portatif du stress thermique du piéton". *CIFQ 2022*
- Detommaso Maurizio, Antonio Gagliano, Luigi Marletta, Francesco Nocera. 2021. "Sustainable Urban Greening and Cooling Strategies for Thermal Comfort at Pedestrian Level". *Sustainability. Adaptation to Global Change: Modeling and Decision Support Tools in Urban Planning*
- Havenith George. 1999. "Heat Balance When Wearing Protective Clothing", *The Annals of Occupational Hygiene*. vol5, no5.
- IPCC Working Group 1. 2021. "Climate Change 2021 – The Physical Science Basis". *Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*.
- Laaidi Karine, Abdelkrim Zeghnoun, Bénédicte Dousset, Philippe Bretin Philippe, Stéphanie Vandentorren, Emmanuel Giraudet, Pascal Beaudou. 2012. "The impact of heat islands on mortality in Paris during the August 2003 heat wave". *Environ Health Perspectives*.
- Lite-On. 2014. *LTR-329ALS-01 Digital Ambient Light Sensor datasheet*
- LSI-LASTEM. 2023. *Portable wireless WBGT meter – Heat Shield*
- LSI-LASTEM. 2024. *Globothermometer: sensor for analysing thermal environments*.
- Migliari Matteo, Babut Rémi, De Gaulmyn Camille, Chesne Loïc, Baverel Olivier. 2022. "The Metamatrix of Thermal Comfort: A compendious graphical methodology for appropriate selection of outdoor thermal comfort indices and thermo-physiological models for human-biometeorology research and urban planning", *Sustainable Cities and Society*, vol81.

Modern Device. 2017. *Rev P6 anemometer datasheet*

Nakayoshi, M., Kanda, M. & de Dear, R. 2015. « Globe Anemo-radiometer ». *Boundary-Layer Meteorology* 155, 209–227.

Pellegrini Dario, Vittorio Casella. 2021. *"Tecniche robuste per il filtraggio dei dati di qualità dell'aria acquisiti da sensori a basso costo"*. Asita Academy.

Pereira Mauricio, Glisic Branko. 2023. "Detection and quantification of temperature sensor drift using probabilistic neural networks". *Expert Systems with Applications*. Volume 213. Part A.

Surabhi Mehrotra, Ronita Bardhan, Krithivasan Ramamritham. 2019. "Outdoor thermal performance of heterogeneous urban environment: An indicator-based approach for climate-sensitive planning". *Science of The Total Environment*. Volume 669.

Tiantian Xu, Runming Yao, Chenqiu Du, Xizhen Huang. 2022. "A method of predicting the dynamic thermal sensation under varying outdoor heat stress conditions in summer". *Building and Environment*. Volume 223.

Intégration des limites planétaires dans l'ACV des bâtiments et des quartiers

Khaled Khazaal*¹, Charlotte Roux¹, Bruno Peuportier¹, Patrick Schalbart¹

¹ Mines Paris, Université PSL, Centre d'Efficacité Énergétique des Systèmes (CES),
75006 Paris, France

* khaled.khazaal@minesparis.psl.eu

RESUME

Les bâtiments contribuent à plus de 28 % des émissions de gaz à effet de serre en France. Pour respecter l'accord de Paris, il faut diviser par deux les émissions d'ici 2030 et les annuler d'ici 2050. En réponse à l'urgence environnementale un changement de paradigme est nécessaire pour passer d'une évaluation environnementale relative (e.g. comparaison de variantes) à une évaluation absolue (comparaison à un seuil). Ce basculement peut se faire par exemple via l'utilisation du cadre conceptuel des limites planétaires. L'intégration de ces dernières suppose dans certains cas d'effectuer une descente d'échelle depuis la planète jusqu'au projet étudié. Cette communication présente un état de l'art des méthodes permettant de progresser vers une évaluation environnementale absolue des bâtiments. Les travaux proposant des modalités d'intégration des limites planétaires dans l'ACV sont analysés pour étudier les possibilités d'application dans le cadre de l'écoconception des bâtiments et des quartiers, notamment dans la prise en compte du contexte territorial du projet.

MOTS-CLÉS : Analyse du cycle de vie, bâtiment, limites planétaires

ABSTRACT

Buildings account for over 28 % of greenhouse gas emissions in France. To comply with the Paris Agreement, emissions need to be halved by 2030 and eliminated by 2050. In response to the environmental crisis, a paradigm shift is needed from relative environmental assessment (e.g. comparison of variants) to absolute assessment (comparison with a threshold). This can be achieved, for example, by using the conceptual framework of planetary boundaries founded. In some cases, their integration means scaling down from the planet level to the project level. This paper presents the state of the art in methods for progressing towards an absolute environmental assessment of buildings. Works proposing ways of integrating planetary boundaries into LCA are analysed in order to examine possible applications in the eco-design of buildings and districts, particularly while considering the project's territorial context.

KEYWORDS: Life cycle assessment, buildings, planetary boundaries

1. INTRODUCTION

Le secteur du bâtiment est le premier consommateur d'énergie primaire en France. Il représente 28 % des émissions totales de gaz à effet de serre du pays en prenant en compte les émissions liées à la production d'énergie consommée dans les bâtiments (Ministère de la transition écologique 2020). La transition écologique de ce secteur est essentielle pour atteindre les objectifs fixés par les accords internationaux sur le climat et contribuer à maintenir la Terre dans un état de fonctionnement sûr (Rockström, Steffen, et al. 2009; Steffen, Richardson, et al. 2015). Or les stratégies nationales de décarbonisation prennent rarement en compte les émissions incorporées ou indirectes (matériaux,

équipements, etc.) dans leur définition de net zéro émissions en raison de leur complexité, notamment en ce qui concerne les émissions produites à l'étranger. Et les autres limites planétaires sont peu présentes dans les stratégies nationales. Les propositions de la littérature concernant la définition du bâtiment à énergie zéro (bâtiment qui produit autant d'énergie qu'il en consomme) ont également tendance à se concentrer uniquement sur l'utilisation de l'énergie opérationnelle, voir par exemple les travaux de (Sartori, Napolitano, et Voss 2012). C'est dans ce contexte que l'Analyse de Cycle de Vie (ACV) des bâtiments dans un cadre d'écoconception s'impose comme un outil essentiel pour évaluer et éventuellement améliorer la performance environnementale d'un projet de construction à l'échelle globale (Peuportier, Thiers, et al. 2013a).

L'ACV permet d'évaluer les impacts environnementaux des bâtiments, depuis leur construction jusqu'à leur fin de vie, en passant par leur utilisation et leur entretien (Zabalza Bribián, Aranda Usón, et al. 2009). Cependant, l'ACV est le plus souvent effectuée en comparant différentes variantes afin de choisir la meilleure. Des efforts récents ont été faits pour progresser vers une évaluation environnementale dite "absolue" (Bjørn, Chandrakumar, et al. 2020; Andersen, Ohms, et al. 2020). Celle-ci suppose de définir des seuils à respecter, exogènes au projet étudié et permettant de valider une performance environnementale « suffisante ».

L'ACV absolue peut être mise en œuvre de différentes manières, comme en se basant sur les accords internationaux pour fixer des budgets carbone (Ministère de la transition écologique 2020), les benchmarks de performance environnementale (Peuportier et Wurtz 2023), ou en se basant sur le concept de limites planétaires. Les limites planétaires peuvent être utilisées pour déterminer les capacités de charge de la planète qui délimitent un "espace opérationnel sûr" dans lequel l'humanité peut exister, ce qui pourrait transformer les indicateurs ACV en indicateurs absolus de durabilité environnementale. Les seuils ainsi obtenus pourraient permettre d'évaluer si le projet étudié est suffisamment performant au regard des enjeux environnementaux. C'est l'objet de nombreux travaux de recherche actuellement, dont certains dans le secteur de la construction. Ils seront présentés suite à une brève description du concept de limite planétaire.

Le concept de Limites Planétaires (LP), proposé en 2009 par (Rockström, Steffen, et al. 2009; Steffen, Richardson, et al. 2015), et révisé pour la dernière fois en 2023 (Richardson, Steffen, et al. 2023), vise à définir un « espace de fonctionnement sûr pour l'humanité » (*Safe Operating Space*) basé sur l'évolution de neuf phénomènes complexes et interconnectés. Pour étudier l'évolution de ces phénomènes, une ou plusieurs « variables de contrôle » sont définies à l'échelle mondiale. Un « seuil critique » est fixé pour chacune de ces variables, avec une « zone d'incertitude » composée de deux valeurs : une valeur basse (« frontière planétaire ») et une valeur haute (« limite planétaire »). La frontière représente la zone de danger qui précède la limite au-delà de laquelle les écosystèmes pourraient basculer dans un état inconnu et probablement défavorable à l'humanité (C Larrieu et al. La France face aux neuf limites planétaires, 2023). Ces limites sont définies et traitées dans (Rockström, Steffen, et al. 2009), les limites les plus prometteuses sur lesquelles travailler dans le contexte de l'écoconception des bâtiments et des quartiers sont présentées dans le [Tableau 1](#). Les critères pris en compte sont 1/ la pertinence environnementale ; 2/ la faisabilité (théorique) d'intégration ; 3/ la possibilité de régionalisation.

Le premier critère est basé sur : le dépassement critique des limites planétaires associées, la pertinence de l'objet étudié par rapport aux enjeux de l'aménagement des quartiers. Le deuxième critère

est basé sur les éléments suivants : travaux nombreux proposant des pistes d'intégration, existence de politique publique facilitant la descente d'échelle (méthode d'élaboration de seuils environnementaux présentée dans la [Partie 2](#)), compatibilité entre les métriques. Le troisième est basé sur : l'intérêt et la faisabilité de la régionalisation de certaines limites pour pouvoir dériver des budgets/limites locales prenant en compte les spécificités régionales.

Les différentes LP sont généralement traitées séparément, tout en soulignant les nombreuses interactions qui existent entre elles (Lade, Steffen, et al. 2019). Ainsi, elles forment un système complexe qu'on peut étudier d'une manière globale et transversale. Lors de la révision du modèle en 2015, les auteurs ont complété la grille d'analyse par des variables géographiques spécifiques au territoire afin de faciliter les tests de régionalisation. Dans le cas de la limite "changement d'usage des sols" par exemple, ils ont distingué la situation des forêts tempérées de celle des forêts tropicales ou boréales (Steffen, Richardson, et al. 2015).

Tableau 1 : Limites planétaires

Limite	Variable de contrôle	C1/ Dépass- ement	C2/ Existence de politique publique nationale	C3/ Régionalisation
Réchauffement climatique	Concentration de CO2 dans l'atmosphère en partie par million (ppm)	Oui	Oui (Stratégie Nationale Bas Carbone)	Non
	Augmentation du forçage radiatif en watt par mètre carré (W/m ²) par rapport à l'ère préindustrielle			
Changement d'usage des sols	Échelle mondiale : rapport entre la superficie forestière actuelle et la superficie forestière «originelle» (avant 1700)	Oui	Oui (Zéro Artificialisation Net)	Oui
Utilisation et cycle de l'eau douce	Eau bleue : volume total d'eau douce consommé, prélevé dans les eaux de surface et souterraines renouvelables	Oui	Oui (Plan eau)	Oui
	Eau verte : pourcentage de la surface terrestre libre de glace dans laquelle l'humidité du sol de la zone racinaire s'écarte de la variabilité naturelle observée au cours des 11 000 dernières années (beaucoup plus humide ou beaucoup plus sec)			
Érosion de la biodiversité	Diversité spécifique : taux d'extinction d'espèces (nombre d'extinctions sur un million d'espèces, par an)	Oui	Oui (Stratégie Nationale Biodiversité)	Oui
	Diversité fonctionnelle : indice d'intégrité de la biodiversité – IIB (abondance des espèces dans un écosystème par rapport à leur abondance à l'ère préindustrielle), en pourcentage			

Le cadre d'analyse des LP pourrait ainsi constituer un outil méthodologique pour structurer la gouvernance environnementale nationale. Des budgets nationaux peuvent être dérivés de ces limites en suivant une approche « top - down », voir par exemple (Brejnord et al. 2017) et (Priore, Jusselme, et al. 2021). Ces budgets nationaux peuvent ensuite être ramenés à l'échelle des bâtiments ou des quartiers par différentes techniques de descente d'échelle. Cependant, le cadre initial des LP n'accorde pas un seuil pour les ressources (minérales ou métalliques) qui représentent une part importante de l'impact environnemental incorporé des bâtiments. (Bendahmane, Gondran, et al. 2022) ont travaillé sur ce sujet en développant une méthodologie pour proposer un budget de ressources durable pour chaque substance minérale ou métallique et en combinant les méthodes d'analyse de flux de matières à la méthode ACV.

Cette communication a pour objectif de présenter l'état de l'art sur l'utilisation du concept des limites planétaires afin de pouvoir effectuer, au niveau des bâtiments et des quartiers, une analyse de cycle de vie dite absolue. Les concepts clés ainsi que la méthode de descente d'échelle qui existe aujourd'hui dans la littérature sont présentés en premier. Un cas d'étude sera ensuite présenté, afin de comparer les

valeurs d'émissions de gaz à effet de serre d'un bâtiment résidentiel aux budgets carbone d'une maison établis par une étude Danoise (Brejnrod, Kalbar, et al. 2017a).

2. DESCENTE D'ECHELLE ET ELABORATION DE BUDGET CARBONE

Quelques études ont appliqué le cadre d'analyse des LP à une échelle sous-planétaire. Compte tenu des disparités économiques, sociales et écologiques entre les pays, le travail a consisté à définir des parts nationales afin de déterminer l'espace opérationnel sûr à l'intérieur des frontières du pays. Les LP sont alors interprétées comme des budgets globaux alloués chaque année aux pays sur la base d'un principe d'allocation. Plusieurs équipes ont travaillé à l'échelle nationale, on peut citer par exemple l'exercice de (Friot et Dao 2015) pour la Suisse, (Nykqvist 2013) pour le Suède ou encore (Lucas et Wilting 2018) pour les Pays-Bas. Aucun ne considère de limites régionales mais plutôt un partage du capital planétaire désagrégé à l'échelle nationale. À notre connaissance ce type d'étude n'existe pas pour la France.

Une méthode de descente d'échelle alloue une part de « budget » à un sous-ensemble (e.g. part nationale du budget planétaire). « Descendre » les limites planétaires jusqu'à l'échelle du projet implique plusieurs choix : premièrement, le choix entre indicateurs d'ACV et LP (conversion de LP en indicateurs d'ACV, ou utilisation des facteurs de caractérisation pour exprimer les résultats d'ACV en unités de LP) ; ensuite, une combinaison de différentes méthodes d'allocation (de planétaire à national, puis sectoriel, et finalement au niveau du projet) (Francart, Clausen, et al. 2023). Six modes d'allocation sont généralement considérés, basés sur six principes : l'égalité, les besoins, le droit au développement, la souveraineté, la capacité et la responsabilité. Ces modes d'allocation sont définis en détails dans (Ryberg, Andersen, et al. 2020a). Les auteurs ont également fourni un cadre méthodologique pour déterminer et communiquer les théories de justice distributive qui encadrent le choix des principes de distribution lors de la descente d'échelle des LP dans les évaluations absolues de la durabilité environnementale. Ils ont identifié 18 études qui proposent 34 façons différentes de procéder selon différents principes de justice distributive. C'est la théorie de distribution égalitaire, pour laquelle le budget environnemental global est réparti équitablement entre la population mondiale, qui est la plus utilisée dans la littérature.

Quelques rares études s'intéressent spécifiquement au cas des bâtiments. (Brejnrod, Kalbar, et al. 2017a) ont développé un cadre d'évaluation absolue des bâtiments, ou plutôt des logements, en allouant à la fonction logement une part de capital-planète évalué à l'échelle nationale pour le Danemark. L'allocation est proposée soit sur la base de la valeur économique du service rendu (ici, le logement), soit sur la base de la contribution environnementale de ce service par rapport au total (allocation au prorata de la contribution, ce qui pénalise les secteurs qui ont déjà fait beaucoup d'efforts pour réduire leurs impacts, car une part plus faible de capital leur est alloué). Ce seuil est comparé à une évaluation ACV. La proposition de (Andersen, Ohms, et al. 2020) est similaire. Un nombre plus important de principes d'allocation ont été testés et là encore, l'influence importante de ce choix est soulignée. Les deux études montrent que la « durabilité absolue » est très difficile à atteindre.

Une autre approche est proposée par (Ryberg, Andersen, et al. 2020a) pour allouer une part du budget au secteur bâtiment. Tout d'abord, un budget doit être attribué à toutes les personnes selon un modèle de répartition précis (avec sur le court terme, une répartition égale par personne). Ensuite, la part attribuée à un secteur économique devrait être basée sur l'utilité que l'unité industrielle fournit aux utilisateurs.

Ainsi, le budget du secteur économique attribué à l'unité industrielle dépendra du nombre d'utilisateurs et de l'utilité que l'unité fournit à ses utilisateurs.

Le changement climatique représente la limite planétaire au caractère le plus global, c'est également une limite qui a un effet direct sur les autres limites. Par exemple, le CO₂ est un indicateur du changement climatique, mais son augmentation dans l'atmosphère a un impact sur l'acidification des océans et sur l'érosion de la biodiversité marine (Commissariat général au développement durable 2023). Cette limite est plus spécifiquement étudiée dans la suite.

Un budget carbone est un concept utilisé pour aider à fixer des objectifs de réduction des émissions. Il s'agit de la quantité maximale d'émissions anthropiques nettes cumulées de dioxyde de carbone. Il peut être appliqué à l'échelle planétaire, nationale ou plus spécifiquement à un secteur ou un projet.

Le GIEC introduit un « Budget Planétaire » qui fait référence à la quantité totale de dioxyde de carbone (CO₂) et d'autres GES que l'humanité peut émettre dans l'atmosphère tout en maintenant le réchauffement climatique mondial en dessous de certains seuils, 1,5°C ou 2°C. Ces seuils sont généralement associés aux objectifs de l'Accord de Paris, bien que la cohérence entre les deux ne soit pas pleinement assurée. Il est calculé en tenant compte des émissions passées, des émissions actuelles, ainsi que des projections d'émissions futures, en fonction de plusieurs scénarios de développement économique, technologique et énergétique (Calvin, Dasgupta, et al. 2023).

La définition de budgets carbone pour le secteur du bâtiment d'un pays tenant compte des émissions incorporées en plus des émissions directes implique une comptabilité carbone détaillée interindustrielle et transfrontalière. L'étude suisse (Priore, Jusselme, et al. 2021) a relevé ces défis en développant une méthodologie d'allocation d'un budget carbone global à différentes échelles en considérant le secteur du bâtiment suisse. Cette approche pourrait être appliquée au secteur du bâtiment français, mais elle nécessite suffisamment de données sur le secteur industriel afin de pouvoir définir la part des émissions de la construction de bâtiments par rapport aux émissions totales du secteur industriel.

La Stratégie Nationale Bas Carbone (SNBC) a été établie afin de fixer la feuille de route de la France pour conduire la politique d'atténuation du changement climatique. Elle fixe des objectifs à court et moyen termes qui sont définis à travers des budgets carbone représentant des plafonds annuels d'émissions territoriales à ne pas dépasser. Les deux principaux objectifs définis par la SNBC sont, d'une part, de réduire d'au moins 40 % les émissions de GES d'ici à 2030 par rapport aux émissions de 1990 et, d'autre part, d'atteindre la neutralité carbone nette d'ici à 2050. Elle vise à la fois à réduire les émissions territoriales et l'empreinte carbone, mais elle ne fixe pas d'objectifs concernant l'empreinte carbone. L'empreinte carbone prend en compte les émissions associées aux biens et services importés et soustrait les émissions associées aux exportations. Par habitant, en 2018, l'empreinte carbone française (11,2 t CO₂eq/habitant) est la plus élevée depuis 1995 (10,5 t CO₂eq/habitant) et reste constante depuis les années 2000. La baisse des émissions sur le territoire est en effet contrebalancée par une augmentation des émissions liées aux importations, multipliées par deux depuis 1995 (Ministère de la transition écologique 2020). Il est donc primordial de considérer l'impact environnemental entier (national et international) d'un produit. Pour les émissions de GES, on parle du « *Whole Life Carbon* » qui considère les émissions directes d'utilisation ainsi que les émissions incorporées.

3. CAS D'ETUDE

(Dicko, Roux, et al. 2023) ont effectué une étude de cas correspondant à un bâtiment résidentiel français pour évaluer la faisabilité d'atteindre un objectif de net zéro émissions en considérant le « Whole Life Carbon ». À partir d'une construction réalisée en 2016, différentes mesures d'amélioration sont étudiées : diminution des besoins en énergie de chauffage, mise en œuvre de matériaux biosourcés et de systèmes de production d'énergie renouvelable (pompe à chaleur géothermique, production d'eau chaude sanitaire solaire, et production d'électricité photovoltaïque). La simulation thermique dynamique est utilisée pour évaluer la consommation d'énergie ainsi que le risque de surchauffe en période chaude. Les émissions de gaz à effet de serre sont quantifiées à l'aide d'une approche d'analyse conséquentielle du cycle de vie, considérant que pendant une période de transition, l'exportation d'électricité permet d'éviter les impacts correspondant à une production marginale sur le réseau. Une durée de vie de 100 ans est considérée pour le bâtiment (10 ans pour les finitions du bâtiment, 20 ans pour les équipements, 25 ans pour les modules PV et 30 ans pour les fenêtres). L'ACV est réalisée avec l'hypothèse conservatrice qu'on remplace les éléments du bâtiment avec des éléments identiques à la fin de leur durée de vie.

Les résultats de l'étude ACV montrent une réduction potentielle des émissions totales de GES allant jusqu'à 97 % (Tableau 2) en utilisant des matériaux biosourcés, en minimisant les besoins de chauffage et en utilisant des sources d'énergie à faible teneur en carbone grâce à la mise en œuvre d'équipements appropriés. Le choix d'une structure en bois a permis de réduire les émissions liées à la construction de 3,01 à -0,41 kg CO₂eq/m²/an. Cependant, les émissions liées à la rénovation passent de 2,5 à 5,06 kg CO₂eq/m²/an à cause du remplacement de certains matériaux et équipements lors des rénovations, notamment le système photovoltaïque, le système de ventilation, et le câblage électrique.

Les impacts évités diminuent et deviennent très faibles à l'horizon 2050, lorsqu'on suppose que le réseau est 100% décarboné, selon le scénario de la SNBC. À partir de ce moment, le bâtiment devrait être à zéro émission nette, mais il reste des émissions inévitables dues à la rénovation (produits de construction tels que la plomberie, l'installation électrique et les équipements comme les capteurs solaires, pompes à chaleur, ventilation, etc.). Les émissions de GES sur l'ensemble du cycle de vie seraient alors d'environ 5,6 kg CO₂eq/m²/an après la période de transition du système énergétique, notamment le mix électrique. Dans l'article initial, la possibilité de compenser ces émissions est étudiée, en envisageant la séquestration dans les forêts ou à travers la biomasse.

Tableau 2 : Valeurs de GES (en kgCO₂eq/m²/an) de l'impact Changement Climatique (EF v3.0)

Variante	Construction	Usage	Rénovation	Fin de vie	Total
Base	3,1	27	2,5	0,12	32,7
Après améliorations (phase de transition)	-0,41	-2,27	5,06	0,15	2,53
Après transition	-0,41	0,81	5,06	0,15	5,61

(Brejnrod, Kalbar, et al. 2017a) ont établi des budgets carbone pour une maison individuelle de surface moyenne de 128 m² au Danemark, et une occupation moyenne de 2,6 occupants par logement, en se basant sur la limite de réchauffement climatique de 2°C. Ces valeurs moyennes ne sont pas loin des valeurs françaises (113 m² et 2,5 occupants) (Insee 2017). Le budget trouvé qui permet de respecter la limite est de 2,2 kgCO₂eq/m²/an. Pour établir ce budget, la répartition de la capacité de charge de la planète se fait en deux étapes :

- 1) Distribution de la capacité de charge de la terre par habitant.
- 2) Attribution d'une partie de l'équivalent-personne quantifié en 1) à des services spécifiques liés aux bâtiments, dans ce cas, la fourniture de logements, y compris les effets de la construction, de l'exploitation et de l'entretien d'un logement danois.

Il faut prendre en compte le fait que le budget d'une maison individuelle sera forcément inférieur à celui d'un logement collectif, car on a moins d'occupants par m² dans une maison que dans un appartement (45 et 32,5 occ/m² respectivement en France) (Insee 2017). Le bâtiment de logement collectif français n'est pas loin du seuil danois (2,53 pour un seuil de 2,2 kgCO₂eq/m²/an). Par contre, après la période de transition, on s'éloigne plus du seuil et on risque de ne pas le respecter même s'il est établi pour un logement collectif en France.

La descente d'échelle présente un caractère subjectif, notamment par rapport aux objectifs qu'on définit (limites planétaires ou accords de Paris par exemple), mais aussi par rapport aux différentes théories de distribution de la capacité de charge de la planète. Il y a aussi la question de temporalité qui reste importante à prendre en considération. Les bâtiments étant des systèmes à très longue durée de vie, comment doit être pris en compte l'évolution du système productif (et donc les impacts de la rénovation), l'évolution du climat, la contribution du bâtiment à l'amélioration d'autres secteurs en phase de transition (e.g. secteur électrique et production photovoltaïque). Quelle est finalement la validité temporelle des budgets établis ? L'ensemble de ces questions doit être adressé pour réellement progresser vers une ACV absolue des bâtiments.

4. CONCLUSION ET PERSPECTIVE

Dans cette communication, les modalités d'articulation entre les concepts d'ACV absolue et des limites planétaires ont été présentées. Les principaux travaux sur le sujet ont été analysés. Notamment, plusieurs méthodes de descente d'échelle ont été identifiées. Le résultat d'une de ces études a été utilisé pour évaluer la performance environnementale d'un bâtiment dans le contexte de limitation du réchauffement climatique à 2°C. Le changement climatique est identifié comme la limite la plus simple à traiter et la plus étudiée dans la littérature. Plusieurs questions concernant la temporalité et l'évolution du contexte climatique et technologique au long de la durée de vie du bâtiment doivent cependant être résolues. Une perspective de ce travail est de pouvoir créer des budgets pour le secteur du bâtiment français en utilisant différentes limites planétaires. Ceci implique des efforts sur la régionalisation et la spatialisation des impacts, notamment pour les cas de l'eau et de l'usage des sols. Il serait intéressant également d'étudier le cas d'un quartier multi-usage, afin d'établir des budgets qui prennent en compte en plus de la fonction de logement, autres activités comme le commerce, l'éducation, le transport, mais aussi l'alimentation.

5. BIBLIOGRAPHIE

- Andersen, Camilla Ernst, Pernille Ohms, Freja Nygaard Rasmussen, Harpa Birgisdóttir, Morten Birkved, Michael Hauschild, et Morten Ryberg. 2020. « Assessment of Absolute Environmental Sustainability in the Built Environment ». *Building and Environment* 171 (mars): 106633. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106633>.
- Bendahmane, N, N Gondran, et J Chevalier. 2022. « AESA Approach Applied to Mineral and Metal Resources Use Sustainability in the Building Sector: The MiMOSA Method ». *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 1078 (1): 012124. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1078/1/012124>.
- Bjørn, Anders, Chanjief Chandrakumar, Anne-Marie Boulay, Gabor Doka, Kai Fang, Natacha Gondran, Michael Zwicky Hauschild, et al. 2020. « Review of Life-Cycle Based Methods for Absolute Environmental Sustainability

- Assessment and Their Applications ». *Environmental Research Letters* 15 (8): 083001. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab89d7>.
- Brejtnrod, Kathrine Nykjær, Pradip Kalbar, Steffen Petersen, et Morten Birkved. 2017a. « The Absolute Environmental Performance of Buildings ». *Building and Environment* 119 (juillet): 87-98. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.04.003>.
- . 2017b. « The Absolute Environmental Performance of Buildings ». *Building and Environment* 119 (juillet): 87-98. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.04.003>.
- Calvin, Katherine, Dipak Dasgupta, Gerhard Krinner, Aditi Mukherji, Peter W. Thorne, Christopher Trisos, José Romero, et al. 2023. « IPCC, 2023: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (Eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland. » First. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>.
- Commissariat général au développement durable. 2023. « La France face aux neuf limites planétaires ». <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/edition-numerique/la-france-face-aux-neuf-limites-planetaires/>.
- Dicko, Alpha Hamid, Charlotte Roux, et Bruno Peuportier. 2023. « Achieving Net Zero Carbon Performance in a French Apartment Building? » *Energies* 16 (22): 7608. <https://doi.org/10.3390/en16227608>.
- Francart, N, C A Clausen, A Bjørn, et H Birgisdottir. 2023. « Building within Planetary Boundaries: Setting and Assessing Absolute Sustainability Targets at the Building Level ». *Journal of Physics: Conference Series* 2600 (15): 152015. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2600/15/152015>.
- Friot, Damien, et Hy Dao. 2015. « Environmental Limits and Swiss Footprints Based on Planetary Boundaries ». Insee. 2017. « Les conditions de logement en France ». Insee. <https://www.insee.fr/fr/statistiques/2586377>.
- Lade, Steven J., Will Steffen, Wim De Vries, Stephen R. Carpenter, Jonathan F. Donges, Dieter Gerten, Holger Hoff, Tim Newbold, Katherine Richardson, et Johan Rockström. 2019. « Human Impacts on Planetary Boundaries Amplified by Earth System Interactions ». *Nature Sustainability* 3 (2): 119-28. <https://doi.org/10.1038/s41893-019-0454-4>.
- Lucas, Paul, et Harry Wilting. 2018. « Towards a Safe Operating Space for the Netherlands », juillet.
- Ministère de la transition écologique. 2020. « Stratégie Nationale Bas Carbone ». <https://www.ecologie.gouv.fr/strategie-nationale-bas-carbone-snbc>.
- Nykqvist, Björn. 2013. *National Environmental Performance on Planetary Boundaries: A Study for the Swedish Environmental Protection Agency*. Stockholm: Swedish Environmental Protection Agency.
- Peuportier, Bruno, Stéphane Thiers, et Alain Guiavarch. 2013a. « Eco-Design of Buildings Using Thermal Simulation and Life Cycle Assessment ». *Journal of Cleaner Production* 39 (janvier): 73-78. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.08.041>.
- . 2013b. « Eco-Design of Buildings Using Thermal Simulation and Life Cycle Assessment ». *Journal of Cleaner Production* 39 (janvier): 73-78. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.08.041>.
- Peuportier, Bruno, et Aurore Wurtz. 2023. « Application of Life Cycle Assessment to a Building Sample in Order to Help in Projects Evaluation », septembre.
- Pittau, Francesco, Gabriele Lumia, Niko Heeren, Giuliana Iannaccone, et Guillaume Habert. 2019. « Retrofit as a Carbon Sink: The Carbon Storage Potentials of the EU Housing Stock ». *Journal of Cleaner Production* 214 (mars): 365-76. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.12.304>.
- Priore, Yasmine Dominique, Thomas Jusselme, et Guillaume Habert. 2021. « Deriving Global Carbon Budgets for the Swiss Built Environment ». *Journal of Physics: Conference Series* 2042 (1): 012172. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2042/1/012172>.
- Richardson, Katherine, Will Steffen, Wolfgang Lucht, Jørgen Bendtsen, Sarah E. Cornell, Jonathan F. Donges, Markus Drüke, et al. 2023. « Earth beyond Six of Nine Planetary Boundaries ». *Science Advances* 9 (37): eadh2458. <https://doi.org/10.1126/sciadv.adh2458>.
- Rockström, Johan, Will Steffen, Kevin Noone, Åsa Persson, F. Stuart Chapin, Eric F. Lambin, Timothy M. Lenton, et al. 2009. « A Safe Operating Space for Humanity ». *Nature* 461 (7263): 472-75. <https://doi.org/10.1038/461472a>.
- Ryberg, Morten W., Martin Marchman Andersen, Mikołaj Owsianiak, et Michael Z. Hauschild. 2020a. « Downscaling the Planetary Boundaries in Absolute Environmental Sustainability Assessments – A Review ». *Journal of Cleaner Production* 276 (décembre): 123287. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123287>.
- . 2020b. « Downscaling the Planetary Boundaries in Absolute Environmental Sustainability Assessments – A Review ». *Journal of Cleaner Production* 276 (décembre): 123287. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123287>.
- Steffen, Will, Katherine Richardson, Johan Rockström, Sarah E. Cornell, Ingo Fetzer, Elena M. Bennett, Reinette Biggs, et al. 2015. « Planetary Boundaries: Guiding Human Development on a Changing Planet ». *Science* 347 (6223): 1259855. <https://doi.org/10.1126/science.1259855>.
- Zabalza Bribián, Ignacio, Alfonso Aranda Usón, et Sabina Scarpellini. 2009. « Life Cycle Assessment in Buildings: State-of-the-Art and Simplified LCA Methodology as a Complement for Building Certification ». *Building and Environment* 44 (12): 2510-20. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.05.001>.

Sélection d'une vague de chaleur dimensionnante pour l'adaptation du bâtiment au changement climatique

Samy Kraiem¹, Anaïs Machard*²

¹ CSTB, Direction Climatologie Aérodynamique et Aéraulique, 11 rue Henri Picherit, 44300 Nantes

*samy.kraiem00@gmail.com

² CSTB, Direction Energie Environnement, 24 rue Joseph Fourier, 38400 Saint-Martin-d'Hères

*anais.machard@cstb.fr

RESUME.

Cet article propose une méthode de sélection d'une vague de chaleur dimensionnante pour la prise en compte de l'adaptation aux fortes chaleurs lors du processus de conception ou de rénovation d'un bâtiment. La méthode utilise des données climatologiques historiques et prospectives à horizons 2040 et 2080, issues d'un sous-ensemble de données débiaisées basées sur 26 modèles EUROCORDEX-11 sous scénario RCP 8.5. La sélection repose sur le calcul de périodes de retour utilisant une GEV (Generalized Extreme Value distribution) ajustée sur la distribution de l'indicateur de sévérité de la vague de chaleur. Ce processus est répété pour chaque modèle et pour chaque période temporelle pour les deux villes cas d'études Nîmes et Paris. Dans un premier temps, la méthode permet de sélectionner 10 vagues de chaleur parmi l'ensemble, dont la sévérité associée est la plus proche de la période de retour 5 ans, considérant ainsi l'incertitude liée aux modèles climatiques. Dans un second temps, une unique vague de chaleur est sélectionnée parmi les dix, celle pour laquelle la température nocturne moyenne et le rayonnement direct journalier moyen sont le plus élevés parmi les 10 vagues de chaleur de sévérité similaires.

MOTS-CLÉS : vague de chaleur, surchauffe, projections climatiques.

1. INTRODUCTION

Dans un contexte de changement climatique, il apparaît crucial de prendre en compte la montée en fréquence, en intensité et en durée des canicules lors de la conception et de la rénovation du cadre bâti. Actuellement la réglementation environnementale RE2020 impose un critère de confort d'été calculé durant une canicule passée extrême, la canicule de 2003. Cependant, de nombreux acteurs, à la fois dans le secteur de la recherche et sur le terrain, cherchent à définir une ou plusieurs canicules futures de référence afin d'utiliser un jeu restreint de canicules futures pour l'évaluation du bâti dans un contexte de changement climatique. Malgré des recherches grandissantes sur le sujet au cours des dernières années (Machard, 2020), la définition d'une vague de chaleur ne fait pas l'unanimité à l'international et bien qu'il en existe une en France, il convient toujours de sélectionner une vague de chaleur future représentative, et à la connaissance des auteurs, aucuns travaux à ce jour n'a proposé de méthode à ce sujet. Cet article propose une méthode de sélection de vague de chaleur dimensionnante pour l'adaptation du bâti, basée sur leur probabilité d'occurrence. Cette méthodologie a été développée dans le cadre du projet RENOPTIM, copiloté par le CSTB et l'USH, qui vise à doter les bailleurs sociaux d'un outil d'aide à la décision pour intégrer le confort d'été lors de la rénovation de leur parc de bâtiment. La méthodologie proposée dans ce papier vise de permettre à la maîtrise d'ouvrage de pouvoir sélectionner une vague de chaleur basée sur la récurrence future de cet évènement, lui permettant donc de déterminer les mesures d'adaptation appropriées tenant compte des caractéristiques de ces vagues de chaleur dimensionnantes.

2. METHODOLOGIE

2.1. PREPARATION DES DONNEES

Dans cette étude, les données issues de modèles climatiques EUROCORDEX-11 (Giorgi, 2008) (Jacob, 2014) sont utilisées, et la correction du biais de ces données, nécessaire afin qu'elles soient utilisées dans le cadre d'application bâti (Randall D. a., 2007), est réalisée à partir des données historiques de référence ERA5 (Hersbach, 2020).

Pour cette préparation des données, la procédure fTMY (future Typical Meteorological Year), développée au CSTB, est utilisée. Cette procédure consiste à corriger et affiner les paramètres climatiques en sortie de plusieurs modèles de l'ensemble EUROCORDEX-11. L'objectif est d'obtenir des séries temporelles horaires en sortie de plusieurs modèles pour les paramètres climatiques nécessaires aux simulations du bâti (Tableau 1). Cette procédure s'effectue comme suit : 1) Extraction au point de grille d'intérêt des données EUROCORDEX ; 2) Extraction au point de grille d'intérêt des données ERA5 ; 3) Correction du biais des données EUROCORDEX pour la zone d'intérêt ; 4) Interpolation des séries temporelles corrigées d'une résolution de 3 heures à une résolution de 1 heure ; 5) Calcul des variables climatiques supplémentaires nécessaires pour une utilisation de ces données sur une application bâti. Une fois cette procédure réalisée, pour chaque modèle récupéré depuis l'ensemble EUROCORDEX-11, des séries temporelles corrigées à la résolution horaire pour chaque paramètre climatique listés dans le Tableau 1 sont disponibles sur la période 1981 à 2097.

Tableau 1 – Variables climatiques produites par fTMY (* sont les paramètres issus d'EUROCORDEX)

Nom	date	ps*	tas*	huss*	rsds*	rls*	clt*
Variable	Date	Pression atmosphérique	Température	Humidité spécifique	Rayonnement global	Rayonnement IR	Couverture Nuageuse
Unité	AAAA-MM-JJ hh:mm:ss	Pa	°C	g/kg	W/m ²	W/m ²	%

pr*	sfcWind*	RH	DNR	DHR	tdp	LWR
Précipitations	Vitesse du vent	Humidité relative	Rayonnement direct normal	Rayonnement horizontal diffus	Point de rosée	Température du ciel
mm	m/s	%	W/m ²	W/m ²	°C	°C

2.1.1. Les données EUROCORDEX

Pour obtenir une résolution adéquate, les données issues des simulations de l'ensemble EUROCORDEX-11 à la résolution temporelle de 3 heures sont récupérées. La zone géographique considérée de l'ensemble est l'Europe avec une grille 0.11° x 0.11° et la période temporelle s'étend de 1950 à 2100. Les données sont récupérées depuis le portail ESGF pour les 26 modèles renseignés dans le tableau en Annexe 1 et pour le scénario RCP 8.5 (Moss, 2010).

2.1.2. Les données ERA5

Les données ERA5 (paramètres identiques à ceux d'EUROCORDEX) sont utilisées ici pour corriger le biais présent dans les données issues de l'ensemble EUROCORDEX. Ces paramètres sont téléchargés à la résolution horaire et sur une zone géographique couvrant la France depuis le portail Copernicus (Buontempo, 2022). Il convient de noter que le cycle diurne des données de vitesse de vent présente un défaut lié à une erreur propre à ERA5 (CDS, 2022), ce qui peut induire un biais dans les données de vent finales obtenues.

2.1.3 Correction du biais

Afin de corriger le biais des sorties de modèles climatiques et affiner spatialement ces données, deux méthodes de correction de biais sont utilisées ici : la méthode quantile-quantile Q-MAP (Déqué, 2007) et la transformation CDF-t (Cumulative Density Function – transform) (Michelangeli, 2009) qui peut être considérée comme une variante de la méthode Q-MAP. La correction s’effectue sur les données trihoraires par période de 39 années en considérant : la période de référence (ou d’apprentissage) 1981 à 2019 (2000s), la période futur proche 2020 à 2058 (2040s) et la période futur lointain 2059 à 2097 (2080s). La méthode de correction de biais Q-MAP est utilisée pour corriger les données de couverture nuageuse. Pour la correction des précipitations, la méthode Q-MAP doublée de l’approche SSR (Vrac, 2016) est appliquée. Enfin, pour les corrections du biais des autres paramètres, la méthode CDF-t est privilégiée. Les corrections de biais sont réalisées paramètres par paramètres indépendamment les uns des autres, ainsi les corrélations inter-paramètres ne sont pas corrigées mais conservées.

2.1.4 Interpolation

Les séries temporelles pour chaque paramètre climatique, excepté les précipitations, sont interpolées d’une résolution de 3 heures à une résolution de 1 heure utilisant une interpolation par spline cubique d’Hermite (Hyman, 1983) (Randall L. D., 1989). Il convient de noter que l’interpolation des vitesses de vents de 3 heures à 1 heure peut faire apparaître un biais dans l’autocorrélation des vitesses de vent, avec des autocorrélations finales potentiellement plus élevées que dans les données horaires de référence.

2.1.5 Calcul des variables supplémentaires

Une fois les séries temporelles corrigées et affinées temporellement, il devient possible de calculer les paramètres suivants : l’humidité relative, le rayonnement direct normal, le rayonnement diffus horizontal, le point de rosée et la température du ciel. L’humidité relative est calculée à partir de la température, de la pression atmosphérique et de l’humidité spécifique en utilisant la formulation de Bolton (Bolton, 1980). Les rayonnements direct normal et diffus horizontal sont calculés à partir du modèle DISC (Skartveit, 1998) à partir des paramètres de date, de position (latitude et longitude), de rayonnement global et de pression atmosphérique. Le point de rosée est calculé grâce aux coefficients de Buck (Buck, 1981) et à partir des paramètres de température et d’humidité relative. Enfin, la température du ciel est calculée comme conseillée par l’ASHRAE, à partir des paramètres de température, de couverture nuageuse et de point de rosée.

2.2. Méthode de sélection d’une vague de chaleur dimensionnante

2.2.1 Motivations

Une fois que les données sont extraites sur la zone d’intérêt, les données ainsi utilisables sont 13 séries temporelles horaires de 1981 à 2097 pour chacun des 26 modèles climatiques. Cette quantité de données est importante, et reste difficile à exploiter pour une application sur le bâti. Dans un contexte de changements climatiques prononcés, l’utilisation d’années types météorologiques, n’est pas suffisant pour prendre en compte les événements extrêmes dimensionnants pour le bâti. Nous proposons dans cette étude une approche permettant d’ajouter aux fichiers TMY produits des vagues de chaleur, ainsi que permettre de diminuer la quantité de donnée pour une utilisation finale plus simple.

2.2.2. Sélection des vagues de chaleur

Le choix a été fait d'utiliser la méthode définie par Ouzeau (Ouzeau, 2016) pour la détection de vagues de chaleur, réalisée pour tous les jeux de données produits. Il est possible de les catégoriser en fonction de trois caractéristiques : leur durée, leur intensité (température journalière maximale atteinte) et par leur sévérité qui est le cumul de °C.jour au-dessus du seuil S_{deb} au cours de l'évènement, divisée par la différence entre S_{pic} et S_{deb} .

2.2.3. Caractérisation des vagues de chaleurs par probabilité d'occurrence

Nous proposons ici une approche pour caractériser les vagues de chaleurs par leur probabilité d'occurrence. Au vu du grand nombre de caractérisations à effectuer et en vue d'une automatisation de la procédure, le choix de la distribution de valeurs extrêmes généralisée (GEV) a été fait pour modéliser les vagues de chaleur extrêmes. La fonction de répartition s'exprime comme il suit :

$$F(x; \mu; \sigma; \xi) = \exp \left\{ - \left[1 + \xi \left(\frac{x - \mu}{\sigma} \right) \right]^{-\frac{1}{\xi}} \right\}$$

La distribution GEV est caractérisée par 3 paramètres : la localisation μ , qui détermine le centre de la distribution ; l'échelle σ , qui contrôle la dispersion des données autour du centre ; et la forme ξ , qui indique la forme de la queue de la distribution. Le paramètre de forme est crucial pour distinguer les sous-familles de la GEV (Gumbel, Fréchet, Weibull). Pour chaque jeu de données et sur chaque période, un ajustement de la distribution GEV est réalisé sur la sévérité des vagues de chaleur. Afin de capturer uniquement les évènements les plus extrêmes, la vague de chaleur maximisant la sévérité par année est conservée. L'ajustement de la distribution GEV aux données ainsi sélectionnées est réalisé à travers la méthode du maximum de vraisemblance. Les trois paramètres de la GEV – localisation (μ), échelle (σ), et forme (ξ) – sont estimés pour caractériser la sévérité des vagues de chaleur sur une période et un jeu de données. Avec les paramètres de la GEV ainsi estimés, il est possible d'utiliser la distribution pour calculer les niveaux de retour pour différents intervalles de temps, offrant ainsi la possibilité d'associer une sévérité d'une vague de chaleur à un temps de retour, sur une période et un jeu de données. Cette étape est répétée pour tous les jeux de données et toutes les périodes, permettant ainsi d'estimer sur une même période des sévérités, des intensités et des durées de retour propres à chaque jeu de données. Un ajustement supplémentaire est également réalisé avec le jeu de données de référence. La Figure 1 permet d'illustrer les résultats obtenus à Nantes sur la période de référence 1981-2019 pour le critère de sévérité.

Chaque courbe grisée représente la sévérité de retour d'un jeu de données de projections climatiques. La courbe de référence ainsi que quelques vagues de chaleur notables en termes de sévérité sont également affichées sur la figure. Il est possible d'observer que les courbes de sévérité de retour sur la période historique (graphe de gauche) encadrent la courbe de sévérité de retour de référence, impliquant ainsi que les projections climatiques corrigées sur la période historique permettent la reproduction de vagues de chaleurs similaires à ceux de la référence en termes de sévérité. De plus sur la période futur proche (graphe de droite), les sévérités de retour sont significativement supérieures aux sévérités de retour de référence historique, ce qui est cohérent avec un réchauffement climatique présent. En se concentrant sur l'évènement de 2003, il est possible de noter que la sévérité de cet évènement sur la période historique est associée à un temps de retour de 15 ans. Le temps de retour de cet évènement est de 7 ans sur la période de futur proche. Autrement dit, une vague de chaleur de sévérité similaire à 2003 à une période de retour de 7 ans sur 2020-2058 à Nantes. Sur la période futur lointain, le temps de retour s'avère être de 1 ans à Nantes (non montré ici).

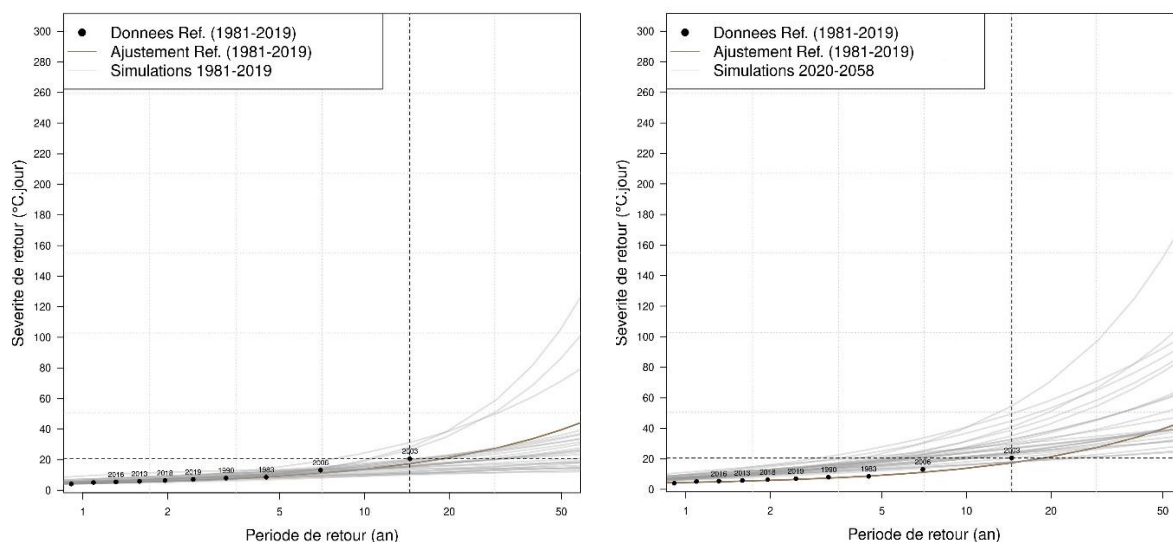


Figure 1 – Calcul du temps de retour des vagues de chaleur selon le critère de sévérité

2.2.5. Sélection d'une vague de chaleur unique

L'étape suivante consiste à sélectionner une unique vague de chaleur issue d'un jeu de données par période (2020s, 2040s ou 2080s) et par période de retour. Le choix a été fait de sélectionner la vague de chaleur selon le critère sévérité. En effet, par l'analyse de 10 vagues de chaleur les plus proches d'une même période de retour selon les différents critères (durée, intensité, sévérité), il est possible d'observer que les vagues de chaleur de durées similaires peuvent avoir des intensités qui varient de presque 5°C. De la même manière, les vagues de chaleur d'intensités similaires présentent des durées qui varient de 30 jours. La sévérité se révèle être un critère plus stable, les vagues de chaleur présentant des durées variant de « seulement » 15 jours et des intensités variant de maximum 3°C. Pour cette raison, depuis les jeux de données créés et pour chaque période, sont sélectionnées les 10 vagues de chaleurs dont les sévérités sont les plus proches de la médiane.

L'étape suivante consiste à sélectionner une vague de chaleur unique parmi les 10. Deux paramètres climatiques sont considérés pour la sélection, le rayonnement et la température nocturne. D'autres variables ont été investiguées, telles que l'humidité relative, mais pour les villes étudiées les différences d'humidité relative pour des vagues de chaleur aux temps de retour similaires restaient faibles, contrairement au rayonnement direct qui se pouvait présenter quant à lui de grandes différences (Toesca, 2023). Dans un but de comparaison, les vagues de chaleurs sont analysées selon 3 indicateurs : le cumul de rayonnement direct normal, la température nocturne moyenne et un indicateur mixte K . Cet indicateur mixte est calculé à partir des deux précédents selon la méthode suivante : deux séries de données ont été constituées :

- Série du cumul moyen du rayonnement, notée S_{DNR} ;
- Série de la température nocturne moyenne, notée S_{noc} ;

Pour chaque vague de chaleur n , un score K_n est calculé comme la somme des rangs de la vague de chaleur n dans chaque série. Soient, $L[S_{DNR}(n)]$ le rang dans la série S_{DNR} pour la vague de chaleur n , $L[S_{noc}(n)]$ le rang dans la série S_{noc} pour la vague de chaleur n , le score est calculé comme :

$$K_n = L[S_{DNR}(n)] + L[S_{noc}(n)]$$

La vague de chaleur n maximisant les deux indicateurs est la vague de chaleur présentant la valeur de K_n la plus faible.

3. RESULTATS

3.1 Vagues de chaleur sélectionnées par sévérité de retour

La **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** présente les sévérités de vagues de chaleur associées aux temps de retour 5 et 10 ans pour les villes de Nantes, Nîmes et Paris-Vélizy sur les périodes historique, futur proche et futur lointain. La sévérité de la vague de chaleur de 2003 est indiquée pour comparaison. Pour ces 3 villes, il s'avère que la sévérité de la vague de chaleur de 2003, comparée aux sévérités de retour 5 et 10 ans de la période historique, revêt d'un caractère exceptionnel. A nuancer pour la ville de Nîmes où la sévérité 2003 est équivalente au 75^e percentile des sévérités historiques associées à une période de retour 10 ans.

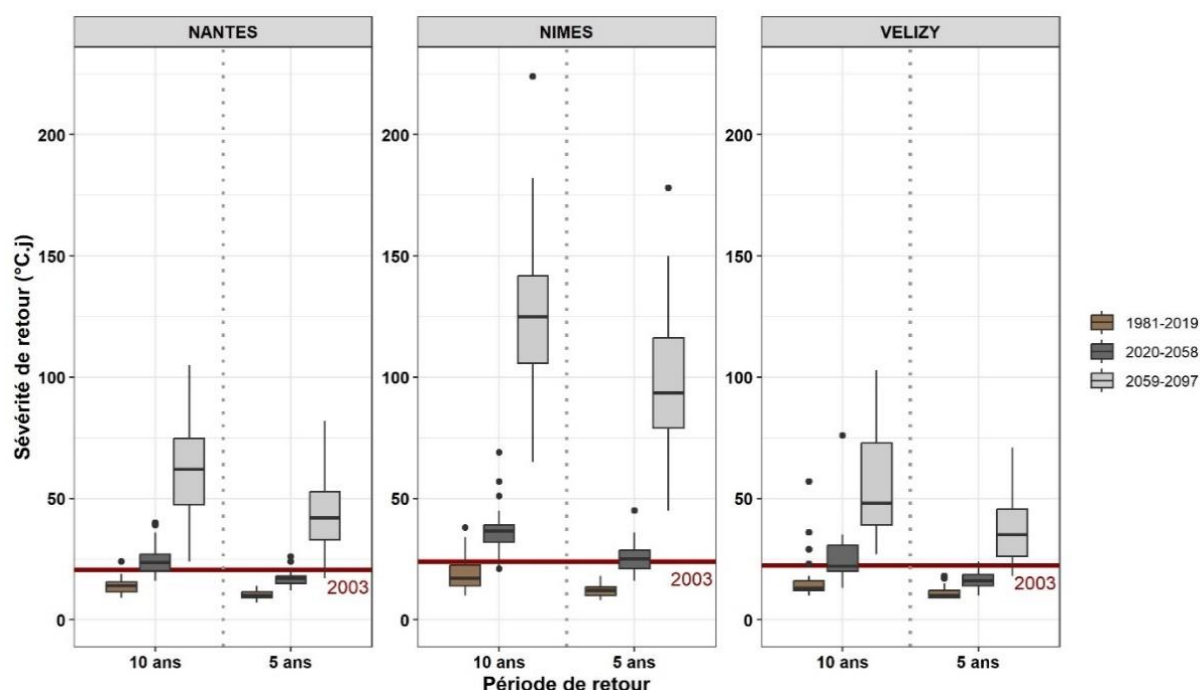


Figure 2 – Distribution de toutes les vagues de chaleur correspondant aux sévérités de retour 5 ans et 10 ans pour chaque période (2000s, 2040s et 2080s) et pour les villes de Nantes, Nîmes et Paris-Vélizy

La probabilité d'occurrence d'un évènement de sévérité similaire à celui de 2003 augmente dans le temps. Ainsi, pour le futur proche un tel évènement à une période de retour inférieure à 10 ans à Nantes (25^e percentile), 5 ans à Nîmes (médiane du boxplot) et de 10 ans à Paris (médiane du boxplot). A sévérité de vagues de chaleur fixée, le temps de retour associé semble être divisé par deux sur la période 2020 à 2058 en comparaison de la période historique. Enfin, sur la période de futur lointain, une grande dispersion est présente sur les sévérités associées aux temps de retour 5 et 10 ans. Cela s'explique par le scénario (RCP8.5) implémenté et la nature des différents modèles utilisés. Néanmoins, il apparaît évident que des vagues de chaleur à sévérité équivalente à celle de 2003 apparaîtront fréquemment à Paris, Nantes et Nîmes. De plus, des vagues de chaleur de sévérités bien supérieures à celle de 2003 verront le jour à Nîmes. A temps de retour fixé, la sévérité associée sur la période futur lointain a environ un facteur 5 en comparaison à la sévérité associée sur la période historique.

3.2 Sélection d'une vague de chaleur unique dimensionnante

Les 10 vagues de chaleur sélectionnées, dont les sévérités de retour sont les plus proches de la sévérité de retour 5 ans, sont classées selon : la maximisation du cumul de rayonnement direct (DNR), la maximisation de la température moyenne nocturne (Tnoc) et la minimisation de l'indicateur mixte K . Différentes caractéristiques des vagues de chaleur sélectionnées sont présentées dans le Tableau 2 pour les villes de Nîmes et Vélizy sur la période historique. Les différences pour les 4 caractéristiques sont assez faibles entre ces trois canicules. Pour cette raison, la vague de chaleur minimisant l'indicateur mixte K est finalement choisie pour représenter la canicule de référence sur la période et la ville.

Tableau 2 – Températures minimales et nocturnes moyennes, Cumul du rayonnement direct normal maximal et moyen durant la période de la vague de chaleur d'intérêt à Nîmes et à Paris-Vélizy pour la période de retour 5 ans sur la période 1981-2019

Sélection	NIMES			PARIS-VELIZY		
	DNR	K	Tnoc	DNR	K	Tnoc
Température minimale horaire (°C)	20.4	20.6	21.1	14.3	16.1	15.4
Température nocturne moyenne (°C)	24.7	25.0	25.5	20.5	22.8	23.0
Cumul ray. direct maximal (W/m ²)	8746	6815	8881	8671	8206	7187
Cumul ray. direct moyen (W/m ²)	7900	5711	6752	7364	6508	4340

Finalement, la vague de chaleur présentant une sévérité de retour de 5 ans et minimisant l'indicateur K est sélectionnée. Ses caractéristiques pour Nîmes pour la période historique sont : 12 jours de durée, 32°C d'intensité et 12.1°C.jours de sévérité.

En Annexe II, les sévérités médiane des vagues de chaleur associées aux périodes de retour 5 ans et 10 ans pour d'autres villes d'intérêt sont présentées. La méthodologie a été présentée ici pour ces périodes de retour mais la procédure peut se décliner pour d'autres périodes (3 ans, 15 ans, ...).

4. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Cet article a présenté une méthode de sélection d'une canicule future unique de référence associée à un temps de retour. L'avantage de cette méthode est qu'elle permet de sélectionner une seule canicule, ce qui la rend opérationnelle et utilisable pour l'analyse de la surchauffe de bâtiments en climats futurs. La méthode utilise des données débiaisées issues de 26 modèles climatiques, permettant d'inclure l'incertitude liée aux projections climatiques induites dans les différentes modélisations. Par ailleurs, la méthode sélectionne également la canicule sur des critères additionnels de rayonnement solaire direct et de température nocturne, problématiques pour la surchauffe du bâtiment. Bien qu'impactant le confort thermique estival intérieur, l'humidité relative n'a pas été conservée en tant que critère de sélection, les vagues de chaleurs présentant une grande similitude pour ce paramètre. Cependant, il conviendrait d'approfondir cette comparaison afin de s'assurer que les humidités relatives présentes dans les canicules de référence sont représentatives de tels événements. Ce point sera essentiel pour le dimensionnement des systèmes de rafraîchissement ou de refroidissement, et pourra également être exploré lors d'une construction d'année sévère météorologique future. De plus, il reste à approfondir notamment les ajustements des sévérités extrêmes. En effet, pour une raison d'automatisation de la procédure en vue d'une application à un grand nombre de jeux de données, le choix de réaliser des ajustements de distributions GEV par méthode de maximum de vraisemblance a été fait. Cependant, il

convient de noter que des ajustements plus précis pourraient être réalisés en utilisant des distributions et méthodes autres potentiellement plus adaptées à certains jeux de données.

Cette méthode définit un processus utile pour sélectionner des vagues de chaleur dimensionnantes actuelles et futures basée sur leur probabilité d'occurrence. Ces événements peuvent être ainsi inclus dans les années types futures (fTMY) pour une utilisation non seulement pour des études de recherche, mais aussi pour des applications terrain propre au secteur du bâtiment.

BIBLIOGRAPHIE

- Bolton, D. (1980). The Computation of Equivalent Potential Temperature. *Monthly Weather Review*, 1046-1053.
- Buck, A. L. (1981). New equations for computing vapor pressure and enhancement factor. *Journal of Applied Meteorology*, 1527-1532.
- Buontempo, C. (2022). The Copernicus Climate Change Service: Climate Science in Action. *American Meteorological Society*, E2669 - E2687. doi:10.1175/BAMS-D-21-0315.1
- CDS, C. C. (2022). *Copernicus Climate Change Service Climate Data Store (CDS)*. Récupéré sur Copernicus Climate Change Service CDS: <https://confluence.ecmwf.int/display/CKB/ERA5%3A+data+documentation>
- Déqué, M. (2007). Frequency of precipitation and temperature extremes over France in an anthropogenic scenario: Model results and statistical correction according to observed values. *Global and Planetary Change*, 16-26.
- Giorgi, F. a. (2008). Addressing climate information needs at the regional level: The CORDEX framework. *WMO Bull.*
- Hersbach, H. a.-S. (2020). The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1999-2049.
- Hyman, J. M. (1983). Accurate Monotonicity Preserving Cubic Interpolation. *SIAM Journal on Scientific and Statistical Computing*, 645-654. doi:10.1137/0904045
- Jacob, D. a. (2014). EURO-CORDEX: New high-resolution climate change projections for European impact research. *Regional Environmental Change*.
- Machard, A. a.-M. (2020). A Methodology for Assembling Future Weather Files Including Heatwaves for Building Thermal Simulations from the European Coordinated Regional Downscaling Experiment (EURO-CORDEX) Climate Data. *Energies*, 13. doi:<https://doi.org/10.3390/en13133424>
- Michelangeli, P.-A. a. (2009). Probabilistic downscaling approaches: Application to wind cumulative distribution functions. *Geophysical Research Letters*.
- Moss, R. a. (2010). The Next Generation of Scenarios for Climate Change Research and Assessment. *Nature*, 47-56.
- Ouzeau, G. a. (2016). Heat waves analysis over France in present and future climate: Application of a new method on the EURO-CORDEX ensemble. *Climate Services*, 4, 1-12. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cliser.2016.09.002>
- Panofsky, H. a. (1968). *Some Applications of Statistics to Meteorology*. Earth and Mineral Sciences Continuing Education, College of Earth and Mineral Sciences.
- Randall, D. a. (2007). Climate Models and Their Evaluation. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on climate Change*.
- Randall, L. D. (1989). Nonnegativity-, monotonicity-, or convexity-preserving cubic and quintic Hermite interpolation. *Mathematics of Computation*, 471-494.
- Skartveit, A. (1998). An hourly diffuse fraction model with correction for variability and surface albedo. *Solar Energy*, 173-183.
- Toesca, A. a. (2023). Generation of weather data for the assessment of building performances under future heatwave conditions. *Building and Environment*, 110491.
- Vrac, M. a. (2016). Bias correction of precipitation through Singularity Stochastic Removal: Because occurrences matter. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 5237-5258.
- Wood, A. a. (2004). Hydrologic Implications of Dynamical and Statistical Approaches to Downscaling Climate Model Outputs. *Climatic Change*, 189-216.

5. ANNEXES

I - Liste des modèles climatiques utilisés

Driving Global Climate Model (realization)	Regional Climate Model	Institute
CNRM-CERFACS-CNRM-CM5 (r1i1p1)	COSMO-crCLIM-v1-1	Zurich Federal Institute of Technology (ETH Zurich)
CNRM-CERFACS-CNRM-CM5 (r1i1p1)	ALADIN63	Centre National de Recherches Météorologiques (CNRM)
CNRM-CERFACS-CNRM-CM5 (r1i1p1)	RegCM4-6	Abdus Salam International Centre for Theoretical Physics (ICTP)
CNRM-CERFACS-CNRM-CM5 (r1i1p1)	RCA4	Swedish Meteorological and Hydrological Institute (SMHI)
ICHEC-EC-EARTH (r1i1p1)	COSMO-crCLIM-v1-1	Zurich Federal Institute of Technology (ETH Zurich)
ICHEC-EC-EARTH (r3i1p1)	COSMO-crCLIM-v1-1	Zurich Federal Institute of Technology (ETH Zurich)
ICHEC-EC-EARTH (r12i1p1)	COSMO-crCLIM-v1-1	Zurich Federal Institute of Technology (ETH Zurich)
ICHEC-EC-EARTH (r1i1p1)	RegCM4-6	Abdus Salam International Centre for Theoretical Physics (ICTP)
ICHEC-EC-EARTH (r1i1p1)	RACMO22E	Royal Netherlands Meteorological Institut (KNMI)
ICHEC-EC-EARTH (r3i1p1)	RACMO22E	Royal Netherlands Meteorological Institut (KNMI)
ICHEC-EC-EARTH (r12i1p1)	RACMO22E	Royal Netherlands Meteorological Institut (KNMI)
ICHEC-EC-EARTH (r1i1p1)	RCA4	Swedish Meteorological and Hydrological Institute (SMHI)
ICHEC-EC-EARTH (r3i1p1)	RCA4	Swedish Meteorological and Hydrological Institute (SMHI)
ICHEC-EC-EARTH (r12i1p1)	RCA4	Swedish Meteorological and Hydrological Institute (SMHI)
IPSL-IPSL-CM5A-MR (r1i1p1)	RACMO22E	Royal Netherlands Meteorological Institut (KNMI)
IPSL-IPSL-CM5A-MR (r1i1p1)	RCA4	Swedish Meteorological and Hydrological Institute (SMHI)
MOHC-HadGEM2-ES (r1i1p1)	ALADIN63	Centre National de Recherches Météorologiques (CNRM)
MOHC-HadGEM2-ES (r1i1p1)	RACMO22E	Royal Netherlands Meteorological Institut (KNMI)
MOHC-HadGEM2-ES (r1i1p1)	RCA4	Swedish Meteorological and Hydrological Institute (SMHI)
MPI-M-MPI-ESM-LR (r1i1p1)	ALADIN63	Centre National de Recherches Météorologiques (CNRM)

MPI-M-MPI-ESM-LR (r1i1p1)	RegCM4-6	Abdus Salam International Centre for Theoretical Physics (ICTP)
MPI-M-MPI-ESM-LR (r1i1p1)	RACMO22E	Royal Netherlands Meteorological Institut (KNMI)
NCC-NorESM1-M (r1i1p1)	COSMO-crCLIM-v1-1	Zurich Federal Institute of Technology (ETH Zurich)
NCC-NorESM1-M (r1i1p1)	ALADIN63	Centre National de Recherches Météorologiques (CNRM)
NCC-NorESM1-M (r1i1p1)	RegCM4-6	Abdus Salam International Centre for Theoretical Physics (ICTP)
NCC-NorESM1-M (r1i1p1)	RCA4	Swedish Meteorological and Hydrological Institute (SMHI)

II - Sévérité médiane (°C.jour) associées aux périodes de retour 5 ans et 10 ans pour chaque ville d'intérêt

Ville	Zone climatique RE2020	Sévérité 2003	Période de retour	1981-2019	2020-2057	2058-2097
Nantes	H2b, Océanique	20.6	5 ans	10	17	42
			10 ans	14	23.5	62
Bordeaux	H2c, Océanique	19.2	5 ans	9	13	34
			10 ans	11	18.5	46
Paris- Vélizy	H1a, Semi-océanique	22.3	5 ans	11	16	35
			10 ans	15	22	48
Lyon	H1c, Continental	23.6	5 ans	11	18	44.5
			10 ans	17	26	60.5
Grenoble	H1c, Continental	16.3	5 ans	12	19	49
			10 ans	16	29	67
Nîmes	H3	24	5 ans	12	25	93.5
			10 ans	17	36.5	125
Nice	H3, Méditerranéen	27.9	5 ans	13.5	29	105
			10 ans	21	41.5	128

Influence des propriétés radiatives des revêtements intérieurs sur le confort thermique estival des occupants.

Valentin Lahaye*¹, Marion Bonhomme¹, Claire Oms¹, Nicolas Duport², Stéphane Ginestet¹

¹ LMDC, Université de Toulouse, INSA, UPS, Toulouse, France

² B2R, UniLaSalle, Amiens, France

*lahaye@insa-toulouse.fr

RESUME. Cette étude évalue l'impact du rayonnement, tant en ondes courtes qu'en ondes longues, sur le confort thermique estival d'un logement sous un climat méditerranéen. Le solveur aux éléments finis Cast3m est couplé à une méthode de radiosité externalis e pour réaliser un calcul en régime transitoire en considérant une multitude de réflexions diffuses et spéculaires, ainsi et la transmission directe à travers les vitrages. L'influence des propriétés surfaciques intérieures sur la température physiologique équivalente (PET) est  tudi e, soulignant son influence sur la distribution du rayonnement et sur le confort intérieur. Ces observations ont un intérêt dans des spécificités urbaines, comme l'absence de protections solaires et de volets sur les façades des quartiers historiques, ou le piégeage du rayonnement solaire dans les rues canyon.

MOTS-CLÉS : confort d'été, rayonnement, modélisation spatiale.

ABSTRACT. This study assesses the impact of both shortwave and longwave radiation on the summer thermal comfort of a dwelling in a Mediterranean climate. The Cast3m finite element solver is coupled to an externalized radiosity method to perform a transient calculation considering a multitude of diffuse and specular reflections, as well as direct transmission through glazing. The influence of interior surface properties on the physiological equivalent temperature (PET) is studied, highlighting its influence on radiation distribution and indoor comfort. These observations are of interest in specific urban situations, such as the absence of solar protection and shutters on facades in historic districts, or solar radiation trapping in canyon streets.

KEYWORDS: summer comfort, radiation, spatial modelling.

INTRODUCTION

Le confort thermique estival dans les bâtiments résidentiels européens est une préoccupation grandissante face aux enjeux du dérèglement climatique, caractérisés par des vagues de chaleur plus fréquentes et intenses (Smid et al. 2019). Le phénomène d'îlot de chaleur urbain aggrave cette situation dans les centres-villes, compliquant davantage la gestion des surchauffes, dont l'une des causes principales est le piégeage du rayonnement entre les bâtiments (T.R. Oke 1982). Les façades situ es au cœur des centres-villes denses (parfois dépourvues de protections solaires ou de volets) sont donc plus sensibles aux phénomènes radiatifs.

Pour l'étude du rayonnement urbain, une méthode de radiosité a été développée dans des travaux antérieurs (Bugeat 2020). Couplée au solveur d'éléments finis Cast3m (Duport 2021), cette méthodologie permet de modéliser en régime transitoire le problème thermique complet : conduction, convection, et rayonnement, en considérant un grand nombre de réflexions (diffuses et spéculaires) ainsi que la transmittance (directe et diffuse) à travers les vitrages. Le rayonnement pénétrant à l'intérieur du logement depuis le ciel, ainsi que les inter-réflexions auxquels il est soumis avant d'être absorbé par les parois, sont modélisés. Cette méthode ajoute une information supplémentaire quant à l'évaluation du confort intérieur liée aux échanges radiatifs.

L'objectif de ce travail est double. Le premier est de modéliser le rayonnement en ondes courtes reçu par des capteurs (représentés par des globes noirs) pour évaluer son influence sur le confort. Le second, plus exploratoire, est de faire varier les propriétés radiatives (CLO et GLO) des revêtements intérieurs dans une étude de cas, et d'analyser leur impact sur le confort.

DESCRIPTION DU CAS D'ETUDE ET DE LA METHODE

Le cas d'étude représente un appartement d'une surface habitable de 47,1 m² (figure 1). Les fenêtres sont orientées au sud, et les masques proches ne sont pas modélisés. Les compositions des parois et propriétés des matériaux sont décomposés ci-après (tableaux 1 et 2). Des capteurs sont modélisés pour interpréter spatialement le confort (figure 2) par des sphères d'un diamètre de 15cm, espacés de 50cm, et à une hauteur de 1.1m, qui sont représentatives de thermomètres à globe noir.

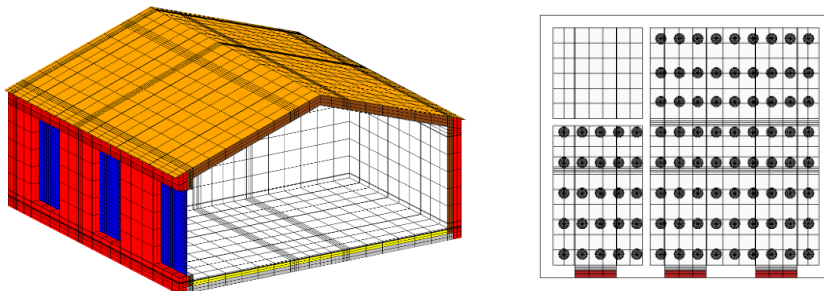


Figure 1: Maquette numérique utilisée pour le calcul. A gauche : vue 3D en coupe du modèle / A droite : vue du dessus du modèle, avec la représentation des capteurs.

Le processus de simulation se divise en plusieurs phases. Les échanges radiatifs sont d'abord effectués sur les surfaces de la maquette numérique, composée de quadrilatères en 3D (sous-section 2.1). Le rayonnement émis (CLO et GLO) depuis le ciel vers les surfaces du modèle (y compris vers les surfaces intérieures et les capteurs) est calculé à chaque pas de temps horaire. Les données météorologiques de Toulouse issues du logiciel **Meteonorm** sont utilisées en entrée. La période de calcul est définie à partir du 10 août jusqu'au 17 août.

Les charges par rayonnement sont intégrées dans le logiciel de résolution aux éléments finis **Cast3m**. Le problème thermique complet y est résolu en régime transitoire, incluant la conduction, la convection et le rayonnement (sous-section 2.2), et détermine les températures de l'air intérieur et les températures de surfaces des nœuds du modèle pour chacun des pas de temps (Duport 2021).

Le rayonnement en ondes longues reçu par les capteurs depuis les surfaces intérieures est calculé à partir des facteurs de vue, de la température, et de l'émissivité de ces dernières. Il est ajouté au

rayonnement reçu depuis le ciel calculé précédemment pour obtenir l'irradiance totale des capteurs (W/m^2), qui est ensuite convertie en température moyenne radiante (T_{mr}). Elle est ensuite associée à la température de l'air (T_{int}) en tant que variables d'entrées pour le calcul de la température physiologique équivalente (PET), permettant d'évaluer le confort thermique (sous-section 2.3).

1.1. RAYONNEMENT DEPUIS LE CIEL VERS LA MAQUETTE NUMERIQUE (PRE-TRAITEMENT)

Le ciel est décomposé en 2000 tuiles d'angles solides équivalents (Beckers et Beckers 2012), et intégré dans le modèle géométrique importé dans le logiciel **Matlab**. Les facteurs de vue entre le ciel, les surfaces, et les capteurs, sont calculés séparément pour les ondes courtes et pour les ondes longues à partir de l'algorithme de lancer de rayon **Embree**, en utilisant la méthode de calcul des facteurs de vue étendus développée par (Bugeat 2020). Les ondes courtes et les ondes longues sont considérées comme respectivement inférieures et supérieures à $4\mu m$ (Beckers 2016). À partir des propriétés radiatives de chaque surface (tableau 1), cette méthode permet de considérer un grand nombre de réflexions diffuses, de transmissions directes, et de réflexions spéculaires (considérées soit parfaitement diffuses, soit parfaitement spéculaires).

Surfaces		OC				OL	
		τ_s	τ_d	ρ_s	ρ_d	α	ϵ
Fenêtres	<i>Verre</i>	0,80	0	0,10	0	0,10	0,90
Façades extérieures	<i>Brique foraine</i>	0	0	0	0,15	0,85	0,92
Couverture	<i>Tuiles en terre cuite</i>	0	0	0	0,10	0,90	0,97
Sols	<i>Carrelage clair</i>	0	0	0	0,85	0,15	0,95
	<i>Carrelage sombre</i>	0	0	0	0,04	0,96	0,95
Revêtements intérieurs murs et plafonds	<i>Peinture blanche acrylique</i>	0	0	0	0,80	0,20	0,94
	<i>Peinture blanche faible ϵ</i>	0	0	0	0,80	0,20	0,67

Tableau 1 : Propriétés radiatives des surfaces : transmittance directe et diffuse (τ_s , τ_d), réflexion spéculaire et diffuse (ρ_s , ρ_d), absorptivité (α), émissivité (ϵ)

À partir des données météorologiques, les radiances des différentes tuiles du ciel sont calculées séparément pour les ondes courtes et pour les ondes longues à partir des distributions proposées respectivement par (Perez, Seals, et Michalsky 1993) et (Martin et Berdahl 1984). Le flux reçu par chaque surface du modèle depuis le ciel est ensuite calculé à partir de l'équation (1).

$$E_i = \sum_{j=1}^N F_{ij} B_j \quad (1)$$

E_i est le flux reçu par unité de surface (W/m^2), F_{ij} le facteur de vue entre la face i et j , et B_j la radiativité de la face j (W/m^2). Pour modéliser le rayonnement reçu des capteurs, ces derniers sont décomposés en de minuscules surfaces orientées (figure 2) qui voient leur environnement mais qui ne sont pas vues. C'est-à-dire qu'elles reçoivent le rayonnement sans interagir, émettre, réfléchir, transmettre ni absorber ce dernier, n'influençant pas sa distribution.

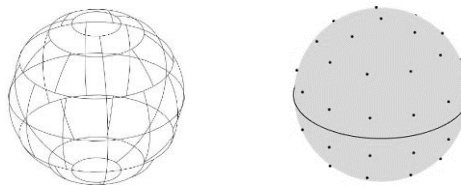


Figure 2 : Représentation d'un thermomètre à globe noir.

A gauche : Décomposition en 50 surfaces à angles solides équivalents.

A droite : Représentations des 50 points "capteurs" au centre de chaque face

1.2. CALCUL THERMIQUE PAR LA METHODE DES ELEMENTS FINIS

1.2.1. Conduction

La conduction au niveau des matériaux est résolue par la méthode des éléments finis. Les conditions limites sont imposées par les flux convectifs et radiatifs au niveau des surfaces intérieures et extérieures. Les propriétés des matériaux sont définies ci-après (tableau 2). La température du sol est fixée à 15°C à une profondeur de 2m.

Matériaux		Ep (m)	λ (W/m.K)	Cp (J/kg.K)	ρ (kg/m ³)
Plafond	Tuiles	0,015	1,0	800	1700
	Isolant laine de verre	0,20	0,04	840	30
	Plâtre	0,013	0,25	1008	825
Menuiseries	Double vitrage	0,006	0,009	750	2500
Murs	Brique foraine	0,20	0,22	1000	700
	Isolant laine de verre	0,10	0,040	840	30
	Plâtre	0,013	0,25	1008	825
Sol	Carrelage	0,02	2,91	1000	2800
	Chape béton	0,05	2,1	840	2400
	Polyuréthane	0,10	0,022	1450	14
	Dalle béton	0,20	2,1	840	2400
Refend	Béton	0,15	2,1	840	2400

Tableau 2 : Propriétés des différents matériaux qui composent la maquette numérique

1.2.2. Convection

Les échanges convectifs intérieurs et extérieurs sont traités distinctement. Côté extérieur, un flux convectif est imposé à partir de la température de l'air extérieur issue des données météorologiques, de la température des nœuds de la surface extérieure au début du pas de résolution, et du coefficient de convection associé au sens du flux : 2,5 W/m².K pour un flux horizontal, 0,7 W/m².K pour un flux ascendant, et 5 W/m².K pour un flux descendant (CSTB 2012).

Côté intérieur, la température de l'air est laissée en évolution libre est calculée à chaque pas de temps. Un nœud conductif virtuel est modélisé au centre de la pièce, à partir duquel des éléments pyramidaux à cinq nœud sont associés (Duport 2021). Le coefficient de convection associé au sens du flux est attribué comme précédemment à la face correspondant à la peau intérieure.

Un débit de renouvellement d'air correspondant à 61,87 m³/h (selon l'arrêté du 24 mars 1982 relatif à l'aération des logements) est adopté pour prendre en compte le flux correspondant au renouvellement d'air. Cet échange thermique avec l'extérieur est calculé à partir de l'équation (2), proportionnellement à la différence de température entre l'air intérieur et l'air extérieur (Duport 2021).

$$\phi_v = (V_i \cdot \rho_{air} \cdot c_{p,air}) \cdot \Delta T_{ext-int} \quad (2)$$

ϕ_v est le flux thermiques lié au renouvellement d'air (W/m²), V_i est le débit de renouvellement d'air (m³/h), ρ_{air} est la masse volumique de l'air (kg/m³), $c_{p,air}$ est la capacité thermique massique de l'air (J/kg.K), $\Delta T_{ext-int}$ est la différence de température entre l'air intérieur et extérieur (K).

1.2.3. Grandes longueurs d'ondes (GLO)

La méthode de résolution des échanges par rayonnement intégrée dans Cast3m a été modifiée. L'algorithme de Gauss-Seidel a été remplacé par l'algorithme de Jacobi, qui approxime la radiosité comme étant égale à l'émission (Duport 2021). De plus, le calcul des facteurs de vue est externalisé pour utiliser la méthode de radiosité décrite précédemment (Bugeat 2020). L'avantage principal réside dans la modélisation d'un très grand nombre de réflexions diffuses et spéculaires à l'intérieur du logement.

1.3. TEMPERATURE PHYSIOLOGIQUE EQUIVALENTE (PET) (POST-TRAITEMENT)

L'évaluation du confort est réalisée à travers l'indicateur PET (Physiological Equivalent Temperature) introduit par (Höppe 1999). Basé sur la méthode de calcul à 3 nœuds MEMI, il est défini comme la température physiologique équivalente en un lieu donné (intérieur ou extérieur) et correspond à la température de l'air à laquelle, dans un environnement intérieur typique, l'équilibre du corps humain (métabolisme de travail 80 W d'activité légère, ajouté au métabolisme de base ; résistance thermique des vêtements 0,9 clo) est maintenu avec des températures centrales et cutanées égales à celles des conditions évaluées. Il est souvent utilisé dans l'évaluation du confort extérieur car il a la particularité de prendre en compte le spectre radiatif complet (ondes courtes et ondes longues) comme variables d'entrée. Il a été utilisé plus récemment dans l'évaluation des risques de surchauffes pour des conditions intérieures (Attia et al. 2023).

Dans les résultats présentés ci-après, seule la température de l'air et le rayonnement reçu par chacun des capteurs seront utilisées comme variables (les autres variables d'entrées sont considérées constantes). Le rayonnement total reçu par les capteurs est d'abord converti en T_{mr} (K), définie par (ANSI/ASHRAE 2004) comme « la température d'une enceinte noire uniforme dans laquelle un corps solide ou un occupant échangerait la même quantité de chaleur radiante que dans l'environnement existant » à partir de l'équation (3).

$$T_{mr} = \sqrt[4]{\frac{\Phi_r}{\sigma \varepsilon_{g,ol}}} \quad (3)$$

T_{mr} est la température moyenne radiante (K), Φ_r est le flux radiatif reçu par le capteur (W), σ est la constante de Stefan-Boltzmann ($5,670 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$), $\varepsilon_{g,ol}$ est l'émissivité du globe noir, considéré comme un corps noir (égale à 1). La température moyenne radiante est ensuite intégrée dans les équations (4) et (5) utilisées lors du calcul du PET.

$$S_{skin} = \frac{A_{r,eff}(1-f_{a,cl}) \varepsilon_{skin} \sigma (T_{mr}^4 - T_{skin}^4)}{A_{dubois}} \quad S_{clo} = \frac{f_{eff} a_{clo} \varepsilon_{clo} \sigma (T_{mr}^4 - T_{clo}^4)}{A_{dubois}} \quad (4) (5)$$

S_{skin} S_{clo} sont respectivement l'astreinte thermique due au rayonnement de la peau et des vêtements (W/m^2), $A_{r,eff}$ est l'aire effective d'échange radiant (m^2), $f_{a,cl}$ est le facteur d'habillement (SU), ε_{skin} , ε_{clo} sont respectivement l'émissivité de la peau et des vêtements (SU), T_{skin} , T_{clo} sont respectivement la température de la peau et des vêtements (K), et A_{dubois} est l'aire du sujet (m^2).

Les asymétries de rayonnement reçu par les capteurs amènent à une répartition spatiale du confort. Une interpolation linéaire des valeurs calculées sur chacun des capteurs est proposée sur un plan à une hauteur de 1,10m.

RESULTATS

1.4. INFLUENCE DES COURTES LONGUEURS D'ONDES (CLO) SUR LA PET

La figure (3) représente la part des CLO sur l'irradiance totale des capteurs et son influence sur la température physiologique de confort le 17 août à 12h00. Deux cas distincts sont étudiés : le premier avec un carrelage blanc au sol et le second avec un carrelage noir. Les murs et plafonds sont peints en blanc dans les deux cas. La température intérieure est laissée en évolution libre au cours de la simulation. A 12h00, elle atteint 33,13°C pour le premier cas, et 33,23°C pour le deuxième cas. Les variations de PET présentées ci-après sont donc majoritairement impactées par l'irradiance des capteurs.

Dans le cas du sol blanc, la part d'irradiance en CLO des capteurs représente en moyenne 9,08 % de l'irradiance totale (soit 49,96 W/m² sur 550,40 W/m²). Elle induit une augmentation moyenne de la PET de 3,87 K, pour des valeurs comprises entre 2,06 K et 13,04 K. Elles sont moins élevées au fond de la pièce car les inter-réflexions du rayonnement provenant des fenêtres sont progressivement absorbées par les surfaces, et sont très élevées aux abords des fenêtres car reçoivent du rayonnement direct.

Dans le cas d'un carrelage noir (absorptivité $\alpha = 0,96$), la majorité des CLO est absorbée dès la première réflexion au niveau du sol, ce qui réduit le nombre d'inter-réflexions dans le reste de la pièce. La part d'irradiance en CLO sur l'irradiance totale des capteurs représente alors seulement 3,34 % (soit 17,25 W/m² sur 511,51 W/m²). L'irradiance en GLO est également plus faible dans le cas du sol noir par rapport à celui du sol blanc (différence moyenne de 6,17 W/m²). En effet, le rayonnement global émis par les parois est plus faible car les murs et plafonds ont absorbé moins de rayonnement issu des réflexions (contrairement au sol qui absorbe davantage de rayonnement). Les PET calculées varient alors entre 0,34 K et 9,77 K, pour une moyenne de 1,35 K.

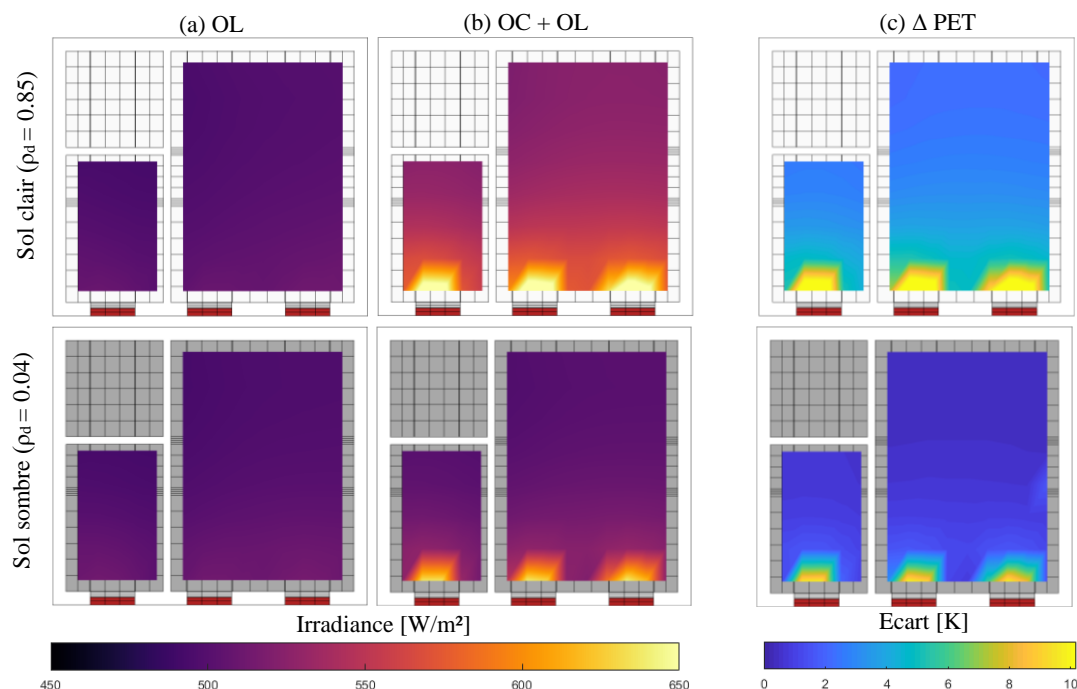


Figure 3 : (a) Irradiance en GLO reçue par les capteurs ; (b) Irradiance en GLO+CLO reçue par les capteurs ; (c) Différence de Température Physiologique Equivalente (PET) causée par la prise en compte des CLO ((b)-(a))

1.5. INFLUENCE DES GRANDES LONGUEURS D'ONDES (GLO) SUR LA PET

Pour la suite de l'analyse, les vitrages sont considérés opaques aux CLO. Les GLO sont donc les seules à influencer le calcul de la PET. La figure (4) représente les PET de 2 scénarios distincts à 12h00 : le cas (1) considère l'ensemble des murs et plafonds recouverts d'une peinture acrylique blanche ($\varepsilon = 0,94$), et le cas (2) reprend ces mêmes hypothèses mais considère une peinture à faible émissivité ($\varepsilon = 0,67$) au niveau du mur de refend intérieur. Les températures de surface et de l'air sont ensuite calculées à partir de ces hypothèses.

Pour les cas (1) et (2), la répartition du PET est homogène dans l'espace avec des écarts respectifs de 0,93 K, et 1,63 K (correspondants à des moyennes de 30,62°C, et 33,94°C). La PET est plus élevée dans le cas (2) car une émissivité (et donc absorptivité) plus faible au niveau du refend engendre une réduction du rayonnement déchargé par les autres faces intérieures, qui montent alors davantage en température que dans le cas (1). Les échanges par rayonnement avec les capteurs sont plus importants, de même que les échanges convectifs avec l'air ambiant.

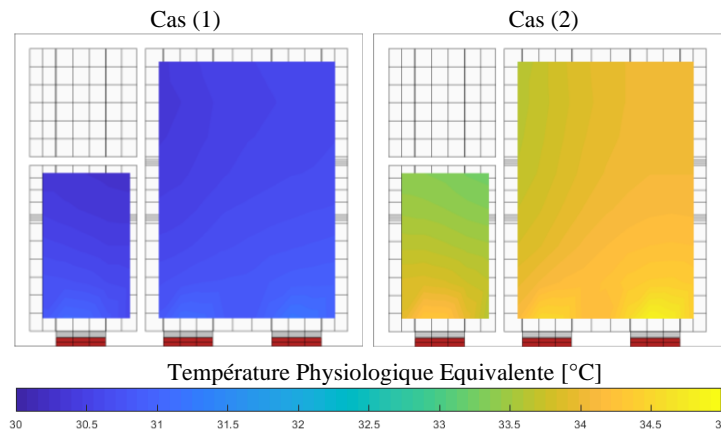


Figure 4 : Températures physiologique équivalente (°C) pour deux scénarios différents

CONCLUSION

Ce travail approfondit la compréhension de l'influence du rayonnement, en ondes courtes comme en ondes longues, sur le confort thermique intérieur. Il montre comment les propriétés radiatives des revêtements intérieurs affectent la distribution du rayonnement et le calcul du PET. Dans les conditions fixées par cette étude, la présence au sol d'un carrelage blanc a augmenté le nombre d'inter-réflexions du rayonnement intérieur en ondes courtes, ce qui a augmenté la PET moyenne de 2,52°C par rapport à un carrelage noir. En ondes longues, l'application d'une peinture blanche à faible émissivité sur le mur de refend intérieur à la place d'une peinture blanche acrylique a limité la décharge par rayonnement des murs extérieurs vers le mur de refend, ce qui a induit à une augmentation de la PET de 3,32°C.

Des modélisations complémentaires sont cependant utiles pour évaluer le comportement de différents revêtements intérieurs face au rayonnement en fonction de paramètres additionnels, notamment leur diffusivité et leur effusivité. En outre, (Aviv et al. 2022) précisent qu'un environnement à émissivité hétérogène peut influencer directement la T_{mr} dans le cas où les températures de surfaces des parois sont aussi différentes.

De plus, la modélisation géométrique des températures de surface ajoute la possibilité de calibrer et de vérifier les simulations avec des mesures spatiales via une caméra thermique, autorisant une analyse spatiale des températures de surface.

REFERENCES

- ANSI/ASHRAE. 2004. « Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy ». <https://www.ashrae.org/technical-resources/bookstore/standard-55-thermal-environmental-condition>.
- Attia, Shady, Caroline Benzidane, Ramin Rahif, Deepak Amaripadath, Mohamed Hamdy, Peter Holzer, Annkatrin Koch, et al. 2023. « Overheating Calculation Methods, Criteria, and Indicators in European Regulation for Residential Buildings ». *Energy and Buildings*, mai, 113170. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113170>.
- Aviv, Dorit, Julie Gros, Hayder Alsaad, Eric Teitelbaum, Conrad Voelker, Jovan Pantelic, et Forrest Meggers. 2022. « A data-driven ray tracing simulation for mean radiant temperature and spatial variations in the indoor radiant field with experimental validation ». *Energy and Buildings* 254 (janvier): 111585. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111585>.
- Beckers, Benoit. 2016. « Multiscale Analysis as a Central Component of Urban Physics Modeling ». In , 41:pp 1-27. https://doi.org/10.1007/978-3-319-27996-1_1.
- Beckers, Benoit, et Pierre Beckers. 2012. « A general rule for disk and hemisphere partition into equal-area cells ». *Computational Geometry* 45 (7): 275-83. <https://doi.org/10.1016/j.comgeo.2012.01.011>.
- Bugeat, Antoine. 2020. « Développement d'une méthode de radiosité pour l'étude du rayonnement solaire en milieu urbain ». These de doctorat, Pau. <https://www.theses.fr/2020PAUU3032>.
- CSTB. 2012. « CSTB (Centre Scientifique et Technique du Bâtiment), Règles Th-U Fascicule 4: Parois Opaques, CSTB Editions, 2012. »
- Duport, Nicolas. 2021. « Études thermiques urbaines à différentes échelles par éléments finis ». Phdthesis, Université de Pau et des Pays de l'Adour. <https://theses.hal.science/tel-03520505>.
- Höppe, P. 1999. « The Physiological Equivalent Temperature - a Universal Index for the Biometeorological Assessment of the Thermal Environment ». *International Journal of Biometeorology* 43 (2): 71-75. <https://doi.org/10.1007/s004840050118>.
- Martin, Marlo, et Paul Berdahl. 1984. « Summary of results from the spectral and angular sky radiation measurement program ». *Solar Energy* 33 (3): 241-52. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(84\)90155-5](https://doi.org/10.1016/0038-092X(84)90155-5).
- Perez, R., R. Seals, et J. Michalsky. 1993. « All-weather model for sky luminance distribution—Preliminary configuration and validation ». *Solar Energy* 50 (3): 235-45. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(93\)90017-I](https://doi.org/10.1016/0038-092X(93)90017-I).
- Smid, M., S. Russo, A. C. Costa, C. Granell, et E. Pebesma. 2019. « Ranking European capitals by exposure to heat waves and cold waves ». *Urban Climate* 27 (mars): 388-402. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2018.12.010>.
- T.R. Oke. 1982. « The energetic basis of the urban heat island ». <https://doi.org/10.1002/qj.49710845502>.

Vers la sobriété énergétique des bâtiments tertiaires : influence de différents paramètres de gestion sur la consommation énergétique et le confort des écoles et bureaux en France

Antoine Leconte^{1*}, Jean-Gabriel Winkler², Ophélie Ouvrier-Bonnaz¹

¹ Univ. Grenoble Alpes, CEA, Liten, INES, 73375 Le Bourget-du-Lac, France

² WINK PANDO2, 46 – 48 Rue René Clair, 75018 Paris, France

*antoine.leconte@cea.fr

RESUME. Le parc de petits bâtiments tertiaires existants représente un potentiel significatif d'économie d'énergie en France. Une aide particulière doit être apportée pour que celui-ci puisse réduire sa consommation énergétique tout en améliorant la Qualité d'Air Intérieur comme l'exigent à juste titre les nouvelles réglementations. La première étape essentielle consiste à conduire les bâtiments vers plus de sobriété énergétique, bien souvent négligée. Ceci se fait en appliquant des régulations simples et efficaces de gestion de chauffage et de ventilation. Cette étude propose un modèle générique de bâtiment pour représenter bureaux et écoles. Les résultats du modèle estiment l'influence de différents paramètres de régulation sur le bilan énergétique de ces bâtiments dans de multiples conditions. On observe ainsi dans cet article que les facteurs d'efficacité énergétique sont importants et varient selon la qualité de l'enveloppe du bâtiment et du climat. Le cas particulier d'un bâtiment administratif montre qu'une simple amélioration du réglage de son circuit de chauffage permettrait d'économiser jusqu'à 40% d'énergie environ.

MOTS-CLÉS : Bâtiments tertiaires, Gestion Technique du Bâtiment, Sobriété énergétique.

ABSTRACT. The existing stock of small service sector buildings represents a significant potential for energy savings in France. Particular help is needed to ensure that these buildings reduce their energy consumption while improving the Indoor Air Quality that new regulations rightly require. The first essential step is to steer buildings towards greater energy sobriety, which is often overlooked. This is achieved by applying simple and effective heating and ventilation management controls. This study proposes a generic building model to represent offices and schools. The results of the model make it possible to estimate the influence of different control parameters on the energy balance under a wide range of conditions. This article shows that the energy efficiency factors are significant and depend on the quality of the building envelope and the climate. The specific case of an administration building in the western part of France shows that a simple improvement in the regulation of its heating circuit could save up to approximately 40% of energy.

KEYWORDS : Tertiary building, Building Automation and Control Systems, Energy sobriety.

1. CONTEXTE ET OBJECTIFS DE L'ETUDE

1.1. SITUATION ENERGETIQUE DU SECTEUR « PETIT TERTIAIRE »

Bien qu'en légère baisse depuis 2018, le parc de bâtiments tertiaires consomme encore de l'ordre de 200TWh d'après les données statistiques du (CEREN 2021) - soit environ un tiers des consommations énergétiques finales du secteur immobilier global. Le secteur tertiaire fait actuellement l'objet

d'incitations et contraintes pour la réduction de sa consommation énergétique. Le (Décret Tertiaire 2019) impose aux locataires et propriétaires de bâtiments tertiaires de plus de 1000m² une diminution gradée de leurs consommations énergétiques. En complément, le (Décret BACS 2020) imposera aux bâtiments du secteur tertiaire de plus de 70kW de s'équiper d'une « Gestion Technique du Bâtiment » performante à partir de 2027. Parmi les bâtiments du secteur tertiaire, les écoles et les bureaux ont une consommation significative, de l'ordre de 50TWh pour les premiers et de 24TWh pour les seconds, majoritairement liée au chauffage des locaux (CEREN 2021). Or la plupart de ces bâtiments ont des surfaces inférieures à 1000m² : 60% des écoles en France d'après (Demarcq 2020) et 82% des bureaux en ce qui concerne la région Auvergne-Rhône-Alpes (CERC 2022). Ils ne sont donc pas soumis aux contraintes réglementaires énergétiques présentées ci-dessus mais sont visés par une réglementation, renforcée récemment, sur la Qualité d'Air Intérieur (CEREMA 2023). Ces bâtiments sont principalement anciens et très souvent mal gérés, comme largement observé par les nombreux capteurs déployés par la société PANDO2 dans ce genre de bâtiments. La crise énergétique et l'augmentation des prix les rend ainsi particulièrement vulnérables. Il y a donc tout de même un besoin particulier pour ces bâtiments de réduire rapidement et drastiquement leur consommation d'énergie sans négliger l'amélioration du confort et de la Qualité d'Air Intérieur.

La première source d'économie d'énergie significative est d'améliorer la sobriété énergétique de ces bâtiments. La sobriété consiste à limiter autant que possible toutes les consommations superflues qui n'apporte aux utilisateurs aucun gain de confort, ni garantie sanitaire ni amélioration de productivité. Elle est une première étape nécessaire avant d'apporter des solutions d'efficacité qui minimise l'énergie nécessaire pour répondre aux besoins ainsi réduits.

Or cette sobriété est souvent très loin d'être approchée. La Figure 1 ci-dessous représente l'évolution de la température mesurée dans 4 pièces d'un bâtiment administratif ancien dans l'Ouest de la France entre le jeudi 21/01/2024 et le mercredi 31/01/2024. Certaines pièces sont chauffées à 22°C en permanence, y compris en l'absence d'occupant. D'autres voient leur température réduite la nuit et le weekend mais allant rarement en dessous des 20°C. Cela va dans le sens des observations faites dans l'étude de bâtiments universitaires Français par (Allab et al. 2017). La conclusion des auteurs est que dans ces conditions, la gestion automatique des besoins et des systèmes énergétiques est le levier le plus important et le plus efficace pour réduire la consommation tout en améliorant le confort des occupants.

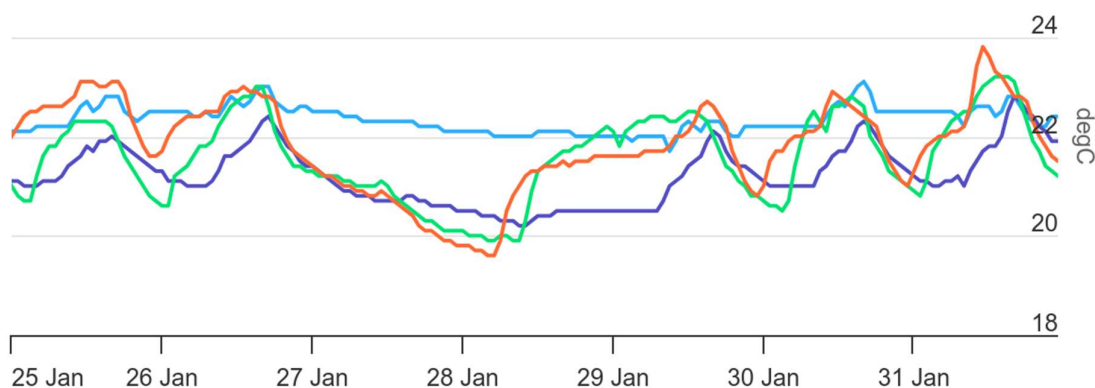


Figure 1 : Évolution de la température mesurée dans 4 pièces d'un bâtiment administratif ancien en janvier 2024

Ces bâtiments n'ont souvent pas la possibilité de faire installer facilement une GTB évoluée. Il est tout de même possible d'installer un monitoring complet QAI/confort/énergie permettant à la fois de respecter la réglementation, d'analyser le confort intérieur et de gérer des équipements simples et adaptés pour tendre vers la voie de la sobriété.

1.2. CHIFFRES GLOBAUX ET OUTILS POUR GUIDER LE SECTEUR EN AMONT

Des outils génériques, accessibles et fiables permettant d'estimer approximativement les économies d'énergie potentielles serait d'une grande aide pour guider les gestionnaires de ces bâtiments vers une première approche globale de ce genre. La norme (NF EN ISO 52120-1 2022), relative à la GTB, donne des estimations de gains énergétiques pour différents types de bâtiment. Le Tableau 1 ci-dessous relève pour les bureaux et écoles les rapports de consommation d'énergie thermique estimés entre différentes classes de GTB, la classe C étant la référence pour chaque bâtiment. Ces facteurs ont été calculés en se basant sur les résultats fournis par un grand nombre de simulations TRNSYS d'une pièce normalisée pour le climat de Würzburg en Allemagne. Ils donnent une première estimation globale de l'influence d'une amélioration de régulation du bâtiment mais sans les détails de chaque fonctionnalité et pour une situation spécifique. De plus, les hypothèses détaillées de ces calculs n'ont pu être retrouvées.

	D Faible efficacité énergétique	C Standard	B Avancée	A Perf. Ener. élevée
Bureaux	1.51	1	0.80	0.70
Bâtiments réservés à l'enseignement (écoles)	1.20	1	0.88	0.80

Tableau 1 : Facteurs d'efficacité de GTB globaux pour l'énergie thermique des bureaux et écoles d'après la norme ISO52120-1 :2021

L'étude présentée ici va plus loin. Elle fait une proposition de modèle générique sous TRNSYS (version 18.04) pour représenter les bâtiments de bureaux et écoles en France. L'objectif est de simuler différentes fonctionnalités de régulation du chauffage, de climatisation et de ventilation pour différents types d'enveloppe de bâtiments et différents climats. Les résultats génériques ainsi obtenus permettent d'estimer l'influence sur la température intérieure et les économies d'énergie réalisables par simple amélioration des différents postes de régulation.

2. METHODOLOGIE

2.1. ARCHITECTURE DE BATIMENT GENERIQUE

Les résultats attendus doivent être représentatifs d'une grande partie des écoles et des bureaux en France. Il n'est donc pas approprié de se baser sur une architecture spécifique d'un cas réel. En outre, de nombreuses combinaisons de paramètres peuvent potentiellement être évaluées. Le modèle construit est ainsi un compromis entre simplicité pour pouvoir réaliser de nombreux calculs rapides tout en ayant un niveau de détails suffisants pour prendre en compte les spécificités possibles de régulations comme le chauffage multizone par exemple. L'architecture retenue est représentée sur la Figure 2 ci-dessous. Elle est constituée de quatre zones chauffées (NO, NE, SO et SE) de 3m de hauteur ayant chacune une fenêtre de 8m² et d'une zone de dégagement central non chauffée. Pour simplifier les calculs et limiter le nombre de simulations dans cette première version d'outil numérique, les zones sont considérées sur

un même niveau. L'impact de la géométrie pourra être évaluée dans un deuxième temps en faisant varier la hauteur des murs par exemple. Chaque zone est représentée par un nœud thermique sur lequel sont considérés l'ensemble des flux convectifs et radiatifs échangés avec son environnement. Parmi ces flux sont considérés ceux liés aux renouvellement d'air. Mais aucun échange d'air entre zone n'est considéré. Contrairement au modèle de la norme ISO52120, toutes les interfaces entre le bâtiment et l'environnement extérieure sont considérées comme déperditives afin d'être représentatives d'un bâtiment dans son intégralité plutôt qu'un simple local.

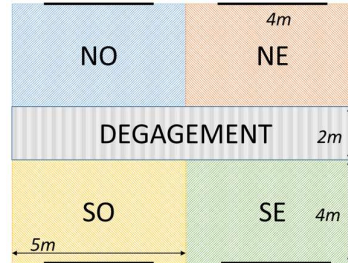


Figure 2 : Plan du bâtiment générique retenu et ses principales dimensions

2.2. HYPOTHESES GENERALES

Les données issues de la version 8 de Meteonorm, à partir des mesures des stations météorologiques « Paris-Montsouris », « Nantes » et « Nice » sont utilisées pour représenter les climats récents respectifs des zones H1, H2 et H3 telles que définies dans la Réglementation Environnementale 2020. La définition des parois opaques et vitrages s'appuie sur les « fiches typologies » des locaux de bureaux inférieurs à 1000m² éditées dans le cadre du programme PROFEEL (POUGET Consultants, Énergies Demain, et Benoit 2021). Après analyse de ces fiches, des compositions de paroi représentatives de 4 grandes périodes de constructions sont proposées (voir résumé Tableau 2). Par défaut d'informations similaires sur les écoles, les mêmes parois sont considérées pour ces dernières.

		AVANT 1946	1946-1974	1975-2000	APRES 2000
Mur	Cond. Th. Glob. [W/m ² /K]	3.60	0.99	0.58	0.36
Pl. bas	Cond. Th. Glob. [W/m ² /K]	9.99	6.91	0.64	0.44
Pl. haut	Cond. Th. Glob. [W/m ² /K]	6.02	8.78	0.75	0.42
Vitrages	Type et épaisseurs [mm]	Simple 6	Double 4/12/4	Double 4/12/4	Double 4/16/4
Perméabilité	Niveau d'étanchéité	Faible	Faible	Moyenne	Moyenne

Tableau 2 : Résumé des parois représentatives de 4 grandes périodes de construction

L'occupation de chaque zone chauffée suit les profils définis dans la norme ISO52120 pour les jours de la semaine. Les périodes de vacances scolaires sont considérées pour les écoles uniquement. L'influence de l'occupation sur la thermique du bâtiment dépend de l'occupation nominale et des différents gains internes définis dans le Tableau 3 ci-dessous.

	BUREAUX	ECOLES
Occupation nominale [m ² /p]	13.3	3.3
Chaleur présence [W/p]	64	64
Consommation électrique éclairage [W/m ²]	13	13
Consommation électrique spécifique [W/m ²]	10	4

Tableau 3 : Occupation et gains de chaleur internes des bureaux et écoles d'après la norme ISO52120

2.3. MODELISATION DES DIFFERENTS TYPES DE GESTION

Le profil de température de consigne en chauffage et rafraîchissement dépend de 4 paramètres :

- La température de consigne le jour et celle de réduit de nuit/week-end/vacances
- L'anticipation de relance (nombre d'heures avant l'arrivée des premiers occupants)
- La coupure ou non sur des périodes prolongées (week-end et vacances scolaires)

La ventilation mécanique semble plutôt rare dans ce type de bâtiment public existant. N'est considéré ici qu'un système de renouvellement d'air simple flux. Le débit d'air nominal de ventilation considéré est de 32m³/h/personne. Ce débit permettrait de maintenir un taux de concentration en CO₂ en dessous de 900ppm dans une classe de taille moyenne (Energie+ 2022). Quatre types de gestion de la ventilation sont pris en compte :

- Absence de système de ventilation : débit nul
- Ventilation non régulée : débit nominal en continu
- Ventilation alternée : débit nominal en présence des occupants seulement
- Ventilation modulée : débit proportionnel selon le nombre d'occupants

2.3.1. Autres gestions

Les stores et l'éclairage de chaque zone sont gérés selon l'éclairement lumineux arrivant sur chaque fenêtre en suivant les hypothèses de la RE2020 (cas « stores vénitiens » et « allumage/extinction automatique » respectivement). Les fenêtres sont fermées en permanence. Il n'y a pour le moment pas de prise en compte de modification possible de ces gestions.

2.4. SORTIES DE SIMULATION

Les simulations permettent de calculer le bilan énergétique final annuel du bâtiment générique dans les conditions sélectionnées. Parmi les composantes de ce bilan sont présentées dans cet article :

- QH et QC : les besoins de chauffage et de rafraîchissement
- W : la consommation électrique dont système de ventilation, éclairage et usages spécifiques

Le niveau de confort intérieur du bâtiment est estimé par l'approche simplifiée du confort adaptatif mais les résultats ne sont pas présentés dans cette étude par souci de simplicité.

3. RESULTATS

3.1. ANALYSE DES RESULTATS ABSOLUS

La première étape consiste à vérifier les résultats en absolu des simulations. Étant donné les objectifs génériques de cette étude et par manque de données mesurées concrètes pour le moment, il n'est pas possible de faire une validation rigoureuse du modèle mais il est tout de même possible d'évaluer le réalisme des résultats par comparaison avec les statistiques nationales de (Observatoire de l'Immobilier Durable 2017) et de (ADEME 2019) qui présentent des répartitions de consommation en énergie primaire des bureaux pour le premier organisme et des écoles pour le second.

Les statistiques étant données en énergie primaire, une estimation grossière est proposée ici uniquement pour cette comparaison. Cette estimation est faite en appliquant un coefficient de conversion globale « primaire/finale » pondéré par la répartition statistique nationale du type d'énergie finale des deux catégories de bâtiment, en considérant en outre un rendement annuel de 85% pour les chaudières gaz et fioul, un SEER (Coefficient d'efficacité frigorifique saisonnier) de 3 pour la climatisation et un facteur 2.3 pour l'électricité. L'étendue de ces estimations est représentée sur la Figure 4 par type et par âge de bâtiment. Les bandes horizontales représentent les différentes classes de DPE pour faciliter la comparaison avec les données références, notamment celles de l'Observatoire de l'Immobilier Durable (OID).

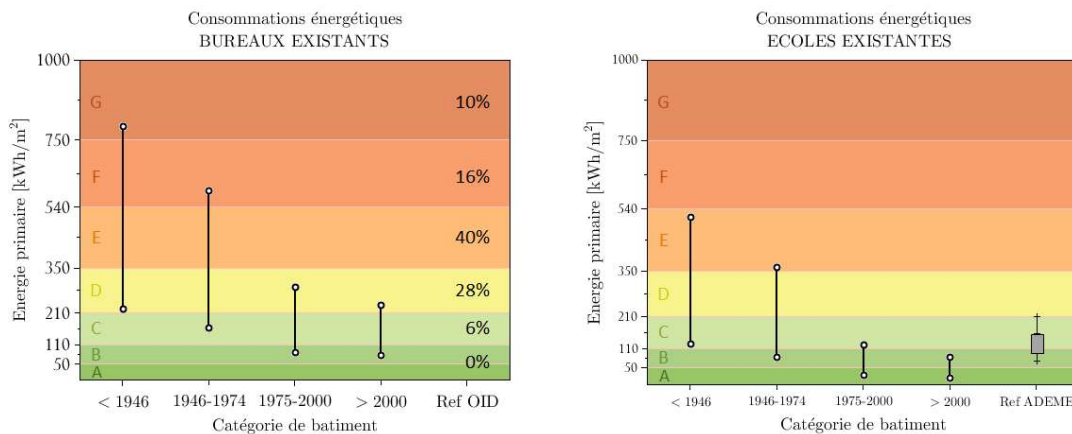


Figure 4 : Étendue des estimations d'énergies primaires consommées pour le bâtiment générique de bureau (à gauche) et d'école (à droite) et comparaison avec les données de référence

En l'absence d'information plus précise sur la proportion des différents types de gestion, il n'est pas possible de faire une comparaison stricte avec les proportions des statistiques nationales. On peut tout de même noter que l'étendue des consommations estimées des bureaux existants par le modèle générique est cohérente avec celle de l'OID : globalement de la classe C à G en termes de DPE. Les cas extrêmes des bâtiments d'écoles débordent plus largement des limites des statistiques de l'ADEME. Des hypothèses spécifiques aux écoles (architecture du bâtiment, enveloppe, électricité spécifique...) devraient être approfondies pour éventuellement améliorer la précision de ces résultats absolus.

3.2. ANALYSE DES RESULTATS RELATIFS

Pour réaliser une analyse globale des résultats relatifs d'amélioration de régulation, l'approche de la norme ISO52120 est appliquée pour cette étude : 4 classes de régulation sont définies (Tableau 4) et le

rapport entre l'énergie finale de la simulation par rapport à celle de la classe C est affiché sous forme de facteur d'efficacité (Tableau 5). Aucune ventilation n'est considérée pour les écoles : le changement de classe pour ce poste ne concerne que le cas des bureaux.

Classe		D	C	B	A
Ventilation		Continue	Continue	Selon présence	Proportionnelle
Chauffage	Consigne jour	22°C	22°C	21°C	20°C
	Consigne réduit	Ø°C	15°C	15°C	15°C
	Anticipation	Ø	2h	1h	1h
	Arrêts prolongés	Ø	Oui	Oui	Oui
Climatisation		Ø	Ø	Ø	Ø

Tableau 4 : Définition de 4 classes de régulation selon les paramètres de régulation de l'étude

Les facteurs d'efficacité sont du même ordre de grandeur que ceux affichés par la norme ISO52120 pour le cas des bureaux. La classe D a tout de même des facteurs plus grands pour les écoles du fait de considérer des périodes de vacances non chauffées à partir de la classe C. On remarque également qu'il y a bien une différenciation dans l'influence des régulations selon l'âge du bâtiment : les facteurs d'efficacité sont plus importants quand ils sont appliqués à des bâtiments anciens ; et lorsque les bâtiments sont récents, le climat a moins influence spécifique.

		BUREAUX				ECOLES			
		Avant 1946	1947-1974	1975-2000	Après 2000	Avant 1946	1947-1974	1975-2000	Après 2000
H1	D	1.43	1.39	1.31	1.25	1.70	1.66	1.66	1.54
	C	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
	B	0.85	0.83	0.77	0.74	0.92	0.91	0.89	0.87
	A	0.79	0.76	0.69	0.65	0.89	0.87	0.84	0.80
H2	D	1.46	1.41	1.33	1.26	1.75	1.71	1.65	1.60
	C	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
	B	0.84	0.82	0.75	0.72	0.92	0.90	0.87	0.85
	A	0.78	0.75	0.66	0.63	0.88	0.85	0.82	0.77
H3	D	1.57	1.48	1.35	1.25	2.01	1.96	1.86	1.66
	C	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
	B	0.81	0.81	0.75	0.73	0.89	0.88	0.81	0.80
	A	0.75	0.72	0.66	0.64	0.85	0.82	0.73	0.69

Tableau 5 : Facteurs d'efficacité de régulation estimés pour l'énergie finale des bureaux et écoles selon le climat et l'âge du bâtiment

3.3. ANALYSE SPECIFIQUE DE CAS D'UN BATIMENT DE BUREAUX EN H2

Le cas du bâtiment présenté en introduction (voir Figure 1) est utilisé ici pour illustrer une analyse spécifique. On considère comme situation initiale de référence un bâtiment de bureaux des années 50 en zone H2, sans ventilation et chauffé en permanence à 22°C. Différentes variantes de gestion améliorée de chauffage sont présentées dans le Tableau 6, introduisant des températures de consigne réduites en l'absence des occupants et différents niveaux de températures de consigne. Ainsi estime-t-on en première approche grâce aux résultats du modèle qu'une gestion plus rigoureuse du chauffage pourrait permettre d'économiser jusqu'à 43% d'énergie finale selon le niveau de température de consigne considéré.

Configuration	Initiale	Regul#3	Regul#2	Regul#1	
Ventilation	Ø	Ø	Ø	Ø	
Chauffage	Consigne jour	22°C	22°C	21°C	20°C
	Consigne réduit	Ø°C	16°C	15°C	14°C
	Anticipation	Ø	2h	2h	2h
	Arrêts prolongés	Ø	Oui	Oui	Oui
Climatisation	Ø	Ø	Ø	Ø	
Energie finale totale	454kWh/m ²	328kWh/m ²	293kWh/m ²	260kWh/m ²	
Economie d'énergie	-	28%	35%	43%	

Tableau 6 : Paramètres des configurations de régulation considérées pour le bâtiment de bureaux des années 50 en zone H2 et estimation des réductions de consommation d'énergie finale

4. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Le parc de petits bâtiments tertiaires existants de type « bureau » et « école » représente un potentiel significatif d'économie d'énergie en France. Un soutien particulier doit être apportée pour que celui-ci puisse réduire sa consommation énergétique en capitalisant sur la réglementation relative à la gestion de la QAI imposée à juste titre par les nouvelles réglementations. La première étape essentielle consiste à conduire les bâtiments vers davantage de sobriété énergétique, bien souvent négligée. Or en réduisant autant que possible toutes les consommations énergétiques superflues, les gains peuvent être significatifs. Les solutions techniques à mettre en place pour cela nécessitant souvent un faible investissement économique, l'amortissement rapide peut ainsi être un levier intéressant pour débiter un programme complet de réduction des consommations énergétiques, incluant à terme des solutions d'efficacité énergétique.

Un outil proposant de manière à la fois rapide et fiable des estimations des gains énergétiques apportées par ces solutions de sobriété permettrait d'aider la prise d'initiatives dans cette démarche en phase amont. Cette étude propose un modèle générique de bâtiment pour représenter les bureaux et écoles. Les estimations de consommation énergétique ainsi obtenues sont dans les mêmes ordres de grandeur que les statistiques nationales, notamment pour les bureaux. Les résultats du modèle permettent d'estimer l'influence de différents paramètres de régulation sur le bilan énergétique et la température intérieure dans de nombreuses conditions.

Le modèle peut être davantage amélioré, notamment dans le cas des écoles. Pour cela, d'autres hypothèses plus spécifiques peuvent être testées comme celles de (Nguyen 2021) pour les enveloppes et la consommation d'électricité spécifique. L'influence de la qualité de gestion de l'éclairage et des protections solaires peut également être pris en compte. La société PANDO2, qui monitore déjà les ambiances intérieures de ce genre de bâtiment, prévoit de mesurer leur bilan énergétique. Les données ainsi obtenues permettront de valider d'avantage le modèle et d'y proposer des corrections.

Les résultats du modèle permettront d'aider PANDO2 dans sa démarche globale de soutien aux gestionnaires de petits bâtiments tertiaires qui peuvent ainsi profiter simplement des contraintes réglementaires sur la QAI (par les mesures CO₂) pour vérifier en même temps la sobriété énergétique du bâtiment (par les mesures de températures) pour finalement réduire la consommation énergétique des bâtiments en améliorant les régulations des différents postes CVC de manière appropriée.

5. BIBLIOGRAPHIE

- ADEME. 2019. « Dépenses énergétiques des collectivités locales ».
- Allab, Yacine, Margot Pellegrino, Xiaofeng Guo, Elyes Nefzaoui, et Andrea Kindinis. 2017. « Energy and comfort assessment in educational building: Case study in a French university campus ». *Energy and Buildings* 143 (mai): 202-19. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.11.028>.
- CERC. 2022. « Connaissance et stratégie de rénovation du parc tertiaire d’Auvergne-Rhône-Alpes ». ADEME.
- CEREMA. 2023. « Guide d’accompagnement à la mise en œuvre de la surveillance réglementaire de la qualité de l’air intérieur dans certains établissements recevant du public ». https://www.cerema.fr/system/files/documents/2023/03/guide_qai.pdf.
- CEREN. 2021. « Les publications du Ceren ». 2021. <https://www.ceren.fr/publications/les-publications-du-ceren/>.
- Décret BACS. 2020. *Décret n° 2020-887 du 20 juillet 2020 relatif au système d’automatisation et de contrôle des bâtiments non résidentiels et à la régulation automatique de la chaleur. 2020-887*.
- Décret Tertiaire. 2019. *Décret n° 2019-771 du 23 juillet 2019 relatif aux obligations d’actions de réduction de la consommation d’énergie finale dans des bâtiments à usage tertiaire. 2019-771*.
- Demarcq, François. 2020. « RAPPORT SUR LA RENOVATION ENERGETIQUE DES BATIMENTS SCOLAIRES ». 2019/26/CGE/SG. Conseil Général de l’Economie, de l’Industrie, de l’Energie et des Technologies. https://www.economie.gouv.fr/files/files/directions_services/cge/renovation-energetique-batiments.pdf.
- Energie+. 2022. « Choisir le système de ventilation dans les classes ». *Energie Plus Le Site* (blog). 30 janvier 2022. <https://energieplus-lesite.be/concevoir/ventilation/exemples-pour-des-locaux-specifiques66/choisir-le-systeme-de-ventilation-dans-les-classes/>.
- NF EN ISO 52120-1. 2022. « Performance énergétique des bâtiments — Contribution de l’automatisation, de la régulation et de la gestion techniques des bâtiments — Partie 1 : Cadre général et procédures ». AFNOR.
- Nguyen, Alexandre Huu Tam. 2021. « Modélisation du parc de bâtiments du secteur tertiaire et simulation énergétique ». These de doctorat, Université Paris sciences et lettres. <https://www.theses.fr/2021UPSLM005>.
- Observatoire de l’Immobilier Durable. 2017. « Baromètre de la performance énergétique et environnementale des bâtiments tertiaires ». https://resources.taloen.fr/resources/documents/5055_OID_Barometre_performance_energetique_batiments_tertiaires_2017.pdf.
- POUGET Consultants, Énergies Demain, et Philippe Benoit. 2021. « Arborescence des fiches typologie de Petites Unités Tertiaires ». Agence Qualité Construction.

Appliance Level Coordination through Nudges to Improve Self-Consumption in a Energy Community

Haicheng Ling^{1,2,*}, Pierre-Yves Massé¹, Thibault Rihet¹, Frédéric Wurtz²

¹Enogrid 2, square Roger Geni, Grenoble

²Université Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP, G2Elab, Grenoble

*haicheng@enogrid.com

RÉSUMÉ. Nous essayons de maximiser l'autoconsommation d'une communauté énergétique dotée de panneaux solaires. Nous étendons le pipeline de recommandations introduit dans (Ling et al., 2024). Le pipeline commence par prévoir les périodes avec du surplus de production, puis indique ces périodes de manière sélective aux membres de la communauté, pour les encourager à consommer de l'énergie pendant celles-ci. La logique de notification est gouvernée par un module "coordinateur". Dans (Ling et al., 2024), le coordinateur estime la flexibilité au niveau des logements entiers. Dans notre travail, nous le faisons au niveau des appareils électriques individuels, ce qui offre un niveau de contrôle plus fin. L'efficacité de notre approche est évaluée par des simulations numériques utilisant des données semi-réelles dérivées de jeux de données de consommation publics. Les résultats indiquent que notre coordinateur (au niveau des appareils) surpasse la stratégie naïve qui notifie tous les membres à propos de toutes les périodes propices à la consommation. Il surpasse également le coordinateur opérant au niveau des logements lorsque un nombre arbitraire de notifications peut être envoyé à chaque logement. Cependant, ce n'est plus le cas lorsque les notifications sont limitées en nombre. Nos résultats suggèrent que, pour tirer avantage du coordinateur travaillant au niveau des appareils individuels, ceux-ci devraient être dotés de dispositifs domotiques capables de les activer à la réception d'un signal.

MOTS-CLÉS. communauté d'énergie renouvelable, nudges, coordination, optimisation du système énergétique, system autoconsommation

ABSTRACT. We try to maximise the self-consumption of an energy community endowed with solar panels. We extend the nudging pipeline introduced in (Ling et al., 2024). The pipeline first forecasts periods of available excess production, then selectively notifies the households of the community about these periods, to encourage them to consume energy during these periods. The notification logic is performed by a coordinator module. In (Ling et al., 2024), the coordinator estimates flexibility at household level. In our work, we do it at appliance level, which offers a finer level of control. The efficiency of our approach is assessed through numerical simulations using semi-real data derived from public consumption datasets. Results indicate that our appliance-level coordinator outperforms the naive strategy which notifies all members about all consumption favourable periods. It also outperforms the corresponding household-level coordinator when any number of notifications may be sent. However, this is no longer the case when the notifications are restricted in numbers. Our results suggest that, to take advantage of the coordinator working at appliance level, appliances should be endowed with automated devices able to activate them upon reception of a signal.

KEYWORDS. renewable energy community, nudges, coordination, energy system optimization, energy self-consumption

1. INTRODUCTION

Improving the energy consumption of buildings is important, both from an economical standpoint, and from an ecological one. Indeed, buildings are estimated to represent as much as 38%

of green house gases emissions (United Nations Environment Programme, 2020). One possibility in this regard is endowing the building with solar panels, using for instance available space on the roof. This way, some part of the energy consumption may be drawn from the panels, rather than from the regular network, which energy may derive from less ecologically friendly sources.

In addition to individual buildings having solar panels for their own consumption, and ever increasing trope is now for several buildings to gather into an energy community, and share the energy produced by the panels. This is made possible by legislation (European Commission, 2019). In France, this type of energy communities is called an “autoconsommation collective” (collective self-consumption) (Légifrance, 2023).

Now, to truly benefit from the panels, one may overcome two issues. The first is the intermittence of production (as the panels will only produce under daylight). The second is the necessity to coordinate with other members of the community. Indeed, if everybody consumes energy at the same time, the capacity of the panels may be outgrown, and the excess demand will be atoned for by the regular network.

In (Ling et al., 2024), the authors introduced a nudging system which aimed at helping members of a collective self-consumption operation consume energy at appropriate moments. The system first predicted periods where users should be encouraged to consume (so called “green periods”). These periods were then selectively notified to the users in the form of nudges, through a coordinator module, which in particular aimed at avoiding having everybody consume during the same periods.

This coordinator module was based on a household level estimation of the flexibility available, that is the sum of the power of the appliances the members of the household are willing to use at different times than they first intended. However, this estimation of the flexibility was quite coarse. Here, we present a finer coordinator, which works at appliance level, and estimates flexibility on an appliance basis. It notifies households about which shiftable appliance it suggests to use during which green period. Through the finer coordination it offers, it enables a more precise allocation of solar power and enhances further the efficiency of energy consumption across the network.

We first discuss related works (Section 2.), before presenting our model (Section 3.). Then we present our experimental results (Section 4.). Finally, we conclude, and discuss our results (Section 5.).

2. RELATED WORKS

Power systems are evolving with an increased integration of renewable energy sources (Tang et al., 2022). This brings challenges related to the variability of power supply. To address these, (Nosair and Bouffard, 2015) emphasize the importance of assessing the potential for operational flexibility of individual power system assets. To take full advantage of energy system flexibility, some works focus on single buildings. (Azizi et al., 2021) present a novel unsupervised non-intrusive load monitoring (NILM¹) method to characterize the energy flexibility of a single building by extracting the consumption pattern of shiftable appliances via analyzing the active and reactive power. (Aslam et al., 2020) develop an effective energy management

1. Non-Intrusive Load Monitoring (NILM) is a technique used to disaggregate a building’s total energy consumption into individual appliance usage without the need for installing dedicated meters for each appliance, allowing for detailed energy analysis and efficiency improvements through a single monitoring point.

strategy using Mixed Integer Linear Programming (MILP²). This strategy is designed to optimally schedule smart appliances and the charging/discharging of electric vehicles (EVs) to reduce energy costs. It also incorporates an energy storage system (ESS) to enhance energy utilization efficiency. Other works apply directly to energy communities. (Contreras-Ocaña et al., 2021) assess the financial viability of an energy community inspired by the French collective self-consumption setting. (Zuazo et al., 2021) emphasize the need for quality load forecasting of building consumption, in order to enable load management, with the eventual aim of maximizing collective self-consumption. (Ling et al., 2024) introduce a coordination strategy within a nudging pipeline to select which household within the collective self-consumption should consume when there is excess production. The coordination strategy showed a maximum of 18% improvement in the self-consumption rate in a simulation environment, utilizing semi-real data supplemented by available real-world information.

Achieving high user engagement is crucial for the successful adoption and active participation in renewable energy initiatives and collective consumption efforts. Effective engagement methods are essential for the success of collective energy projects, promoting energy justice and democracy (Shortall et al., 2022), yet challenges such as administrative complexity and time constraints can hinder user involvement (Aydin et al., 2018). Nudging, the technique of encouraging behavior change in a non-mandatory way (Thaler and Sunstein, 2008), is considered promising for increasing user engagement in energy conservation. It has been shown to boost solar energy adoption (Neumann et al., 2023) and help reduce consumption during peak demand times (Salman Shadid et al., 2020).

3. MODEL

We use the same framework introduced in (Ling et al., 2024), in which we introduce a new coordinator. This coordinator works at appliance level, while that in (Ling et al., 2024) works at household level. We start by briefly presenting our model in Section 3.1. For more detailed and comprehensive insights, we refer readers to (Ling et al., 2024). Then, we introduce the appliance level coordinator in Section 3.2.

3.1. NUDGING PIPELINE

On Figure 1, we give an overview of our nudging pipeline. Our collective self-consumption framework integrates multiple households, several of which may possess solar panels. Each household has a smart meter, allowing for the collection of energy consumption and production data. There is no battery, thus making it impossible to store electricity for later use. Each household possesses several electrical appliances, which are categorized into shiftable and non-shiftable categories. Shiftable appliances refer to those which usage times the users are willing to adjust upon receiving a recommendations. Every shiftable appliance has a maximum shiftable delay : for instance, a washing-machine usage cannot be shifted to a time slot more than 9 hours (Table 1) from the original desired time slot.

This system obtains accurate weather forecasts via APIs, which inform the operation of two key control modules. The “Green Period Finder” module utilizes a statistical energy forecasting algorithm, as introduced by (Ling et al., 2023), to identify optimal usage times, called “green

2. Mixed Integer Linear Programming (MILP) is a mathematical optimization or decision-making method used in operations research. It involves finding the best solution from a set of possible solutions, based on given constraints. Several variables are integer, which makes it more complex to solve than standard linear programming approaches.

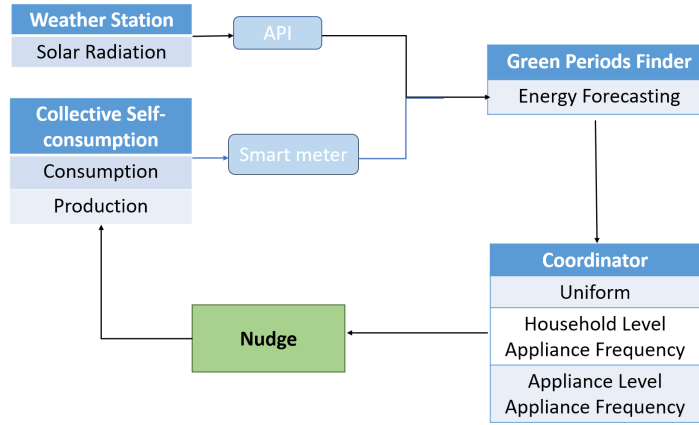


Figure 1 : Nudging pipeline

periods” (Ling et al., 2023), for electrical appliances, based on available data. The coordinator module then distributes these green periods among households according to rules aimed at maximizing environmental and efficiency benefits (maximizing the operation self-consumption rate). Finally, households adjust their shiftable energy usage in response to these nudges, optimizing consumption and contributing to the collective goal of sustainable energy use.

Tableau 1 : Shiftable appliances maximum shift delays (Lucas et al., 2019)

Shiftable appliance	Maximum shift delay
Washing machine and clothes dryer	540 min
Dish washer	540 min
Water heater for domestic hot water	600 min
Electric vehicle	336 min

3.2. COORDINATOR

Once we have identified green periods, we need to notify them to the households of the collective self-consumption operation. We call coordinator the module responsible for constructing the notifications : it decides which household it notifies about which green periods. The easiest type of coordinator is one that shares the best green periods with every household the same way. We call this the ”uniform coordinator,” as in (Ling et al., 2024).

For each household h and for each appliance k , write $\alpha^{h,k}$ the maximum power of appliance k within household h . Write $f^{h,k}$ the weekly usage frequency of appliance k in household h . If appliance k is activated every day of the week, then $f^{h,k} = 7/7 = 1$, and if it is not used at all during the week, then $f^{h,k} = 0/7 = 0$. We evaluate the maximum shiftable available power of appliance k of household h , $\hat{m}^{h,k}$, by weighting the maximum power by the frequency at which the appliance is used during the week. Therefore, we have

$$\hat{m}^{h,k} = \alpha^{h,k} f^{h,k}.$$

Estimating $\hat{m}^{h,k}$ relies on gathering data which is acquired through engaging with the members of the operation by conducting surveys, for instance. While collecting detailed information presents more challenges than acquiring basic data, our numerical simulations demonstrate that this approach can significantly enhance the coordination outcomes.

Then, in each green period, we match the forecast excess of the period with a combination of appliances which total shiftable power is as close as possible to this excess, in order to fully use the excess power available during it. The goal is to match the power of shiftable appliances as closely as possible to the excess power available. For instance, assume a green period is predicted to have 2000 Watts available during it. We could suggest to shift a single appliance requiring the full 2000 Watts or two appliances from the same or different households shifting 1000 Watts each, aiming for the most efficient use of flexibility across all households. The allocation of periods to the households, with information about the appliances concerned, is computed by the appliance frequency coordinator at appliance level, which we now define.

Definition 1 (Appliance Frequency Coordinator at Appliance Level) For each day d , let $e_1, \dots, e_{p_{d,\max}}$ be the forecast excess for the green periods of that day. For each day, let $x_{h,k,p}$ equal 1 if green period e_p is sent to household h for shifting appliance k , and 0 otherwise. The $x_{h,k,p}$'s solve the minimization problem :

$$\left\{ \begin{array}{l} \arg \min_{\mathbf{x}=\{x_{h,k,p_d}\}_{h,k,p_d}} \sum_{p_d=1}^{p_{d,\max}} \left| \sum_{h=1}^{h_{\max}} \sum_{k=1}^{k_{\max}} \hat{m}^{h,k} x_{h,k,p_d} - e_{p_d} \right|, \\ d = 1, \dots, 7, \\ \sum_{p_d=1}^{p_{d,\max}} x_{h,k,p_d} \leq 1, \quad 1 \leq h \leq h_{\max}, \quad 1 \leq k \leq k_{\max}, \quad d = 1, \dots, 7, \\ \sum_{d=1}^7 \sum_{p_d=1}^{p_{d,\max}} \sum_{k=1}^{k_{\max}} x_{h,k,p_d} \leq 4. \end{array} \right.$$

This differs from the appliance frequency coordinator in (Ling et al., 2024) in that the allocation variables also depend on the appliances (through the k index), while in (Ling et al., 2024), the allocation variables only depended on the households (and the green periods), leading to coarser information sent to the members of the operation. The shiftable power was estimated globally for each house, while we estimate it appliance by appliance.

A household may receive multiple green periods in one day, and several households can share the same green period. However, an appliance within a household is limited to one green period per day (first set of inequalities), and households are restricted to a maximum of four green period notifications each week to prevent user fatigue (second set of inequalities). If multiple appliances in a household are assigned the same green period, it counts as a single allocation. Solutions to assigning green periods may vary; in cases of identical outcomes, priority is given to solutions that spread green periods across a wider range of households. If a single solution still isn't achieved, a random selection is made from the remaining options.

4. NUMERICAL EXPERIMENTS

We first give a brief presentation for the simulation set-up (Section 4.1.). Then, we present the simulation results (Section 4.2.)

4.1. SET-UP

The simulation set-up is similar to the one in (Ling et al., 2024), and we only give some brief explanations here. We start by describing the datasets, real and synthetic, we use. Each dataset is used to model one collective self-consumption operation.

Consumption and production datasets preparation. For the consumption simulation, we use the same datasets as in (Ling et al., 2024) : the Iris dataset which was collected as part

of the REMODECE (Residential Monitoring to Decrease Energy Consumption) project (Ene, 2008), the IDEAL dataset (Pullinger et al., 2021), and a synthetic dataset, named Syn, which we generated based on some real consumption. For the Iris dataset, we selected the 10 houses with the most shiftable appliances (defined in Table 1). Then, we added an electric vehicle charging profile with random activation frequencies during the evening hours to enhance the flexibility potential. Likewise, for the IDEAL dataset, we selected the 12 households with the highest number of shiftable appliances. Additionally, we incorporated a water heater profile, programmed to activate in the evening at random frequencies. For the synthetic dataset, we used a non-shiftable base consumption pattern sourced from the Iris dataset. This pattern was then replicated across 13 households, with the addition of realistic shiftable appliances usage, randomly distributed to each household's, and thus constituting varied morning and evening routines, to reflex varied energy consumption behaviors.

For the production simulation, we employ the same Markov chain model used in the works (Ling et al., 2023) and (Ling et al., 2024). This model generates a synthetic production profile by considering the time of day, month of the year, and a random amount of cloud coverage.

Simulation. The simulations are performed on G2ELAB's computation server, which features 48 cores at 2.4GHz / 96 logical processors (threads), 256 GB of memory, and an Nvidia RTX6000 GPU with 24 GB of memory. The simulations are carried out by selecting data for a one-month period from the dataset. We make 50 runs for each simulation set-up, to adequately account for the stochastic nature of production generation, and average the results.

The input of the simulations includes essential parameters extracted from the datasets, such as maximum power and the frequency of appliances usages. These are additional information required by coordinators. To compute the green periods, we also need the historical consumption and production data for the houses, as well as future weather forecasts. The output of these simulations is the average self-consumption rate for the collective self-consumption operation, which depends on the coordinator used. We compare the self-consumption rate achieved by the appliance-level coordinator to the reference scenario, where there are no nudges (no shifts in consumption patterns), and also to the household-level coordinator from (Ling et al., 2024).

4.2. RESULTS

4.2.1. The Appliance Level Coordinator is Better than the Naive Household-Level Coordinator (Uniform Coordinator)

We start by conducting a basic sanity-check. We compare the performance of the appliance-level coordinator against both the reference case (no nudges) and the naive household-level coordinator, which sends the same best green periods to all households. We show the results in Table 2.

Tableau 2 : Average self consumption rate, efficiency of coordinators

Coordinator	Level	Syn Mean(%)	Iris Mean(%)	IDEAL Mean(%)
No	No	64.19	67.05	69.41
Uniform	Household	72.65	73.88	77.84
App Frequency	Appliance	74.5	82.9	86.83

Our results show the following.

- Both the household level uniform coordinator and the appliance-level coordinator improve the self-consumption rate compared to the reference case. Specifically, for the IDEAL dataset, the self-consumption rate increases from 69.41% to 77.84% with the Uniform Coordinator, and further to 86.83% with the Appliance Frequency Coordinator.
- The appliance-level coordinator consistently achieves superior enhancements in self-consumption rates across all datasets. Notably, there is an approximate 9% improvement in self-consumption when using the Appliance Frequency Coordinator at the appliance level compared to the Uniform Coordinator case for the IDEAL dataset. Across all datasets, the average self-consumption rate achieved by the Appliance Frequency Coordinator surpasses that of the Uniform Coordinator. The Appliance Frequency Coordinator utilizes more detailed information, while the Uniform Coordinator operates without any supplementary information. This indicates that the inclusion of precise, additional information significantly enhances the effectiveness of coordinators.

4.2.2. Optimal Performance of the Appliance-Level Coordinator Compared to the Household-Level One when Ignoring Human Comfort

We now compare the appliance frequency coordinator at appliance level to the appliance frequency coordinator at household level introduced in (Ling et al., 2024). Moreover, we eliminate the constraints on the number of the weekly notifications of green periods (see next section for results when the constraints are on). Note that sending too many notifications may lead to user fatigue. Table 3 presents the self-consumption rates achieved under this scenario. We see that, on both the Syn and the IDEAL datasets, the coordinator at the appliance level outperforms its analogue at the household level. However, this is not the case on the Iris dataset. Theoretically, we expect coordinators functioning at the appliance level to provide finer control than those at the household level, leading to improved self-consumption rates compared to household-level coordinators. However, this should be qualified by the uncertainty about appliance usages (we only have imperfect information about those). Coordinating at the appliance level amplifies regulation complexity, and when combined with uncertainty, it may reduce the accuracy of adjustments. However, considering the overall simulation results, the performance of appliance-level coordinators, without restrictions on the number of notifications, exceeds that of household-level coordinators, showing the interest of the approach.

Tableau 3 : Average self consumption rate, Appliance-Level Coordinators vs Household-Level Coordinators When Ignoring Human Comfort

Coordinator	Level	Syn Mean(%)	Iris Mean(%)	IDEAL Mean(%)
App Frequency	Appliance	78.85	84.62	89.46
	Household	77.74	84.93	88.1

4.2.3. Suboptimal Performance of Appliance-Level Coordinators Compared to Household-Level when Considering Human Comfort

We now turn back on the constraint limiting the number of notifications an household can receive each week, so as to prevent user fatigue. We show the results in Table 4. We see that the coordinator operating at the household level outperforms the one operating at the appliance level. At the household level, when a household receives a nudge, it will shift all shiftable appliances to the green periods indicated in the nudge. However, for the appliance-level coordina-

tor, a green period notification may be sent for only one appliance. Therefore, finer coordination at the appliance level may require a greater number of green period notifications within a single nudge to achieve the same quantity of shiftable power as household-level coordination. This suggests that the effectiveness of appliance-level coordination is inherently limited by the restriction on the number of green period notifications that can be issued, hindering its potential to enhance self-consumption rates effectively. On the other hand, one could resort to automated piloting of their appliances, so as to fully benefit from the finer control of the appliance level coordinator, while avoiding the user fatigue issue. We expand on this in the discussion.

Tableau 4 : Average self consumption rate, Appliance-Level Coordinators vs Household-Level Coordinators when Considering Human Comfort

Coordinator	Level	Syn Mean(%)	Iris Mean(%)	IDEAL Mean(%)
App Frequency	Appliance	74.5	82.9	86.83
	Household	75.73	84.78	87.17

5. CONCLUSION, DISCUSSION

In this study, we assessed the efficiency of our appliance-level coordinator, and in particular compared it to the analogue household-level coordinator from (Ling et al., 2024). We considered situations with constrained or not number of notifications sent to the user. We used semi-real data supplemented by available real-world information. Our results show the appliance level coordinator is superior to the household level naive strategy. They also show that, in scenarios where any number of notifications may be sent, the appliance level coordinator is in general better than the household-level one. However, in scenarios where human comfort is taken in to account through a limitation of the number of notifications that can be sent to households, the appliance level coordination strategy proves inferior to the household level one.

Therefore, our results suggest that, to fully benefit from the finer control allowed by the appliance level coordinator, one should equip their shiftable appliances with suitable devices, such as home automation technologies like domotics, able to activate the appliances upon reception of notifications from our pipeline. This automated approach, however, necessitates additional installations, like smart plugs or meters. While offering improved energy efficiency and convenience, this shift to automation involves higher initial costs for purchasing and installing these devices. Moreover, not every consumer might welcome the need for such technological upgrades, due to concerns over costs, complexity, ecology and privacy. To show the worth of the upfront investment required, and overcome additional consumer reluctance, a detailed cost-benefits analysis should be conducted, which is an interesting direction of future research.

Our aim is to deploy our solution in real-world settings. We identify two main challenges in that respect, one linked with actual customer behaviour, and the second linked with load forecasting. First, human behaviour is complex, and prone to unpredictability. While our simulations assume idealized compliance with suggested nudges, real-life conditions often reveal wide variances in individuals' responses. Additionally, the effectiveness of our models can be compromised when individuals adjust the settings of their shiftable appliances without notification (for instance, replacing their washing-machine with a new one, with different consumption profile, or adding a new equipment). Therefore, future research should estimate the "compliance" rate of users to nudges, and assess their overall willingness to cooperate efficiently with the scheme, accepting the (mainly time) costs entailed in order to best benefit from it. Second, our model relies on accurate forecasting of production, and consumer consumption. Despite the availability

of various models in the literature (Yang et al., 2016; Pappas et al., 2008; Fan et al., 2019), the accuracy of weather forecasts, especially over longer periods, remains a challenge. Prediction errors could misidentify green periods, resulting in suboptimal consumption shifts and possibly deterring consumers from further participating in the scheme. Using ensemble models, which combine multiple forecasts for a more reliable aggregated prediction, could address this concern (A.Lahouarab, 2015).

In our study, we have only focused on the self-consumption rate. However, several other aspects of the collective self-consumption system, including its economic, environmental, and integration (into existing power networks) challenges, should be assessed to get a full picture of the advantages, and drawbacks, entailed. While studying these aspects is beyond the scope of our work, let us point the interested reader to relevant literature. First, let us start with economic and environmental questions. (Canova et al., 2022) discuss the evaluation of energy, economic, and environmental impacts of a renewable energy-based collective self-consumption model for multi-family residential buildings in Italy, revealing cost savings of up to 32%, and potential carbon emissions reduction of 60%. (Reis et al., 2022) detail how collective self-consumption initiatives, utilizing metering systems and optimization strategies, can be implemented in multi-family buildings to improve energy management. Their study, based on a case in Coimbra, Portugal, using fixed-size photovoltaic and storage units, shows that even without integrating heat pumps, energy costs could be reduced by approximately 17%. As far as integration within the existing power networks is concerned, (Brouwer et al., 2014) outline the anticipated shift in the Organisation for Economic Co-operation and Development(OECD)(oec,) countries towards low-carbon electricity systems, focusing on the integration of Intermittent Renewable Energy Sources (IRES) such as wind and solar, along with thermal generators ; it discusses the need for increased flexibility in power systems to accommodate this shift, the impact of IRES on system stability and thermal generator efficiency, and the direct costs associated with reserve increases due to IRES integration. It highlights the need for a comprehensive power system model that includes novel flexibility technologies. (Kaushik et al., 2022) discuss the challenges that variable renewable energy (VRE) presents to power system operations, particularly as VRE penetration exceeds 80%. The authors highlight the need for long-term energy storage and flexibility, and conduct a detailed uncertainty analysis to ensure the stable functioning of power system networks with a high share of VRE. Finally, (Erdiwansyah et al., 2021) give a critical review about the challenges and potential solutions related to the IRES into power systems, emphasizing the importance of developing a matrix to categorize technological solutions, which could facilitate the reduction of challenges and enhance cost-effective energy integration.

ACKNOWLEDGMENTS

This work has been partially supported by the ANR project ANR-15-IDEX-02 through the eco-SESA project and the OTE - Observatory of Transition for Energy.

BIBLIOGRAPHIE

About the oecd. <https://www.oecd.org/about/>. Accessed : 2024-04-11.

(2008). Mesure de la consommation des usages domestiques de l’audiovisuel et de l’informatique. *Project REMODECE*.

A.Lahouarab, J. H. S. (2015). Day-ahead load forecast using random forest and expert input selection. *Energy Conversion and Management*, 103 :1040–1051.

Aslam, S., Khalid, A., and Javaid, N. (2020). Towards efficient energy management in smart

grids considering microgrids with day-ahead energy forecasting. *Electric Power Systems Research*, 182 :106232.

Aydin, E., Brounen, D., and Kok, N. (2018). Information provision and energy consumption : Evidence from a field experiment. *Energy Economics*, 71(C) :403–410.

Azizi, E., Ahmadihangar, R., Rosin, A., Martins, J., Lopes, R. A., Beheshti, M., and Bolouki, S. (2021). Residential energy flexibility characterization using non-intrusive load monitoring. *Sustainable Cities and Society*, 75 :103321.

Brouwer, A. S., van den Broek, M., Seebregts, A., and Faaij, A. (2014). Impacts of large-scale intermittent renewable energy sources on electricity systems, and how these can be modeled. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 33 :443–466.

Canova, A., Lazzaroni, P., Lorenti, G., Moraglio, F., Porcelli, A., and Repetto, M. (2022). Decarbonizing residential energy consumption under the italian collective self-consumption regulation. *Sustainable Cities and Society*, 87 :104196.

Contreras-Ocaña, J. E., Singh, A., Bésanger, Y., and Wurtz, F. (2021). Integrated planning of a solar/storage collective. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 12(1) :215–226.

Erdiwansyah, Mahidin, Husin, H., Nasaruddin, Zaki, M., and Muhibbuddin (2021). A critical review of the integration of renewable energy sources with various technologies. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 6(1) :1–18.

European Commission (2019). Energy communities. https://energy.ec.europa.eu/topics/markets-and-consumers/energy-communities_en. Accessed : [2024-01-25].

Fan, G.-F., Guo, Y.-H., Zheng, J.-M., and Hong, W.-C. (2019). Application of the weighted k-nearest neighbor algorithm for short-term load forecasting. *Energies*, 12(5).

Kaushik, E., Prakash, V., Mahela, O. P., Khan, B., El-Shahat, A., and Abdelaziz, A. Y. (2022). Comprehensive overview of power system flexibility during the scenario of high penetration of renewable energy in utility grid. *Energies*, 15(2).

Ling, H., Massé, P.-Y., Rihet, T., and Wurtz, F. (2023). Realistic nudging through ict pipelines to help improve energy self-consumption for management in energy communities. *Energies*, 16(13).

Ling, H., Massé, P.-Y., Rihet, T., and Wurtz, F. (2024). Improving Energy Consumption Coordination in Renewable Energy Communities through Nudging. *preprint*, <https://hal.science/hal-04481798>.

Lucas, A., Jansen, L. L., Andreadou, N., Kotsakis, E., and Masera, M. (2019). Load flexibility forecast for dr using non-intrusive load monitoring in the residential sector. *Energies*.

Légifrance (2023). Chapitre v : L’autoconsommation (articles l315-1 à l315-8). Code de l’énergie. Accessed : 2024-02.

Neumann, O., Gonin, A., Pfalzgraf, M., and Patt, A. (2023). Governments can nudge household solar energy adoption : Evidence from a field experiment in switzerland. *Energy Research & Social Science*, 105 :103293.

Nosair, H. and Bouffard, F. (2015). Flexibility envelopes for power system operational planning. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 6(3) :800–809.

Pappas, S., Ekonomou, L., Karamousantas, D., Chatzarakis, G., Katsikas, S., and Liatsis, P. (2008). Electricity demand loads modeling using autoregressive moving average (arma) models. *Energy*, 33(9) :1353–1360.

Pullinger, M., Kilgour, J., Goddard, N., Berliner, N., Webb, L., Dzikovska, M., Lovell, H., Mann, J., Sutton, C., Webb, J., and Zhong, M. (2021). The ideal household energy dataset, electricity, gas, contextual sensor data and survey data for 255 uk homes. *Scientific Data*, 8(1) :146.

- Reis, I. F., Gonçalves, I., Lopes, M. A., and Antunes, C. H. (2022). Collective self-consumption in multi-tenancy buildings—to what extent do consumers’ goals influence the energy system’s performance? *Sustainable Cities and Society*, 80 :103688.
- Salman Shadid, M., Delinchant, B., Wurtz, F., Llerena, D., and Roussillon, B. (2020). Designing and Experimenting Nudge Signals to Act on the Energy Signature of Households and Optimizing Building Network Interaction. In *IBPSA France 2020, November 2020, Reims, France*.
- Shortall, R., Mengolini, A., and Gangale, F. (2022). Citizen engagement in eu collective action energy projects. *Sustainability*, 14(10).
- Tang, Z., Yang, Y., and Blaabjerg, F. (2022). Power electronics : The enabling technology for renewable energy integration. *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, 8(1) :39–52.
- Thaler, R. H. and Sunstein, C. R. (2008). *Nudge : Improving Decisions about Health, Wealth, and Happiness*. Yale University Press, New Haven, CT, US.
- United Nations Environment Programme (2020). Building sector emissions hit record high, but low-carbon pandemic recovery can help transform sector. <https://www.unep.org/news-and-stories/press-release/building-sector-emissions-hit-record-high-low-carbon-pandemic>. Accessed : [Insert the date when you accessed the site].
- Yang, Y., Chen, Y., Wang, Y., Li, C., and Li, L. (2016). Modelling a combined method based on anfis and neural network improved by de algorithm : A case study for short-term electricity demand forecasting. *Applied Soft Computing*, 49 :663–675.
- Zuazo, I. Z., Boussaada, Z., Aginako, N., Curea, O., Camblong, H., and Sierra, B. (2021). Short-term load forecasting of building electricity consumption using narx neural networks model. In *2021 6th International Conference on Smart and Sustainable Technologies (Spli-Tech)*, pages 1–6.

Stratégie prédictive pour l'optimisation du contrôle d'un système de chauffage à eau chaude d'un bâtiment

Rana LOUBANI*¹, Didier DEFER¹, Ola ALHAJ-HASAN¹, Julien CHAMOIN²

¹ Univ. Artois, ULR 4515, Laboratoire de Génie Civil et géo-Environnement (LGCgE), Béthune, F-62400, France

² Junia, ULR 4515, Laboratoire de Génie Civil et géo-Environnement (LGCgE), Lille, F-59000, France

*rana.loubani@univ-artois.fr

RESUME. L'optimisation du pilotage des équipements des bâtiments est un des leviers de l'amélioration de l'efficacité énergétique. Dans cet article, une application de contrôle prédictif est présentée. A partir de données générées sous TRNSYS, deux modèles sont élaborés. Ils permettent de simuler la température intérieure et la consommation de gaz d'un bâtiment chauffé par une installation à radiateurs à eau chaude. On se limite dans cette étude à l'utilisation des données classiquement mesurées. Une optimisation par algorithme génétique permet de sélectionner une séquence au pas horaire de températures de consigne pour la température de départ d'eau. Le critère de sélection réalise un compromis entre le confort et l'énergie consommée. Les résultats montrent 12% d'économie d'énergie en moyenne, à comparer à la méthode de pilotage conventionnelle.

MOTS-CLÉS : Efficacité énergétique, MPC, apprentissage automatique.

ABSTRACT. Optimizing the control of building equipment is one of the levers for improving energy efficiency. In this article, a predictive control application is presented. Using data generated in TRNSYS, two models are developed. They simulate the indoor temperature and gas consumption of a building heated by a hot-water radiator system. This study is limited to the use of conventionally measured data. Genetic algorithm optimization is used to select a sequence of hourly setpoint temperatures for the water flow temperature. The selection criterion is a compromise between comfort and energy consumption. The results show an average energy saving of 12%, compared with the conventional control method.

KEYWORDS : Energy efficiency, MPC, machine learning.

1. INTRODUCTION

En France, 44 % de la consommation d'énergie finale provient du secteur du bâtiment. Selon le rapport annuel du Haut Conseil pour le Climat, le bâtiment est responsable de 36 % des émissions de gaz à effet de serre de l'Union européenne. L'amélioration de l'efficacité énergétique dans les bâtiments est cruciale et il est possible d'y contribuer en optimisant l'utilisation des systèmes existants, comme la commande des systèmes de ventilation (Suszanowicz 2018),(Zhou et Haghghat 2009) ou de climatisation (Chow et al. 2002) ou même le pilotage des robinets thermostatiques des radiateurs d'un bâtiment (Liu et al. 2022). Tous ces travaux ont permis de réaliser entre 8 et 13 % d'économies d'énergie.

En France, les systèmes de chauffage sont les plus gros consommateurs d'énergie dans les bâtiments. En mode traditionnel, comme le mode "tout ou rien" ou le contrôleur PID (Proportionnel-Intégral-Dérivé), les perturbations ne sont pas anticipées, ce qui peut entraîner un inconfort thermique et une

surconsommation d'énergie. Une solution avancée fait l'objet de nombreux travaux et si elle n'est toujours pas largement déployée, semble prometteuse : le contrôle prédictif par modélisation (Model Predictive Control MPC). Le MPC fait référence à une classe d'algorithmes qui prédisent la réponse future d'un système sur la base d'un modèle explicite et optimisent son comportement futur (Li et Wang 2022). Dans cet article, la stratégie s'appuie sur des modèles guidés par les données. Ce sont des modèles développés par des méthodes d'apprentissage automatique. L'avantage de ces méthodes est qu'elles ne nécessitent pas beaucoup de détails physiques du bâtiment. La contrepartie est qu'une quantité plus ou moins importante de données est nécessaire pour pouvoir entraîner le modèle (Scanu, s. d.). Les travaux de recherche ont développé des MPC dans des bâtiments pour optimiser conjointement le confort thermique et la consommation énergétique (Smarra et al. 2018),(Ferreira et al. 2012),(Macarulla et al. 2017). La méthode décrite dans cet article vise à contrôler un système de chauffage dans un bâtiment tertiaire, avec des radiateurs à eau chaude. Il s'agit d'un des systèmes de chauffage les plus installés en France. Selon le commissariat général au développement durable (« Commissariat général au développement durable (CGDD) »), près de 76% du parc est chauffé par des chaudières classiques au gaz, au fioul ou sont reliées aux réseaux de chauffage urbain. La régulation se traduit généralement par des actions sur des vannes. Il s'agit généralement des vannes à trois voies. Le contrôle conventionnel de ces systèmes utilise une loi de chauffage qui lie une température de consigne d'eau à envoyer dans le système à la température extérieure. Un asservissement de l'ouverture de la vanne trois voies vise à amener la température de départ dans le système à cette température de consigne. Dans la pratique, en fonction de l'inertie et des caractéristiques thermiques du système, la température de départ qui circule effectivement dans le système peut évidemment s'écarter de la température de consigne et être éventuellement obtenue après un certain délai. De nombreux travaux de MPC sont effectués en optimisant la température de départ de l'eau de ces systèmes (Sun et al. 2021), (Vána et al. 2014). Ces travaux nécessitent la mesure ou l'accès à de plusieurs grandeurs pour la modélisation et pour l'évaluation de la stratégie. Dans (Široký et al. 2011), (Macarulla et al. 2017), (Fielsch et al. 2017), les températures intérieures et extérieures, les températures de départ et de retour de l'eau, ainsi que les débits de circulation ont été utilisées pour calculer le besoin de chauffage, et par la suite, calculer l'économie d'énergie potentielle de la méthode.

Une des originalités de ce travail réside dans le fait d'optimiser, non pas la température de départ de l'eau, mais la température de consigne du système, c'est-à-dire celle qui sert effectivement de commande des systèmes. De plus, La méthode se limite à l'utilisation de données courantes de température intérieure du bâtiment et température et de rayonnement extérieur ainsi que leurs prévisions. La méthode ne nécessite pas l'implémentation de capteur spécifique. Seule la température de consigne du système de chauffage est nécessaire pour l'apprentissage. De plus, comme l'évaluation des économies d'énergie réalisées par différentes stratégies de contrôle est une tâche compliquée (Široký et al. 2011), la stratégie ne se repose pas sur un seul modèle prédictif pour le bâtiment, mais sur deux modèles : le premier est un réseau de neurones artificiels, qui est capable de prédire la température intérieure du bâtiment, en tenant compte des prévisions météorologiques et de l'occupation. Le second modèle prédictif est une machine à vecteurs de support SVM, qui estime la consommation d'énergie de la chaudière à gaz. Les systèmes de chauffage sont généralement divisés entre un circuit primaire et un circuit secondaire ce qui se traduit par une relation complexe entre la commande et la consommation d'énergie. Les deux modèles sont inclus dans la fonction objectif de l'algorithme d'optimisation, qui effectue un compromis entre la consommation d'énergie et les conditions de confort qui peut être ajusté par le gestionnaire du bâtiment.

2. DESCRIPTION DU BATIMENT

La méthode présentée dans ce travail est appliquée à des données générées à partir d'un modèle de bâtiment créé sous TRNYS. Un cas simple de bâtiment parallélépipédique a été modélisé. Nous nous sommes inspirés d'un bâtiment réel situé à Lille, qui a été construit dans les années 1975 à 2000, et qui est orienté vers le nord-ouest. Il s'agit d'un bâtiment tertiaire de 3 étages. Le nombre d'occupants est estimé à 100 personnes pendant les horaires d'occupation. Pour réduire la complexité, le bâtiment est considéré comme une seule zone de volume 4968 m^3 . Des fenêtres en doubles vitrages, situés sur les deux côtés du bâtiment sont ajoutés, ainsi qu'une faible infiltration. Un scénario d'occupation est défini de 8 à 18h du Lundi au Vendredi. Un scénario de ventilation est également imposé au bâtiment. Ce bâtiment est chauffé par un système de radiateurs à eau chaude. Un débit constant de circulation dans le système a été retenu. Le pilotage du chauffage s'effectue par le biais d'une température de consigne de départ d'eau. Le système répond à cette consigne en ouvrant plus ou moins une vanne 3 voies asservie à la température de départ. L'eau chaude qui sert au mélange dans la vanne provient d'un réservoir tampon qu'une chaudière au gaz maintient à une température constante. On constate qu'il n'existe pas de relation simple entre la puissance de chauffage dissipée par les radiateurs et la consigne de température qui pilote la vanne 3V. La simulation est faite au pas horaire (8760 heures) sur une année complète. Les sorties du bâtiment modélisé sur TRNSYS sont récupérées pour la modélisation du comportement thermique du bâtiment et du système de chauffage.

3. METHODOLOGIE DU MPC

Comme la figure 1 montre, la stratégie est conçue comme trois boucles imbriquées. La première boucle sert à l'estimation de la température intérieure du bâtiment sur un horizon de prédiction de 24 heures à partir du modèle noté 1 sur le schéma. Le modèle 2 qui figure sur le schéma sert à modéliser la consommation d'énergie qui varie avec chaque scénario de commande testé. Nous travaillons avec un pas de temps horaire, tout au long de la stratégie. Cette boucle est incluse dans une seconde boucle, qui représente la phase d'optimisation. Suivant un nombre défini d'itérations, un algorithme génétique AG teste des scénarios de température de consigne, à l'aide des modèles de prédictions, en calculant un score pour chaque scénario de 24 heures proposé.

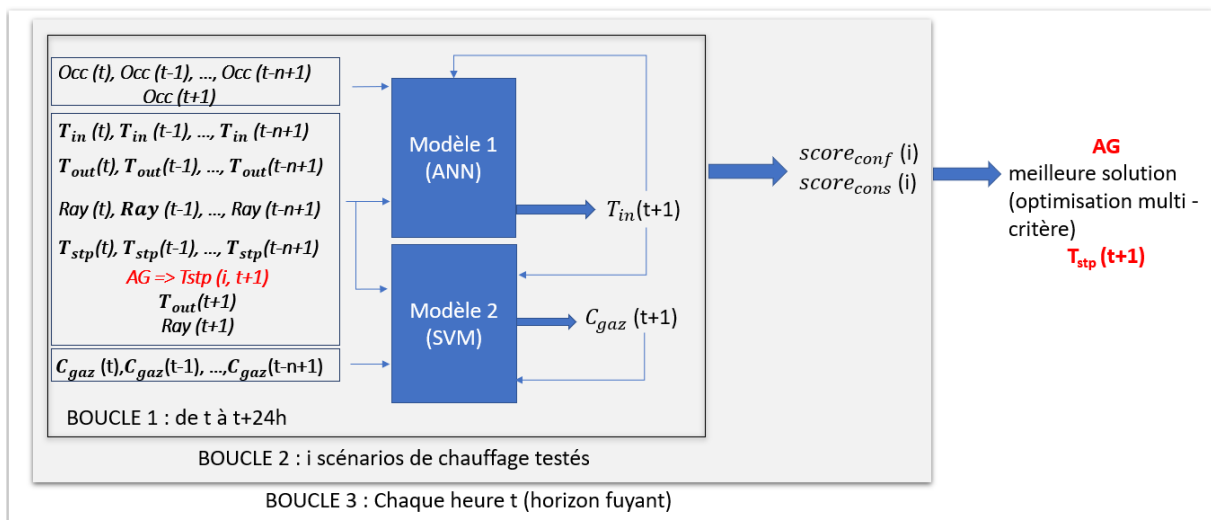


Figure 1 : Schéma de la stratégie de contrôle prédictif.

Comme notre objectif est d'assurer le confort thermique et de minimiser la consommation énergétique, la fonction objectif de l'algorithme génétique vise à minimiser ce score. Une fois la meilleure solution trouvée par l'AG, la valeur de température du premier pas de temps $T_{stp}(t+1)$ est envoyée au contrôle, les valeurs de température intérieure et de consommation d'énergie résultantes sont collectées pour être injectée de nouveau dans la boucle, et l'optimisation est relancée de nouveau pour un horizon de prédiction de 24 heures, se décalant ainsi d'un pas de temps à chaque fois, formant un horizon fuyant d'une heure.

4. MODELISATION

Les données utilisées pour la modélisation sont des données de simulations, générés par TRNSYS. Comme déjà expliqué, ce travail a pour objectif de pouvoir réaliser un modèle qui est capable de prédire, le plus précisément possible, le comportement du bâtiment en se limitant aux paramètres disponibles. Cinq variables représentent les paramètres initiaux aux modèles : la température de consigne, la température extérieure, le rayonnement horizontal, la température intérieure, l'occupation et la consommation de gaz, notées respectivement T_{cons} , T_{out} , Ray , T_{in} , Occ et C_{gaz} .

Plusieurs travaux de recherche ont menés pour modéliser le bâtiment, et ont montré que la prédiction la plus précise est obtenue en introduisant l'historique du bâtiment, c-à-d, en intégrant des termes régressifs des variables comme paramètres d'entrées au modèle (Fu et al. 2015) ,(Mechaqrane et Zouak 2004). Dans cet article, nous avons aussi travaillé à modéliser le bâtiment en se servant de son historique. Dans cet effet, deux modèles de prédiction ont été mis en œuvre : un modèle de prédiction de la température intérieure, et un autre pour la prédiction de la consommation de gaz. L'apprentissage est réalisé sur une partie des données, une autre partie est conservée pour tester le modèle. Pour pouvoir évaluer le modèle, un taux d'erreur de prédiction sera calculé sur l'ensemble de données de test. Dans ce papier, le pourcentage d'erreur absolu moyen MAPE est calculé suivant l'équation 1. Au sens du MAPE, plus la valeur de cette erreur est petite, meilleur est le modèle. Le coefficient de détermination du modèle R^2 qui mesure l'adéquation des données observées à celles obtenues, est aussi calculé. Un coefficient de détermination proche de 1 indique une bonne précision du modèle.

4.1. MODELE 1 : RESEAU DE NEURONES ARTIFICIELS

Le premier modèle d'apprentissage automatique développé est un réseau de neurones artificiels ANN. Il est formé à partir des couches de neurones artificielles interconnectées, et qui essaie de trouver la meilleure relation entre les entrées et la sortie, en minimisant l'erreur entre la sortie prédite \hat{y} et sa vraie valeur y . Dans cet article, le modèle ANN a pour rôle la prédiction de la température intérieure du bâtiment à l'instant prochain ($t+1$). Plusieurs modèles ont été entraînés, en variant le nombre de termes régressifs n , le nombre de couches et de neurones du réseau, et la fonction d'activation. Le meilleur résultat est trouvé avec $n=4$, une couche cachée de 50 neurones et une fonction d'activation non linéaire. Par conséquent, les entrées du modèle sont les valeurs de la température intérieure, la température extérieure, le rayonnement horizontal, l'occupation et la température de consigne, notée respectivement T_{in} , T_{out} , Ray , Occ et T_{cons} de l'instant t jusqu'à $t-3$. En addition, le modèle s'appuie sur les prévisions de la température extérieure, du rayonnement solaire et de l'occupation (à l'instant $t+1$), ainsi que sur la valeur de température de consigne proposée par l'algorithme génétique $T_{stp}(t+1)$. Les mesures de l'erreur du modèle adopté sont données dans le tableau 1.

4.2. MODELE 2 : MACHINE A VECTEURS DE SUPPORTS SVM

Le deuxième modèle va servir à la prédiction de la consommation de gaz par la chaudière. Comme déjà expliqué, il n'existe pas de relation simple entre le fonctionnement de la chaudière et le comportement thermique du bâtiment. Dans cette étude, un modèle SVM (Support Vector Machine) a été mis en place. Il s'agit d'un algorithme d'apprentissage automatique supervisé qui vise à trouver une frontière optimale entre les sorties possibles, en essayant de maximiser les limites de séparation entre les points de données en fonction des réponses. Cette transformation des entrées se fait à l'aide du noyau de la machine. Dans cette étude, la fonction de base radiale (RBF), représentée dans l'équation 2, a été choisie en raison des caractéristiques larges et non linéaires de l'ensemble de données. Le modèle adopté se base aussi sur les termes régressifs $n=5$ de la température intérieure du bâtiment, de sa consommation de gaz, ainsi que les prévisions météorologiques et la même valeur de température de consigne $T_{stp}(t+1)$ qui a été proposée par l'algorithme génétique. La sortie de ce modèle est la consommation de gaz estimée à l'instant $t+1$. Les mesures de l'erreur du modèle adopté sont données dans le tableau 1.

Modèle	R^2	MAPE
ANN	0.97	2.88
SVM	0.69	24.79

Tableau 1 : Les mesures des erreurs sur les modèles ANN et SVM.

5. OPTIMISATION

Pour résoudre le problème d'optimisation, un algorithme génétique est implémenté. L'algorithme génère une population initiale, qui représente dans notre cas des scénarios de séquences de température de consigne sur 24 h. A l'aide d'une fonction objectif, un score est calculé pour chaque solution et les meilleures sont retenues comme solutions mères. Ensuite, une nouvelle population est générée en croisant les solutions mères retenues. Enfin, la mutation consiste à changer des gènes des individus de la nouvelle population. La solution finale trouvée est celle présentant le meilleur score de la fonction objectif. Dans cette étude, comme nous visons un compromis confort/consommation, la fonction objectif est calculée en additionnant le score de l'inconfort et celui de la consommation de gaz, selon la formule 3. L'objectif est donc de minimiser le score final. Le calcul du score d'inconfort est montré dans la figure 2. Le poids ω sert à préciser le niveau de priorité du confort par rapport à la consommation, c-à-d, ω peut être modifié, selon l'envie de privilégier l'un des deux scores à l'autre. Les résultats présentés dans cet article sont obtenus, avec un poids $\omega = 1$ qui nous a semblé réaliser un compromis satisfaisant entre le confort et la consommation énergétique.

6. RESULTATS

La méthode proposée est testée sur le bâtiment modélisé sur TRNSYS. Les résultats de la stratégie prédictive sont comparés à ceux d'un pilotage conventionnel du même bâtiment. Ce mode de pilotage s'effectue par une loi d'eau liée à la température extérieure. Les paramètres de cette loi d'eau ont été choisis d'une façon qu'elle assure une température intérieure comprise entre 20°C et 22 °C pendant les heures d'occupation (entre 8h et 18h). Un réduct de nuit est également prévu. Cette loi d'eau a été réglée de façon optimale pour aboutir à une stratégie de référence crédible. La comparaison est faite sur la base

des deux scores : l'inconfort et la consommation énergétique. Le tableau 2 montre les résultats des deux méthodes de pilotage sur huit journées différentes choisies aléatoirement. Le contrôle par la loi d'eau de référence est représenté sous l'abréviation RBC. Le calcul est lancé sur 48 h pas horaire pour chaque journée. Les comparaisons sont effectuées sur la deuxième journée pour qu'on puisse considérer que la stratégie soit en régime établi. Les figures 3 et 4 montrent un exemple de résultats de prédiction des deux approches sur 48 h. Chaque heure, l'optimisation est relancée sur les 24h suivantes créant un horizon fuyant. L'algorithme génétique essaie, à chaque pas de temps, de retrouver une solution qui prenne au mieux en compte les changements de la météo et à l'occupation. La figure 5 montre l'évolution du scénario de température de consigne sur 24 heures à chaque pas horaire : de l'instant t à l'instant t+24 (la courbe bleue), de t+1 à t+25 (la courbe orange), puis de t+2 à t+26 (la courbe grise), et ainsi de suite. La figure 6 montre l'évolution de la température intérieure résultante.

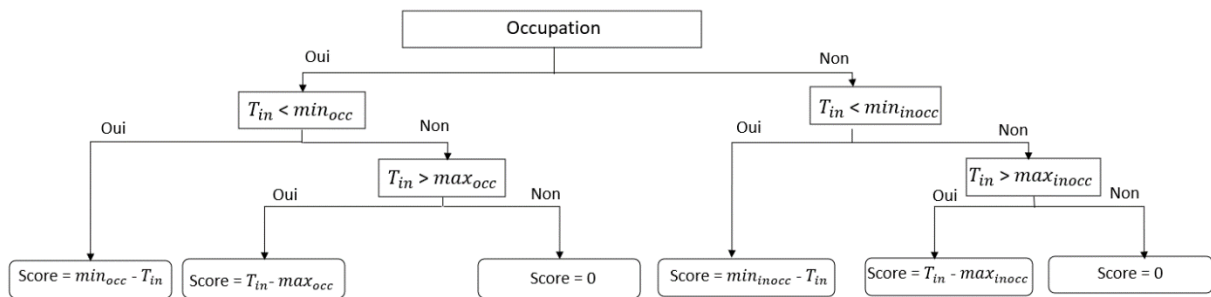


Figure 2 : Schéma explicatif du calcul du score d'inconfort.

Journée	Score inconfort MPC	Score inconfort RBC	Consommation de gaz MPC (kJ/h)	Consommation de gaz RBC (kJ/h)	Score final MPC	Score final RBC	Economie d'énergie (%)
1	3.78	3.49	1928876	2146692	18.82	20.23	15.04
2	6.42	4.32	1220434	1692133	15.93	17.51	27.87
3	4.39	4.37	2356410	2497463	22.77	23.85	5.64
4	3.39	3.57	1225901	1752476	12.95	17.23	30.04
5	4.28	3.25	1957043	2193628	19.54	20.36	10.78
6	2.74	3.18	2238471	2388917	20.2	21.81	6.29
7	5.64	3.15	1996695	2176705	21.21	20.12	8.26
8	3.48	3.69	2230883	2379169	20.88	22.24	6.23

Tableau 2 : MPC vs. RBC.

7. FORMULES

$$\text{MAPE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right| \quad (1)$$

$$\mathbf{K}_{\text{RBF}}(\mathbf{x} - \mathbf{x}') = \exp(-\gamma \|\mathbf{x} - \mathbf{x}'\|^2) \quad (2)$$

$$\text{score}_{\text{final}} = \omega^* \text{score}_{\text{inconfort}} + \text{score}_{\text{consommation}} \quad (3)$$

8. CONCLUSION ET DISCUSSION

Dans cet article, une stratégie prédictive appliquée au contrôle d'un système de chauffage d'un bâtiment à radiateurs à eau chaude alimentée par une chaudière au gaz. La méthode s'appuie sur deux

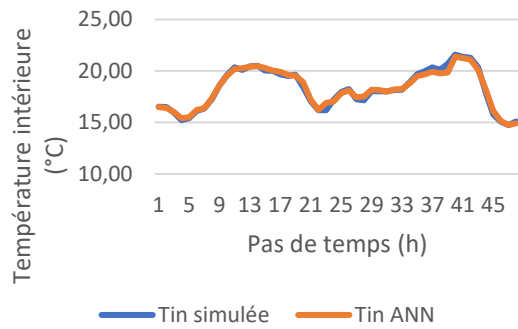


Figure 3 : Tin simulée vs. Tin prédite par ANN.

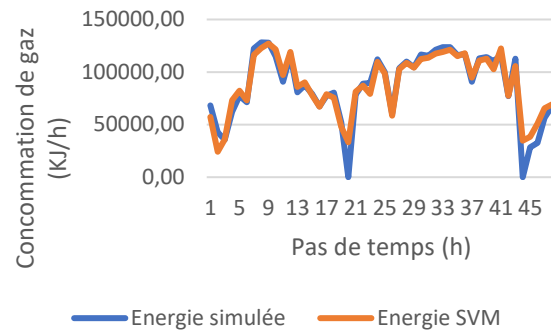


Figure 4 : Consommation de gaz simulée vs. consommation de gaz prédite par SVM.

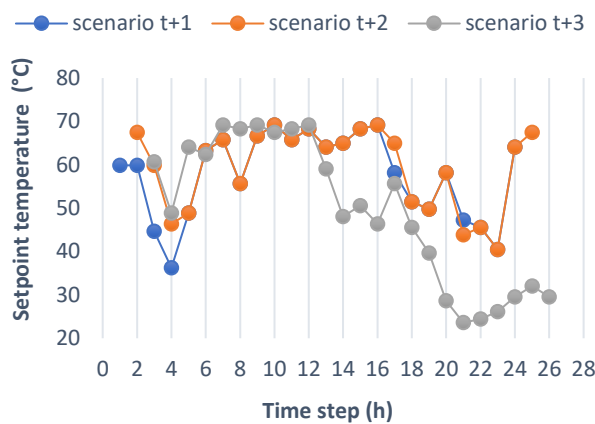


Figure 5 : Evolution du scénario de chauffage sur un horizon de prédiction fuyant.

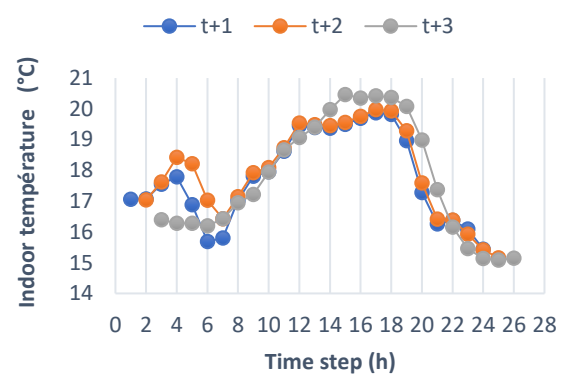


Figure 6 : La température intérieure résultante de la consigne sur un horizon de prédiction fuyant.

modèles de prédiction guidés par les données du bâtiment mesurées classiquement en intégrant les prévisions météo et d'occupation, ainsi que sur un algorithme génétique qui réalise un compromis confort / consommation. Comparativement à la stratégie de pilotage conventionnelle, les résultats obtenus par le MPC développée avec un poids ω de la fonction objectif à 1 montrent que le niveau de confort reste sensiblement équivalent tout en réalisant une économie d'énergie moyenne de 12%.

9. BIBLIOGRAPHIE

Chow, T. T., G. Q. Zhang, Z. Lin, et C. L. Song. 2002. « Global optimization of absorption chiller system by genetic algorithm and neural network ». *Energy and Buildings* 34 (1): 103-9. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(01\)00085-8](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(01)00085-8).

« Commissariat général au développement durable (CGDD) ». s. d. Ministère de la Transition Écologique et de la Cohésion des Territoires. <https://www.ecologie.gouv.fr/commissariat-general-au-developpement-durable-cgdd>.

Ferreira, P.M., A.E. Ruano, S. Silva, et E.Z.E. Conceição. 2012. « Neural Networks Based Predictive Control for Thermal Comfort and Energy Savings in Public Buildings ». *Energy and Buildings* 55 (décembre): 238-51. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.08.002>.

Fielsch, Sven, Tim Grunert, Matthias Stursberg, et Anton Kummert. 2017. « Model Predictive Control for Hydronic Heating Systems in Residential Buildings ». *IFAC-PapersOnLine, 20th IFAC World Congress*, 50 (1): 4216-21. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2017.08.817>.

- Fu, Yangyang, Zhengwei Li, Hao Zhang, et Peng Xu. 2015. « Using Support Vector Machine to Predict Next Day Electricity Load of Public Buildings with Sub-Metering Devices ». *Procedia Engineering* 121: 1016-22. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.09.097>.
- « Le Haut Conseil pour le climat a remis son rapport 2022 ». s. d. [gouvernement.fr. https://www.gouvernement.fr/actualite/le-haut-conseil-pour-le-climat-a-remis-son-rapport-2022](https://www.gouvernement.fr/actualite/le-haut-conseil-pour-le-climat-a-remis-son-rapport-2022).
- Li, Hangxin, et Shengwei Wang. 2022. « Comparative Assessment of Alternative MPC Strategies Using Real Meteorological Data and Their Enhancement for Optimal Utilization of Flexibility-Resources in Buildings ». *Energy* 244 (avril): 122693. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122693>.
- Liu, Zhikai, Huan Zhang, Yaran Wang, Zixu Song, Shijun You, Yan Jiang, et Zhangxiang Wu. 2022. « A Thermal-Hydraulic Coupled Simulation Approach for the Temperature and Flow Rate Control Strategy Evaluation of the Multi-Room Radiator Heating System ». *Energy* 246 (mai): 123347. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.123347>.
- Macarulla, Marcel, Miquel Casals, Núria Forcada, et Marta Gangoellés. 2017. « Implementation of Predictive Control in a Commercial Building Energy Management System Using Neural Networks ». *Energy and Buildings* 151 (septembre): 511-19. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.06.027>.
- Mechaqrane, A., et M. Zouak. 2004. « A Comparison of Linear and Neural Network ARX Models Applied to a Prediction of the Indoor Temperature of a Building ». *Neural Computing & Applications* 13 (1): 32-37. <https://doi.org/10.1007/s00521-004-0401-8>.
- Scanu, Lisa. s. d. « Towards archetypes of self-tuned models for connected buildings », 215.
- Široký, Jan, Frauke Oldewurtel, Jiří Cigler, et Samuel Prívará. 2011. « Experimental Analysis of Model Predictive Control for an Energy Efficient Building Heating System ». *Applied Energy* 88 (9): 3079-87. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.03.009>.
- Smarra, Francesco, Achin Jain, Tullio de Rubeis, Dario Ambrosini, Alessandro D'Innocenzo, et Rahul Mangharam. 2018. « Data-Driven Model Predictive Control Using Random Forests for Building Energy Optimization and Climate Control ». *Applied Energy* 226 (septembre): 1252-72. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.02.126>.
- Sun, Chunhua, Jiali Chen, Shanshan Cao, Xiaoyu Gao, Guoqiang Xia, Chengying Qi, et Xiangdong Wu. 2021. « A dynamic control strategy of district heating substations based on online prediction and indoor temperature feedback ». *Energy* 235 (novembre): 121228. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121228>.
- Suszanowicz, Dariusz. 2018. « Optimisation of Heat Loss through Ventilation for Residential Buildings ». *Atmosphere* 9 (3): 95. <https://doi.org/10.3390/atmos9030095>.
- Váňa, Zdeněk, Jiří Cigler, Jan Široký, Eva Žáčková, et Lukáš Ferkl. 2014. « Model-Based Energy Efficient Control Applied to an Office Building ». *Journal of Process Control* 24 (6): 790-97. <https://doi.org/10.1016/j.jprocont.2014.01.016>.
- Whitley, Darrell. 1994. « A Genetic Algorithm Tutorial ». *Statistics and Computing* 4 (2). <https://doi.org/10.1007/BF00175354>.
- Zhou, Liang, et Fariborz Haghghat. 2009. « Optimization of Ventilation System Design and Operation in Office Environment, Part I: Methodology ». *Building and Environment* 44 (4): 651-56. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2008.05.009>.

Projet TROPIC pour l'étude du rafraîchissement passif des écoles polynésiennes dans un contexte de changement climatique : confort thermique, qualité de l'air, santé cognitive et réduction des consommations électriques

Franck Lucas¹, Emmanuel Bozonnet², Mikael Boulic³, Virgile Lodzinski²

¹ Université de la Polynésie française
Laboratoire GEPASUD
B.P. 6570 - 98702 Faa'a - Tahiti - Polynésie française
Franck.lucas@upf.pf

² La Rochelle Université, LaSIE umr CNRS 7356, av. Michel Crépeau, 17042 la Rochelle

³ Massey University, Auckland Campus. School of Built Environment. Albany 0632. New Zealand

RESUME. Localisés en zones tropicales humides, les établissements scolaires polynésiens sont exposés à des sollicitations climatiques extérieures fortes marquées par des températures, des humidités relatives et des rayonnements solaires élevés. Les élèves sont dans ce cas très souvent en situations de stress thermique qui peuvent affecter leur santé cognitive et leurs capacités d'apprentissage. La qualité de l'air dans les bâtiments peut avoir un impact sur les capacités cognitives qui pour l'instant reste mal connu pour les climats tropicaux. Le projet TROPIC a pour objectif d'évaluer les conditions intérieures dans les établissements scolaires en Polynésie et de définir si celles-ci sont compatibles avec les objectifs d'apprentissage attendus dans ce type de bâtiments. Il comportera des campagnes expérimentales des conditions de confort et de qualité de l'air intérieur combinées avec des tests de performance cognitive en ligne standardisés. Une approche numérique définira les prescriptions constructives pour le climat actuel en Polynésie mais aussi dans le contexte du changement climatique pour des conditions futures à l'horizon 30 ans avec la possibilité de fortes vagues de chaleur.

MOTS-CLÉS : Confort thermique, santé cognitive, changement climatique

1. INTRODUCTION

Les conditions de confort dans les locaux d'enseignement situés en climat chaud ont été analysées depuis de nombreuses années (Humphreys 1977, Wong 2003, Kruger 2004) mais ont été aussi le sujet de recherche plus récentes (Talukdar 2020, Guevara 2021, Aparicio-Ruiz 2021). Les études analysant la qualité de l'air dans les locaux d'enseignement ont particulièrement augmenté ces dernières années mais elles concernent principalement les climats tempérés ou froids comme le précise Sadrizadeh (2022). Cette revue d'articles met en évidence le lien, avéré, entre la performance cognitive et le confort ainsi que le lien entre la performance cognitive et la qualité de l'air. La qualité environnementale intérieure (QEI) des bâtiments incluant la perception du confort thermique et de la qualité de l'air par les occupants est donc un sujet de recherche important qui concerne l'ensemble des bâtiments mais aussi plus spécifiquement les locaux d'enseignement. En effet, il a été établi que les élèves ont une perception de la QEI bien différente de celle des adultes et que cela affecte leurs capacités cognitives (Lee 2000, Wargocki 2019, Wargocki 2020).

La prise en compte de la consommation énergétique des écoles et le lien avec la QEI est aussi un élément important à considérer car on pourrait imaginer que l'amélioration de la qualité des ambiances peut entraîner une surconsommation énergétique. Des études alertent sur cette éventualité et préconisent des stratégies de ventilation adaptées (Becker 2007). Mais dans certaines écoles, il faut noter qu'il n'a

pas été démontré de corrélation positive entre la consommation énergétique des bâtiments et la qualité des environnements intérieurs du fait de l'intervention des occupants sur les équipements électriques (Zhang 2021).

La problématique de la QEI des salles de classe en climat tropical est abordée dans certaines études (Lee 2000, Wong 2003, Talukdar 2020). Dans ce cas, les conditions d'expérimentation sont différentes, puisque la plupart du temps la ventilation est assurée par les ouvrants du bâtiment, le taux de renouvellement d'air n'est pas réellement contrôlé et donc pas mesuré.

Le projet TROPIC a pour objectif d'évaluer les conditions intérieures dans les écoles de Polynésie française et de vérifier si celles-ci sont compatibles avec les objectifs d'apprentissage des élèves. Ainsi, le projet analysera les conditions de confort et la qualité de l'air dans les écoles et établira le lien avec la santé cognitive des élèves. Ces problématiques seront abordées pour les conditions climatiques actuelles mais la perspective d'un changement climatique entraînant une aggravation du stress thermique sera aussi envisagée. Cet article présente le projet TROPIC avec le contexte thermique connu des écoles en Polynésie française ainsi que les méthodologies pour caractériser le stress thermique et la santé cognitive dans un contexte de changement climatique.

2. ANALYSE DES CONDITIONS INTERIEURES DANS LES SALLES DE CLASSE EN POLYNESIE

Les conditions de confort thermique dans les salles de classes en Polynésie ont été étudiées dans un précédent projet (Projet COBIOPOL) pour des locaux de conception ancienne (Figure 1) et récente (Figure 2). La différence de conception porte principalement sur les matériaux utilisés. Les écoles de conception ancienne sont des structures légères alors que les écoles de conception récente sont des structures lourdes en béton.



Figure 1 : Ecole de conception ancienne (Papetoai)



Figure 2 : Ecole de conception récente (Teavaro)

Les mesures réalisées dans ces deux cas, ont mis en évidence des situations d'inconfort thermique notable. Sur l'ensemble des salles de classe, les niveaux de températures sont assez élevés avec pour certaines salles des valeurs atteignant régulièrement 34°C (Figure 3).

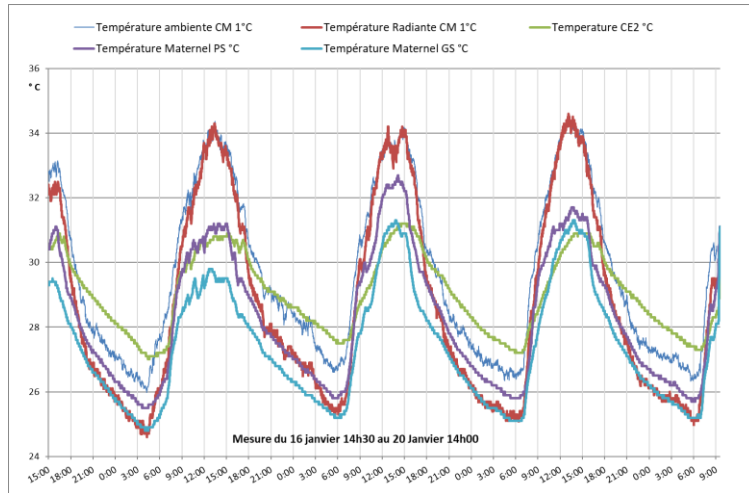


Figure 3: Évolution des températures dans différentes salles de classe du 16 au 20 janvier.

La conception et l’exploitation des locaux apparaît défailante car même si les locaux anciens et récents adoptent les principes de la ventilation naturelle, les températures intérieures sont très souvent bien supérieures aux températures extérieures. La température de globe noir est proche voire inférieure à la température sèche d’air, laissant imaginer que l’isolation des parois est plutôt bonne mais que l’évacuation des charges internes n’est pas assurée.

Ces conditions intérieures s’expliquent donc en partie par une ventilation traversante qui ne s’opère pas correctement la journée et la nuit. Une mauvaise gestion des ouvrants par les usagers qui ferment les jalousies la nuit et occultent les ouvertures par des rideaux le jour, conduit à vitesse d’air faible dans les pièces empêchant l’évacuation des charges internes (Figure 4). Que se soit dans les écoles récentes ou anciennes, les conditions intérieures sont la plupart du temps en dehors des zones de confort du diagramme de Givoni (Figure 5).

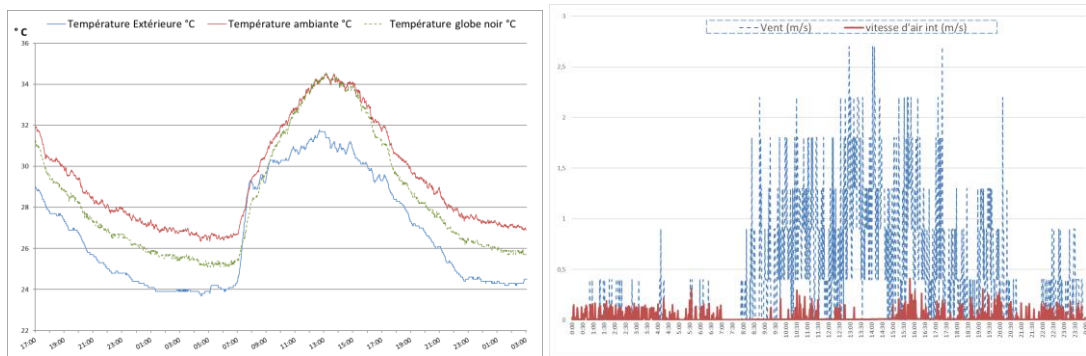


Figure 4 : Evolution des températures ambiante et de globe noir intérieures et de la température extérieures (gauche) et comparaison de la vitesses d’air intérieur et du vent (droite)

Sur la base des conditions climatiques actuelles, les conditions de confort dans les salles de classe en Polynésie ne sont donc généralement pas acceptables. L’analyse de la qualité de l’air intérieur n’a pas encore été réalisée mais elle devrait confirmer le manque de renouvellement d’air observé sur les mesures thermiques. On peut donc s’interroger sur les capacités d’apprentissage des élèves dans de telle situation et les impacts sur la santé cognitive. Une dégradation potentielle de ces conditions dans un contexte de changement climatique peut apparaître préoccupante. Les analyses proposées par le projet TROPIC sur ces problématiques sont proposées ci-après.

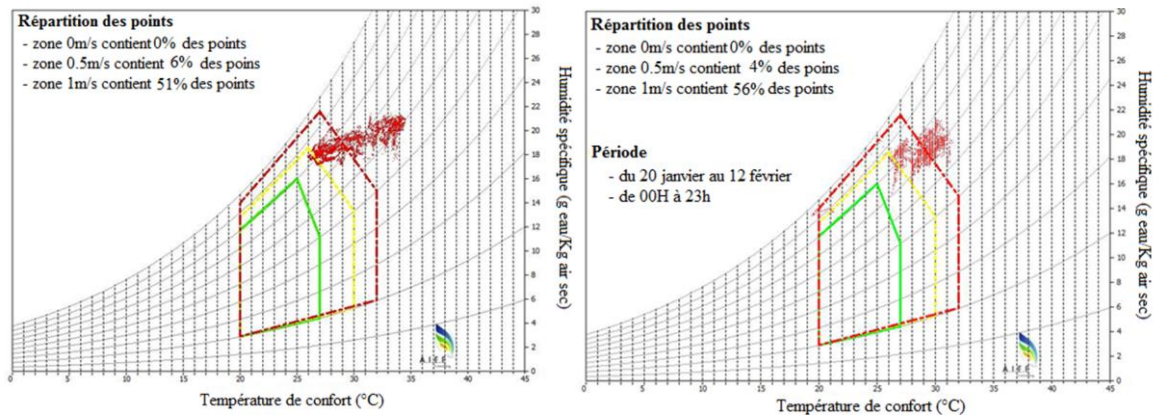


Figure 5 : Diagramme de Givoni pour les conditions intérieures mesurées dans une salle de classe ancienne (gauche) et récente (droite).

3. EVALUATION DE LA SANTE COGNITIVE

La littérature montre certaines associations entre des niveaux modérés de stress thermique et le CO₂ dans les salles de classe et les performances cognitives des enfants. En effet, des recherches conduites par Sathish (2012) et Bakó-Biró (2012) ont révélé l'importance de l'environnement physique de la classe sur le développement cognitif des étudiants. Un manque de renouvellement de l'air (donc une faible ventilation et un taux élevé de CO₂) impacterait négativement sur la santé cognitive des étudiants (15% de perte cognitive quand le taux de CO₂ passe de 550 ppm à 945 ppm, et 50% de perte cognitive quand le taux de CO₂ passe de 550 ppm à 1400 ppm). De même, une augmentation de 4% de la santé cognitive a été observée quand la température de la classe a diminué de 25°C à 22°C (étude réalisée en climat tempéré). L'impact de la concentration en CO₂ sur le ressenti des occupants n'a pas été abordé dans le projet COBIOPOL. Le projet TROPIC considère le stress thermique, le manque de ventilation et lie ces deux aspects à la santé cognitive des étudiants Polynésiens.

Des tests de performance cognitive en ligne standardisés, développés par Cambridge Cognition pour les écoles primaires, évalueront la concentration, le raisonnement et la mémoire à court terme des enfants. Ces tests cognitifs, d'une durée de 10 minutes, seront effectués à différents moments de la journée pour capturer l'accumulation naturelle du niveau de CO₂ (fermeture des fenêtres et portes) ou sous une ventilation naturelle (portes et fenêtres ouvertes). Une plateforme de mesure de l'environnement intérieur (température, humidité relative et taux de CO₂ - proxy pour ventilation) sera déployée (comme présenté dans la Section 2). Les étudiants se verront attribuer un identifiant, lors de leur inscription sur la plateforme de test cognitif, cela pour garantir l'anonymat dans l'analyse des données. Nous expliquerons ce qu'implique l'étude aux enfants des classes sélectionnées et à leurs familles. Nous demanderons aux parents/tuteurs des enfants inscrits dans les classes primaires sélectionnées leur autorisation pour que leurs enfants participent à cette étude. Ce protocole a été examiné et approuvé par le comité d'éthique humaine de l'Université de Massey en Nouvelle Zélande.



Figure 6: Étudiants néo-zélandais effectuant des tests cognitifs

D'autres paramètres comme l'acoustique et le visuel (éblouissement et niveau d'éclairage) seront aussi abordés. L'ouverture/fermeture des portes/fenêtres sera également surveillée par des capteurs

magnétiques. Cette expérience cognitive a été menée en écoles primaires néo-zélandaises comme le montre la Figure 6.

De plus, les étudiants adultes (BTS de lycée et étudiants de l'Université de la Polynésie française) seront invités à participer à une expérience utilisant un équipement portable d'électroencéphalographie (EEG). L'EEG (Figure 7) est une technique d'imagerie médicale non invasive pour mesurer l'activité électrique du cerveau.



Figure 7 : Un EEG avec 12 électrodes (à gauche) et une installation d'un EEG sur la tête d'un technicien à l'Université de Massey, Nouvelle Zélande (à droite).

L'un des points forts de l'EEG est de surveiller avec précision les activités neuronales et les modèles d'ondes cérébrales en capturant directement la réponse du système nerveux central aux changements de l'environnement intérieur (confort thermique et ventilation). Une augmentation de la pression artérielle, du rythme cardiaque ou du rythme respiratoire liés à un changement de l'environnement de la salle de classe pourront être capturés par l'EEG. Comme pour les tests cognitifs avec les élèves des écoles primaires, les EEGs (expérience avec les élèves adultes seulement) seront effectués à différents moments de la journée pour capturer l'accumulation naturelle du niveau de CO₂ (fermeture des fenêtres et portes) ou sous une ventilation naturelle (portes et fenêtres ouvertes).

Le protocole EEG a aussi été examiné et approuvé par le comité d'éthique humaine de l'Université de Massey en Nouvelle Zélande. Les EEG ont été testés à l'Université de Massey en Nouvelle Zélande avec des étudiants de licence en science du bâtiment. La figure 8 montre clairement une augmentation du stress et une perte de cognition quand le niveau de CO₂ augmente de 1000 ppm (parties par million) à 1500 ppm.

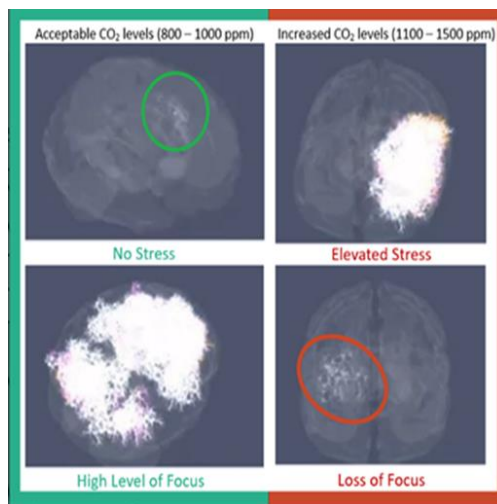


Figure 8 : Augmentation du stress et une perte de cognition, relevés par le EEG, lors d'une augmentation du niveau de CO₂ de (800 ppm - 1000 ppm) à (1100 ppm - 1500 ppm).

L'utilisation d'un EEG fournit une étude objective, en complément du questionnaire sur les perceptions des participants et des tests cognitifs qui seront effectués sous les mêmes conditions d'environnement interne. Ces expériences cognitives développées en contexte néo-zélandais vont être

adaptées au contexte polynésien et constituent un magnifique exemple de transfert de compétences entre les deux régions du pacifique.

4. CONFORT ET QUALITE DE L'AIR EN CONTEXTE DE CHANGEMENT CLIMATIQUE

La problématique de l'augmentation de la fréquence et de la sévérité des canicules avec le changement climatique est une donnée essentielle pour la conception des bâtiments en climat chaud. La définition des différentes typologies d'années caniculaires types, donc à risque, a été établie dans le cadre des travaux de l'Agence Internationale de l'Energie (AIE annexe 80, Machard et al. 2022). Ce type d'approche, peu ou pas utilisé dans la conception actuelle, nécessite également d'avoir à disposition des fichiers météorologiques qui intègrent ce risque caniculaire, ce que ne permet pas l'utilisation standard des fichiers TMY (Typical Meteorological Year). Dans le cadre de ce projet, nous abordons donc plus précisément les événements climatiques extrêmes, avec par exemple l'année 2016 identifiée ici (Figure 9 à gauche) d'après les données historiques de 2000 à 2020. On constate en particulier une faible dispersion sur l'année des températures, mais un très fort taux d'humidité. Nous avons ainsi traité les données historiques pour identifier les canicules du climat actuel avec son évolution entre 2000 et 2020 (sources meteo.data.gouv.fr), pour Papeete, selon la méthodologie retenue par l'annexe 80 (Machard et al. 2022, Ouzeau et al. 2016), voir Figure 9 à droite.

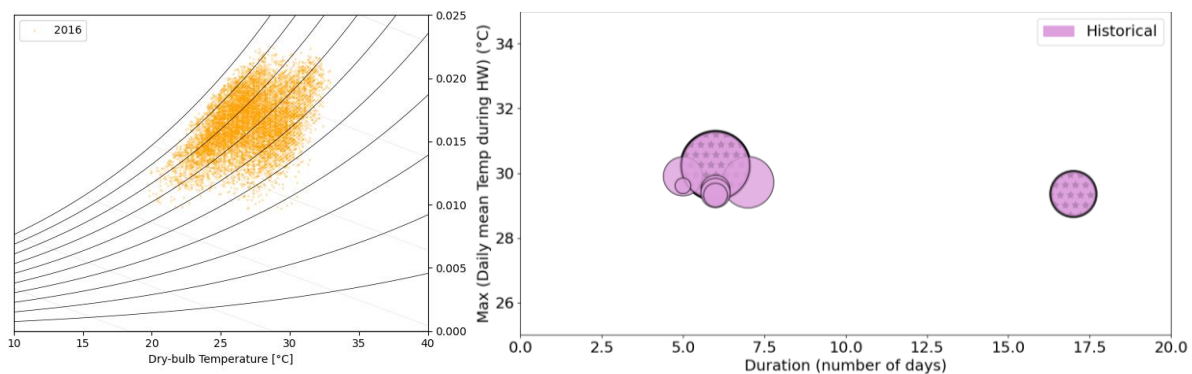


Figure 9 : (à gauche) Ensemble des points de l'année de l'année 2016, au pas de temps horaire, pour Papeete (source des données <https://meteo.data.gouv.fr>), (à droite) Vagues de chaleurs historiques à Papeete en durée, intensité et sévérité entre 2000 et 2020, la plus longue étant celle de 2016.

Il est à noter qu'ici on a préalablement recalculé les seuils de canicules adaptés au climat historique de Papeete, qui ne sont donc pas les mêmes que ceux de la France métropolitaine. Ces seuils de températures sont définis de façon à déterminer des canicules statistiquement sur les seules données météorologiques (Machard et al. 2022), mais équivalents à des risques sanitaires liés à l'adaptation des populations locales et aux risques associés aux dépassements prolongés des températures normales du site étudié. On observe ici que l'année 2016 est particulièrement remarquable avec 17 jours de canicule, alors que pour les autres années les canicules ne durent que de 5 à 7 jours. La définition des canicules étant liée à un dépassement au-delà des températures normales, cette tendance pourrait s'accélérer avec le changement climatique, d'autant plus que les températures actuelles sont très peu variables (Figure 9) avec donc des risques de dépassement de seuils accrus. La difficulté et l'enjeu sera aussi ici d'estimer les enjeux du changement climatique, alors que les données des modèles de climat actuels tels que CORDEX ne couvrent pas la zone de la Polynésie. Une solution à l'étude serait de faire l'analogie avec d'autres îles de la région Pacifique couvertes et à la même latitude, telle que la Polynésie. Du point de vue des occupants des bâtiments non climatisés, tels que pour les écoles étudiées dans ce projet TROPIC, nous devons tenir compte des paramètres de confort (habillement, activités, etc.) et un indice de confort couramment utilisé et présenté ici est la température équivalente PET (Figure 11).

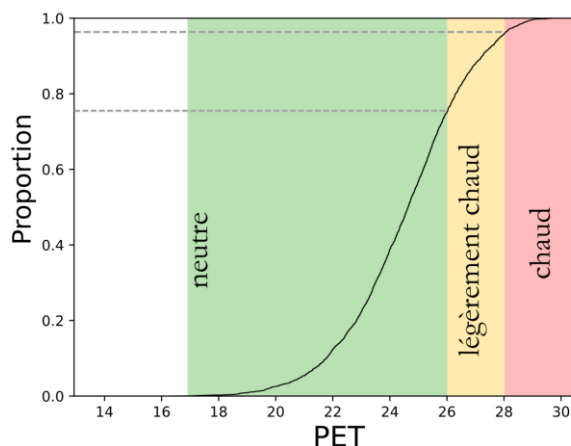


Figure 11 : Distribution des valeurs de PET à Papeete sur l'année 2016 pour les périodes d'occupation de 8h à 17h, et pour un taux de vêture de 0,5 clo, une activité de 1 met, et une vitesse d'air de 0,1 m/s.

On a ici en toute première approche considéré une ambiance très bien ventilée, donc à la température extérieure, en équilibre thermique avec les parois à la même température, et sans apport solaire direct sur l'occupant. On constate donc que pour un bâtiment type scolaire bien ventilé, les périodes de surchauffe au-delà 28°C en PET sont assez rares, sur la période d'occupation, et que la bonne conception et utilisation du bâtiment, même pour une année caniculaire, devrait permettre d'obtenir des conditions satisfaisantes de confort.

Il s'agira donc dans le projet de mener des études de confort thermique en identifiant l'impact de la construction sur les périodes de surchauffe et les possibilités de combinaison de solutions passives de rafraîchissement. La tendance actuelle au développement de la climatisation pourrait se renforcer également, et l'impact du changement climatique et l'augmentation des dépassements de seuils d'inconfort devront être considérés, sachant que les effets caniculaires sont aussi liés à des dépassements de seuils nocturnes non identifiés ici si on se limite simplement aux horaires d'occupation (tel que sur la figure 11). En effet, il est important de considérer l'effet de la surchauffe sur la durée avec les éventuels effets cumulatifs liés au manque de repos nocturne.

5. CONCLUSION

Le projet TROPIC a pour objectif d'analyser la qualité environnementale intérieure des écoles en Polynésie française et de faire le lien avec les capacités d'apprentissage des enfants. Ce projet fait suite à une étude précédente (Projet COBIPOL) mettant en évidence des conditions de confort dégradées dans les écoles, mais n'étudiant pas l'impact sur la santé cognitive des élèves. Le projet TROPIC va proposer une évaluation plus précise du stress thermique, ceci d'abord sur la base des données météorologiques actuelles afin de caractériser l'apparition de période caniculaire. Ces périodes sont actuellement en nombre et en durée limitée mais la perspective de changement climatique pourrait amener une très forte aggravation de ces phénomènes. TROPIC va donc, en complément, étudier l'évolution du stress thermique dans les locaux d'enseignement et pour le climat de la Polynésie. Les données de mesures et les prévisions seront confrontés aux résultats de tests cognitifs réalisés sur les élèves suivant un protocole validé par l'Université de Massey (Nouvelle Zélande) afin de définir si les conditions d'apprentissage sont assurées dans les salles de classe de Polynésie française.

6. BIBLIOGRAPHIE

- Aparicio-Ruiz, Pablo, Elena Barbadilla-Martín, José Guadix, Jesús Muñuzuri. 2021. « A field study on adaptive thermal comfort in Spanish primary classrooms during summer season ». *Building and Environment* 203: 108089.
- Bakó-Biró, Zs., D.J. Clements-Croome, N. Kochhar, H.B. Awbi, M.J. Williams. 2012. « Ventilation rates in schools and pupils' performance ». *Building and Environment* 48: 215–223.

- Becker, Rachel, Itamar Goldberger, Monica Paciuk. 2007. « Improving energy performance of school buildings while ensuring indoor air quality ventilation », *Building and Environment* 42: 3261–3276.
- Guevara, Gabriel, Guillermo Soriano, Isabel Mino-Rodriguez. 2021. « Thermal comfort in university classrooms: An experimental study in the tropics ». *Building and Environment* 187: 107430
- Humphreys, M.A. 1977. « A study of the thermal comfort of primary school children in summer ». *Building and Environment* 12 (4): 231-239.
- Kruger, Eduardo L., Paulo H.T Zannin. 2004. « Acoustic, thermal and luminous comfort in classrooms ». *Building and Environment*. 39: 1055–1063.
- Lee, S.C., M. Chang. 2000. « Indoor and outdoor air quality investigation at schools in Hong Kong ». *Chemosphere* 41: 109 - 113.
- Machard, Anaïs, Emmanuel Bozonnet, Agnese Salvati, Mamak Pourabdollahtootkaboni, et Abhishek Gaur. « Fichiers météorologiques de vagues de chaleur futures pour évaluer la résilience thermique des bâtiments au changement climatique ». In AIC. Toulouse (France), 2022.
- Ouzeaux, Gaele, Jean Michel Soubeyroux, M. Schneider, R. Vautard, et S. Planton. 2016. « Heat Waves Analysis over France in Present and Future Climate: Application of a New Method on the EURO-CORDEX Ensemble ». *Climate Services* 4: 1-12.
- Sadrizadeh, Sasan, Runming Yao, Feng Yuan, Hazim Awbi, William Bahnfleth, Yang Bi, Guangyu Cao, Cristiana Croitoru, Richard de Dear, Fariborz Haghighat, Prashant Kumar, Mojtaba Malayeri, Fuzhan Nasiri, Mathilde Ruud, Parastoo Sadeghian, Pawel Wargocki, Jing Xiong, Wei Yu, Baizhan Li. 2022. « Indoor air quality and health in schools: A critical review for developing the roadmap for the future school environment ». *Journal of Building Engineering* 57: 104908.
- Satish, Usha, Mark J. Mendell, Krishnamurthy Shekhar, Toshifumi Hotchi, Douglas Sullivan, Siegfried Streufert, William J. Fisk. 2012. « Is CO₂ an indoor pollutant? Direct effects of low-to-moderate CO₂ concentrations on human decision-making performance ». *Environmental Health Perspectives* 120(12): 1671–1677.
- Talukdar, Md. Sarwar Jahan, Tahmid Hassan Talukdar, Manoj Kumar Singh, Md. Abdul Baten, Md. Shahadat Hossen. 2020. « Status of thermal comfort in naturally ventilated university classrooms of Bangladesh in hot and humid summer season ». *Journal of Building Engineering* 32: 101700.
- Wargocki, Pawel, Jose Ali Porras-Salazara, Sergio Contreras-Espinoza. 2019. « The relationship between classroom temperature and children's performance in school ». *Building and Environment* 157: 197–204.
- Wargocki, Pawel, Jose Ali Porras-Salazar, Sergio Contreras-Espinoza, William Bahnfleth. 2020. « The relationships between classroom air quality and children's performance in school ». *Building and Environment* 173: 106749
- Wong, Nyuk Hien, Shan Shan Khoo. 2003. « Thermal comfort in classrooms in the tropics ». *Energy and Buildings* 35: 337–351.
- Zhang, Dadi, Philomena M. Bluysen. 2021. « Energy consumption, self-reported teachers' actions and children's perceived indoor environmental quality of nine primary school buildings in the Netherlands », *Energy and Buildings* 235: 110735.

Plateforme pour l'étude de la vulnérabilité des logements et de leurs occupants face aux futures vagues de chaleur

Julien Maratier*¹, Damien David¹, Kevyn Johannes¹, Gabriela Ciuperca²

¹ CETHIL-UMR5008, Université Lyon 1, INSA, CNRS
9 Rue de la Physique, 69100 Villeurbanne

² Institut Camille Jordan - UMR 5208, Université Lyon 1
21 Av. Claude Bernard, 69100 Villeurbanne,

*julien.maratier@insa-lyon.fr

RESUME. Dans un contexte de réchauffement climatique, les vagues de chaleur deviendront plus fréquentes, plus longues et plus intenses, accentuant l'inconfort dans les bâtiments, en particulier ceux non climatisés. Il est essentiel d'étudier la vulnérabilité des bâtiments face à ces vagues de chaleur pour identifier les configurations compromettant le confort voire la santé des occupants. Pour remédier aux lacunes des études existantes, les auteurs proposent une plateforme numérique de paramétrage de modèle STD et de traitement des données de simulation permettant une étude complète de cette vulnérabilité. Cette plateforme utilise une base de cas d'études individuels en tant que données d'entrée, et permet de faire varier les caractéristiques du bâtiment, de son environnement urbain, le comportement des occupants et les données météorologiques. En sortie, des indicateurs agrégés représentent l'intensité de l'exposition à la chaleur dans l'appartement. Les premiers résultats de l'utilisation de la plateforme sur un jeu de 65 appartements de l'agglomération lyonnaise sont présentés dans cet article.

MOTS-CLÉS : vulnérabilité, vagues de chaleur futures, confort thermique.

ABSTRACT. In the context of climate change, heatwaves will become more frequent, longer, and more intense, exacerbating discomfort in buildings, especially those without air conditioning. It is essential to study the vulnerability of buildings to these heatwaves to identify configurations that compromise the comfort and even the health of occupants. To address the shortcomings of existing studies, the authors propose a digital platform for configuring the STD model and processing simulation data, enabling a comprehensive study of this vulnerability. This platform uses a database of individual case studies as input data and allows for variations in building characteristics, urban environment, occupant behaviour, and meteorological data. As output, aggregated indicators represent the intensity of heat exposure in the apartment. The initial results of using the platform on a set of 65 apartments in the Lyon metropolitan area are presented in this article.

KEYWORDS: vulnerability, future heat waves, thermal comfort

1. INTRODUCTION

L'intensification à venir des vagues de chaleur, amplifiée dans les grandes villes par le phénomène d'îlot de chaleur urbain, augmentera le niveau d'inconfort dans les logements (Mehl et Tebaldi, 2004), particulièrement dans les bâtiments non climatisés. Dans ce contexte, certains bâtiments seront capables de maintenir des ambiances thermiques supportables, d'autres pas.

En période de canicule, les ambiances thermiques dans les logements dépendent des caractéristiques suivantes :

- Caractéristiques de l'appartement : plan, composition de parois, vitrages, occultants.

- Caractéristiques du bâtiment et de son environnement : hauteur, type de toiture, masques environnants, position de l'appartement.
- Intensité des sollicitations météorologiques : T° air, HR, ensoleillement, vitesse de vent, etc.
- Comportement des occupants : plannings d'action sur les ouvrants et charges internes

Étudier la vulnérabilité des logements face aux futures vagues de chaleur consiste à identifier les cas problématiques, inconfortables, voire dangereux pour la santé de certains occupants (Laaidi et al. 2006). Pour évaluer cette vulnérabilité dans un contexte géographique donné et couvrir toutes les configurations possibles de bâtiments, il faut faire varier toutes les caractéristiques listées précédemment dans des plages de variation représentatives de la diversité des configurations du contexte géographique d'intérêt.

Les études de vulnérabilité de la littérature sont toujours partielles. Certaines étudient un nombre de bâtiments trop faible pour qu'ils soient représentatifs de la population de bâtiments de l'agglomération ciblée (McLeod, Hopfe, et Kwan 2013, Barbosa, Vicente, et Santos 2015, Borghero et al. 2023). D'autres utilisent des plans de bâtiments académiques ou un mode constructif unique, ne rendant pas compte de la complexité des plans réels d'appartements (Escandón et al. 2019). Parfois, c'est le comportement de l'occupant qui est fixé (Mavrogianni et al. 2012).

La plateforme DEB (pour « Design of Experiment for Building ») permet de faciliter la réalisation de plans d'expérience dans lesquels toutes les caractéristiques listées précédemment sont explorées. Si une configuration est définie comme la combinaison d'un échantillon d'appartement, intégré dans un échantillon de tissu urbain, sollicité par un échantillon de données météorologiques, et dans lequel le comportement des occupants est régi par un échantillon de modèle de comportement, la définition d'un plan d'expérience vise à définir une liste de combinaisons à évaluer pour étudier la vulnérabilité à la chaleur de bâtiments dans un contexte géographique donné. Cette liste peut contenir plusieurs centaines de configurations. La plateforme permet d'automatiser la mise en œuvre de la campagne de simulation associée au plan d'expérience.

La plateforme DEB a initialement été conçue pour identifier les configurations permettant de maintenir des ambiances intérieures acceptables lors de période de canicules. Elle pourrait être utilisée par la suite pour évaluer la pertinence d'indicateurs de confort, ou pour évaluer la variabilité de l'efficacité de solutions de rafraîchissement passif sur un parc de bâtiments.

La structure et le fonctionnement de la plateforme DEB sont présentés dans la première section de cet article. Les deux sections suivantes illustrent l'utilisation de la plateforme sur un cas d'étude simple. Les objectifs du cas d'étude et la définition du plan d'expérience associé sont présentés dans la seconde partie de l'article. Les résultats des simulations sont analysés dans la troisième partie.

2. LA PLATEFORME DEB

La Figure 1 montre la structure de la plateforme DEB. La plateforme DEB est alimentée par des bases de données de modèles individuels (*Individual IDF Files*) et de fichiers météorologiques de canicules (*epw Files*). Un modèle individuel est le modèle thermique, au format IDF, d'un appartement unique, non intégré à un bâtiment, avec des matériaux de parois et des menuiseries génériques. À partir des modèles individuels, la plateforme génère les modèles complets (immeuble dans son environnement avec sollicitation météorologiques et comportement d'occupants), opère les simulations thermiques avec l'outil EnergyPlus, traite les résultats de simulation pour calculer des indicateurs de qualité des

ambiances pour chaque appartement, et synthétise les résultats de simulation dans une table de données (*Output Data*).

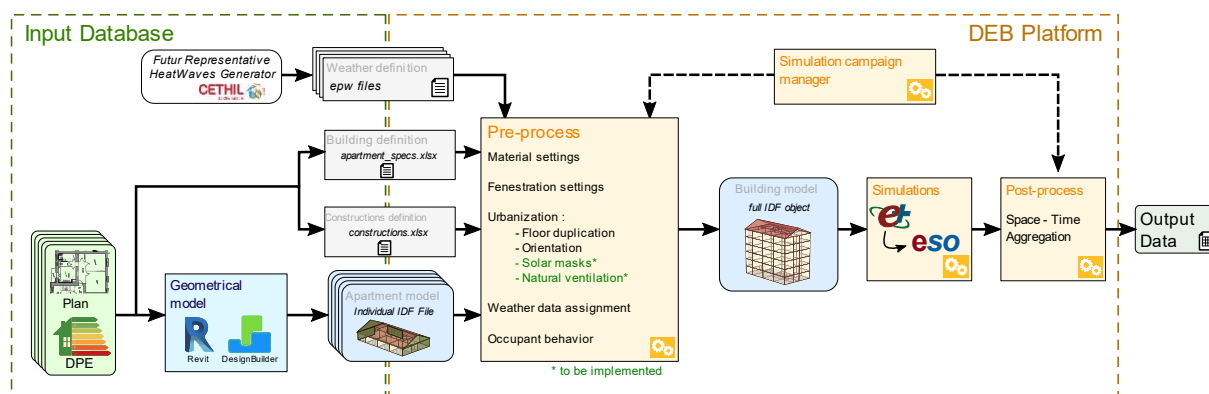


Figure 1 : La plateforme DEB

2.1. GENERATION DES MODELES INDIVIDUELS

Le processus de création des modèles individuels est illustré dans la partie gauche de la Figure 1. Un modèle individuel est construit à partir des plans et du diagnostic de performances énergétiques d'un appartement. La géométrie de l'appartement est dessinée sous Revit puis importée dans Design Builder pour générer un fichier idf. Les caractéristiques générales de l'immeuble (orientation, nombre d'étages, type et forme de toiture, présence d'un sous-sol) ainsi que les détails de composition des parois et des menuiseries sont stockés dans des fichiers Excel (*apartment_specs.xlsx* et *construction.xlsx*). A ce jour, 65 modèles individuels d'appartements ont été réalisés dans la base de données, à partir de données fournies par des bailleurs sociaux lyonnais. La Figure 2 montre la répartition de leurs caractéristiques en 6 périodes de construction, 6 tailles (du T1 au T6), 4 types d'exposition (mono-orienté, traversant, en angle, 3-façades), 3 types d'isolation et 4 types d'occultants. La distribution par tailles est celle observée à l'échelle de l'agglomération. La distribution par périodes de construction révèle un léger déficit sur la période 1976-1985 au profit de la période précédente 1945-1975.



Figure 2 : foisonnement des caractéristiques des appartements dans le jeu de modèles individuels

2.2. GESTION AUTOMATISEE DES SIMULATIONS

L'objet « *Simulation campaign manager* » de la plateforme DEB permet la gestion des campagnes de simulation. Il commande de manière automatisée la sélection et l'enrichissement des modèles

individuels (*Pre-process*), l'exécution des simulations, et de traitement des résultats (*Post-process*). L'enrichissement des modèles consiste à assigner les matériaux des parois et des menuiseries, à empiler les appartements pour former une colonne verticale, à orienter ce bâtiment, et à paramétrer le comportement des occupants. À terme, cette étape permettra aussi la définition des masques solaires dus aux parois entourant le bâtiment, et l'assignation de coefficients de pression représentatifs de la nature du tissu urbain.

2.3. TRAITEMENT DES RESULTATS DE SIMULATION

Les résultats de simulation (Energy Plus) sont stockés sous forme de fichier ESO. Ils contiennent les résultats de simulation pièce par pièce pour toute la période de simulation, au pas de temps choisi. À partir de ces données, la plateforme calcule le SET (Gagge et al. 1986) pour chaque pièce. Puis, les valeurs sont agrégées, d'abord spatialement puis temporellement. L'agrégation spatiale peut se faire selon une méthode choisie (moyenne, minimum, maximum), dans tout l'appartement, dans certaines pièces, ou dans les pièces occupées uniquement. L'agrégation temporelle peut se faire sur une période choisie de la journée (le jour, la nuit, selon l'occupation, selon l'activité) et selon une méthode choisie (moyenne, maximum, minimum).

3. LE CAS D'ETUDE

3.1. OBJECTIFS

L'utilisation de la plateforme est illustrée ici par un cas d'étude. L'objectif de ce cas d'étude est d'évaluer l'impact sur les conditions de confort durant la nuit, de la non-mise en œuvre du comportement recommandé par les pouvoirs publics lors des périodes de forte chaleur.

En période de forte chaleur, les politiques publiques recommandent de maintenir fermés fenêtres et volets pendant la journée (pour limiter les apports solaires et l'entrée d'air chaud), puis d'ouvrir durant la nuit (pour permettre le rafraîchissement par la ventilation naturelle). Le cas d'étude vise à évaluer l'impact sur les conditions de confort nocturne de trois comportements « dégradés » : la non-utilisation de la ventilation nocturne, l'ouverture des fenêtres durant la journée, et l'ouverture simultanée des fenêtres et des volets durant la journée. Cet impact dépend a priori des caractéristiques des appartements et des sollicitations météorologiques. C'est pourquoi un plan d'expérience est défini pour couvrir une gamme représentative d'appartements et de données météorologiques.

3.2. DONNEES METEOROLOGIQUES

Les simulations sont effectuées avec deux vagues de chaleur extraites du jeu de 10 fichiers météorologiques représentatifs des futures vagues de chaleur dans la région de Lyon générés par Toesca et al. (2023). Les caractéristiques des deux vagues retenues sont représentées sur la Figure 3. Les traits noirs verticaux indiquent le début et la fin des canicules. La vague wth1 est courte (3 jours) avec une température moyenne de 29,5°C. Le vent est assez stable et orienté Sud-Est. Le ciel est partiellement clair et l'air très humide ($HR_{moy} = 74\%$). La vague wth7 est longue (14 jours) avec une température moyenne de 33°C. Le vent est orienté au Sud puis au Nord. Le ciel est clair et l'air sec ($HR_{moy} = 33\%$).

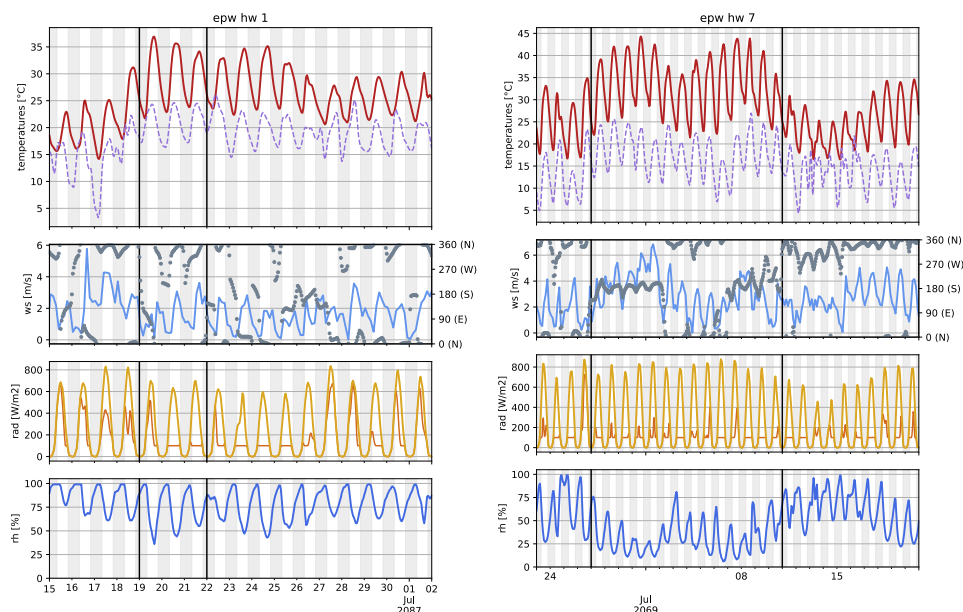


Figure 3 : vagues wth1 et wth7 : température, vitesse et orientation du vent, rayonnement solaire total et diffus, humidité relative

3.3. ECHANTILLON D'APPARTEMENTS URBAINS

Pour ce plan d'expérience, les 65 appartements implémentés actuellement dans la plateforme DEB sont explorés, avec leur orientation réelle, leurs compositions de parois réelles, et les caractéristiques réelles de leurs menuiseries. Les appartements seront empilés pour former des immeubles de 5 étages. Les résultats seront analysés uniquement sur le niveau R+2.

3.4. COMPORTEMENT DES OCCUPANTS

Les quatre modèles d'action sur les fenêtres et les occultants qui sont implémentés sont décrits dans le Tableau 1. On retrouve le modèle préconisé sur la première ligne, et les modèles dégradés sur les lignes suivantes.

Tableau 1 : description des comportements d'occupants du cas d'étude

	Jour (07 :00 – 21 :00)		Nuit (21 :00 – 07 :00)		Description
	Fenêtres	Occultants	Fenêtres	Occultants	
Préconisation	Fermées	Fermés	Ouvertes	Ouverts	
Ouvert la journée	Ouvertes	Ouverts	Ouvertes	Ouverts	Apports solaires et air chaud en journée
Sans protection solaire	Fermées	Ouverts	Ouvertes	Ouverts	Apports solaires en journée
Sans rafraîchissement	Fermées	Fermés	Fermées	Fermés	Pas de ventilation naturelle la nuit

Les portes intérieures sont maintenues ouvertes en permanence. Le nombre d'occupants est égal au nombre de pièces principales de l'appartement (par exemple, 3 occupants dans un T3). L'occupation est considérée continue, dans le séjour la journée jusqu'à 21:00 et dans les chambres la nuit jusqu'à 07:00.

3.5. INDICATEURS

Le confort pendant la nuit dans un appartement sera évalué à partir du SET moyen de nuit noté SET_{mn} . Il est obtenu en moyennant spatialement sur toutes les pièces de l'appartement, puis temporellement pendant les périodes nocturnes (23 :00 – 7 :00), à partir du début de la canicule jusqu'à 3 jours après la fin de la canicule. Les valeurs pour met et clo sont respectivement 0.8 et 0.2 la nuit (1.4 et 0.45 la journée). La vitesse d'air est calculée avec le débit et la section moyenne de chaque pièce.

3.6. SYNTHÈSE DES SIMULATIONS À RÉALISER

Les simulations STD couvriront donc 65 appartements, 2 fichiers météo et 4 comportements d'occupants. Soit 520 immeubles de 5 niveaux simulés. La période des simulations couvrira une période temporelle commençant 5 jours avant le début de la canicule et se terminant 10 jours après sa fin.

4. RESULTATS ET ANALYSES

4.1. DISTRIBUTION DES RESULTATS

La Figure 4 montre la distribution des valeurs de SET_{mn} pour chacun des quatre comportements d'occupants et pour les deux vagues de chaleur. Chaque distribution est calculée à partir des 65 valeurs de SET_{mn} des appartements en R+2 des immeubles. Sur les 2 vagues, pour le comportement préconisé, la valeur moyenne de SET_{mn} est de 24,4 °C avec un écart-type $\sigma = 2.01$. L'absence de rafraîchissement par ventilation naturelle (VN) la nuit entraîne une hausse moyenne de 10,2°C avec une grande dispersion des résultats ($\sigma = 6.96$). L'absence de protection solaire en journée génère une augmentation moyenne de 1,3°C. Si on ajoute l'apport d'air chaud en journée, la hausse moyenne est de 2,1°C.

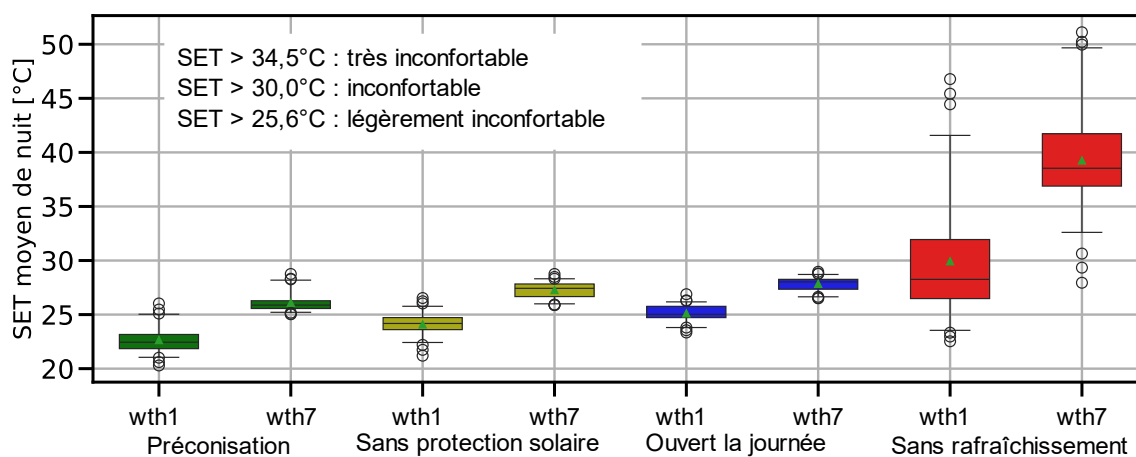


Figure 4 : SET_{mn} pour chaque comportement d'occupants (2 vagues de chaleur séparées)

C'est donc très majoritairement la VN de nuit qui permet d'abaisser la température dans les logements. En journée, on constate que, sans protection solaire, il vaut mieux (en moyenne) maintenir les fenêtres fermées. L'apport d'air chaud est préjudiciable.

4.2. VARIABILITÉ DES IMPACTS SELON LES CARACTÉRISTIQUES DES APPARTEMENTS

Cette section vise à définir les caractéristiques des appartements qui les rendent plus ou moins vulnérables à la dégradation du comportement des occupants. Les graphiques de la Figure 5 montrent

des nuages de points dans lesquels chaque point correspond à un appartement, positionné en abscisse en fonction de la valeur de SET_{mn} obtenue avec le comportement préconisé, et en ordonnée avec l'augmentation de SET_{mn} résultant de l'adoption d'un comportement dégradé, par rapport à la valeur obtenue avec le comportement de référence. Chaque graphique correspond à une combinaison comportement dégradé / vague de chaleur (wth1 ou wth7).

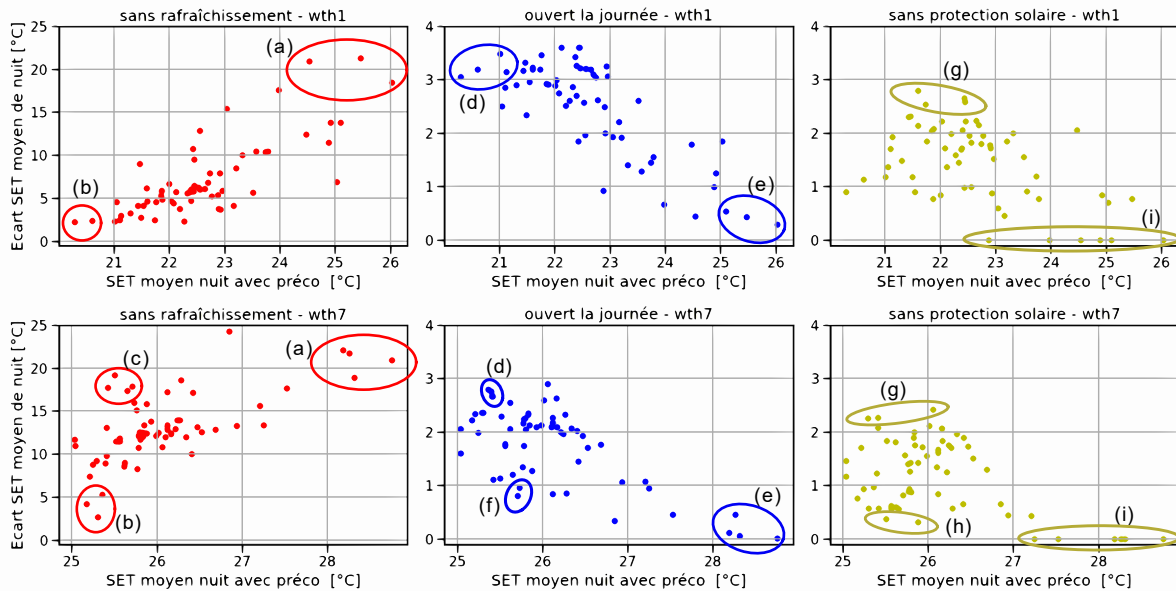
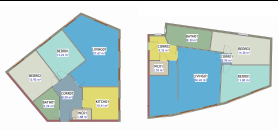




Figure 5: écart de SET_{mn} comportements dégradés vs préconisation

Les appartements correspondants aux points situés aux extrémités des nuages de points ont été identifiés. Le Tableau 2 présente le résultat et l'analyse de ces regroupements.

Tableau 2 : regroupements des appartements aux performances et variabilités similaires

	Plans des appartements concernés	Commentaires
(a)		5 appartements peu performants subissant une forte dégradation sans VN. Ils sont tous mono-orientés à l'ouest, 3 sont sans occultants avec une surface vitrée importante.
(b)		3 appartements performants et faiblement impactés par l'absence de VN. 2 sont traversants N/S, le 3 ^e est mono-orienté au Sud mais peu vitré et partiellement protégé par une loggia.
(c)		4 appartements performants fortement impactés par l'absence de VN. Ils sont de construction ancienne, avec des planchers bois, une isolation intérieure et une absence d'occultants sur au moins une façade.
(d)		5 appartements performants fortement impactés par l'ouverture des menuiseries en journée. Ils sont tous traversants pour wth1, pas de points communs trouvés pour wth7.
(e)	Mêmes appartements qu'en (a)	5 appartements peu performants faiblement impactés par l'ouverture des menuiseries en journée. Mêmes appartements qu'en (a)

(f)		2 appartements performants faiblement impactés par l'ouverture des menuiseries en journée. Appartements en angle et 3-façades, avec façade principale au Nord. Pas d'occultant pour l'un.
(g)		5 appartements plutôt performants et fortement impactés par l'absence de protection solaire en journée. Ils sont tous orientés plein Ouest ou plein Est et 4 sont mono-orientés.
(h)		2 appartements performants faiblement impactés par l'absence de protection solaire. Ils sont sans occultant sur au moins une façade.
(i)		6 appartements sans occultant qui sont les 6 plus mauvais sous la vague wth7

4.3. CONCLUSIONS DU CAS D'ETUDE

Une gestion des ouvrants dégradée par rapport à la préconisation impacte toujours négativement le confort thermique. Le rafraîchissement nocturne par VN est prépondérant sur la protection solaire et l'absence d'apport d'air chaud en journée dans le maintien d'une ambiance intérieure confortable. Sur la Figure 5, les tendances observées avec les scénarios « sans rafraîchissement » et « ouvert la journée » indiquent que les appartements les moins performants dans le scénario préconisé sont les plus impactés par une absence de VN la nuit, alors qu'une mauvaise gestion en journée est plus impactante sur les appartements performants.

Les configurations les moins performantes et les plus impactées par une mauvaise gestion des ouvrants en journée sont les configurations qui favorisent les apports solaires (via l'exposition, la taille des ouvrants ou l'absence d'occultants) avec un faible potentiel de rafraîchissement nocturne (appartements mono-orientés).

5. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Cet article a montré le principe de fonctionnement de la plateforme DEB, et a illustré le potentiel de la plateforme au travers d'un cas d'étude.

Le développement de la plateforme n'est néanmoins pas terminé. Le module d'intégration des appartements dans le milieu urbain devra être finalisé pour prendre en compte les masques proches et les coefficients de pression réalistes pour chaque ouverture (à la place des coefficients par défaut de DesignBuilder). Aussi, la base de données de modèles individuels devra être augmentée pour améliorer la représentativité des résultats. Un objectif de 300 appartements individuels a été fixé. Une fois la plateforme terminée, des campagnes de simulation plus lourdes pourront être envisagées. Ces campagnes de simulations utiliseront les 10 vagues de chaleur représentatives générées, et des comportements d'occupants plus réalistes prenant en compte des contraintes sociales.

Les auteurs remercient les bailleurs sociaux qui ont fourni les plans et les données indispensables à ces travaux : Lyon Métropole Habitat, Les Hospices Civils de Lyon, la SACVL et Grand Lyon Habitat.

6. BIBLIOGRAPHIE

- Barbosa, Ricardo, Romeu Vicente, et Rui Santos. 2015. « Climate change and thermal comfort in Southern Europe housing: A case study from Lisbon ». *Building and Environment* 92 (octobre)
- Borghero, Luca, Elisenda Clèries, Thibault Péan, Joana Ortiz, et Jaume Salom. 2023. « Comparing cooling strategies to assess thermal comfort resilience of residential buildings in Barcelona for present and future heatwaves ». *Building and Environment* 231 (mars): 110043. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110043>.
- Escandón, Rocío, Fabrizio Ascione, Nicola Bianco, Gerardo Maria Mauro, Rafael Suárez, et Juan José Sendra. 2019. « Thermal comfort prediction in a building category: Artificial neural network generation from calibrated models for a social housing stock in southern Europe ». *Applied Thermal Engineering* 150 (mars): 492-505. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.01.013>.
- Gagge, A P, Fobelets A P et Berglund L G « A standard predictive index of human response to the thermal environment ». ASHRAE
- Laaidi M., Laaifi K., Besancenot J.-P., 2006. « Temperature- related mortality in France, a comparison between regions with different climates from the perspective of global warming. » *International Journal of Biometeorology*, 51, 145–153.
- Mavrogianni, Anna, Paul Wilkinson, Michael Davies, Phillip Biddulph, et Eleni Oikonomou. 2012. « Building characteristics as determinants of propensity to high indoor summer temperatures in London dwellings ». *Building and Environment, Implications of a Changing Climate for Buildings*, 55 (septembre): 117-30. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.12.003>.
- McLeod, Robert S., Christina J. Hopfe, et Alan Kwan. 2013. « An investigation into future performance and overheating risks in Passivhaus dwellings ». *Building and Environment* 70 (décembre): 189-209. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.08.024>.
- Meehl G. A., Tebaldi C., 2004. « More intense, more frequent, and longer lasting heat waves in the 21st century ». *Science*, 305, 994-997.
- Toesca, Adrien, Damien David, Kéryn Johannes, et Michel Lussault. 2023. « Generation of weather data for the assessment of building performances under future heatwave conditions ». *Building and Environment* 242 (août): 110491. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110491>.

Modèle de données urbain pour l'étude de la surchauffe des quartiers

Simon Martinez*^{1,2,3}, Emmanuel Bozonnet ^{1,2}, Manon Rendu ³, Boris Brangeon ³

¹ IRSTV FR CNRS 2448

1 rue de la Noë, 44321 Nantes Cedex 3,

² LaSIE UMR CNRS 7356

Avenue Michel Crépeau, 17042 La Rochelle Cedex 1,

³ Plateforme TIPEE

8 Rue Isabelle Autissier, 17140 Lagord

* simon.martinez@plateforme-tipee.com

RESUME. Dans un contexte de réchauffement climatique, les solutions d'atténuation de la surchauffe urbaine semblent identifiées (revêtement à fort albédo, morphologie urbaine permettant la ventilation naturelle, végétation pour les apports d'ombrages et d'humidité, ...), mais il est encore difficile pour les acteurs opérationnels du territoire de s'approprier ces solutions et donc, de concevoir les nouveaux quartiers ou les opérations de rénovation. Nous avons développé une plateforme logicielle qui intègre les principaux paramètres nécessaires à l'évaluation des solutions, et qui sont gérés automatiquement dans un modèle de données urbain. Ce modèle de données permet d'agréger des données géoréférencées à l'échelle du quartier, de produire des indicateurs simples, et de préparer les données d'entrée de simulations de thermique du quartier. Le cas d'étude présenté ici illustre l'utilisation de ce modèle pour la température moyenne radiante, les ombrages et le vent dans la zone urbaine. Les cartographies détaillées ainsi produites se révèlent très utiles pour l'adaptation des quartiers face aux surchauffes.

MOTS-CLÉS : surchauffe urbaine, maquette numérique de quartier, confort thermique extérieur

ABSTRACT. In a global warming context, solutions for mitigating urban overheating have been identified, such as high-albedo surfaces, urban morphology that allows for natural ventilation, and vegetation to provide shade and humidity. However, it remains challenging for stakeholders to adopt these solutions and incorporate them into the design of new neighborhoods or renovation operations. A software platform has been developed to integrate the necessary parameters for evaluating solutions, which are automatically managed in an urban data model. This model can aggregate geo-referenced data on a neighborhood scale, produce simple indicators, and prepare input data for thermal simulations of the neighborhood. The presented case study illustrates the use of this model for mean radiant temperature, shading, and wind in the urban area. The detailed maps produced are useful for adapting neighborhoods to overheating.

KEYWORDS: Urban overheating, digital neighborhood model, outdoor thermal comfort

1. INTRODUCTION

Nous présentons dans cet article notre développement d'un Modèle de Données Urbain (MDU) pour collecter, traiter et stocker les données nécessaires à la réalisation des simulations microclimatiques à l'échelle d'un quartier. En effet, le manque de disponibilité et de fiabilité de la donnée (comme la géométrie urbaine, nature des surfaces, usages des espaces urbains, les conditions climatiques)

représente l'une des principales limites des outils d'évaluation des aménagements urbains (Goy, Maréchal, et Finn 2020). Aussi, les multiples obstacles rencontrés pour préparer les données d'entrées d'un modèle de microclimat (Bechtel et al. 2015) complexifient la réalisation d'études paramétriques nécessaires pour l'optimisation de l'aménagement d'un quartier vis-à-vis de la surchauffe urbaine. De plus, ces données étant utilisées par plusieurs autres acteurs de l'aménagement urbain, la mutualisation de leur collecte et leur stockage au sein d'une base de données commune sont pertinents pour assurer la cohérence des études multithématiques et faciliter le croisement des résultats.

2. DESCRIPTION DU MODELE DE DONNEES

Nos développements ont été réalisés en langage Python, regroupés dans un package *PyMDU* pour **Python-Modèle de Données Urbain**, et détaillés dans cette partie.

2.1. COLLECTE DES DONNEES, RECUPERATION VIA DES API OPEN-SOURCE

L'objectif de cette opération est d'automatiser l'interrogation des API open-source pour collecter les données à partir de bases de données variées. Par exemple, pour l'interrogation de la base BDTOPO (BD TOPO® 2024) sur les bâtiments (base de données qui décrit les éléments du territoire et ses infrastructures, notamment ses bâtiments), nous utilisons une requête de cette forme :

https://data.geopf.fr/wfs/ows?SERVICE=WFS&VERSION=2.0.0&REQUEST=GetFeature&TYPENAME=BDTOPO_V3:batiment&SRSNAME=EPSG:4326&BBOX=-1.1527,46.18163,-1.13989,46.18699,EPSSG:4326&STARTINDEX=0&COUNT=10000&outputFormat=application/json&SERVICE=WFS

Cette requête, exécutée avec un navigateur Web, permet de télécharger un fichier json sur les serveurs de l'IGN (Services Géoplateforme 2024) avec les données géométriques des bâtiments du quartier. Dans l'exemple précédent, les éléments surlignés en gris sont précisés :

– `BDTOPO_V3:batiment` : la clé de la base de données IGN (clés consultables ici :

https://geoservices.ign.fr/documentation/services/tableau_ressources) ;

– `-1.1527,46.18163,-1.13989,46.18699` : l'empreinte du quartier par les coordonnées en latitude et longitude ;

– `EPSG:4326` : le système de coordonnées (ici Lambert-93).

Nous rappelons dans le Tableau 1 l'ensemble des données qu'il est possible d'obtenir avec une méthodologie similaire (toutes provenant de bases de données de l'IGN).

Type de donnée	Source	Lien vers la documentation
Bâtiments	BD TOPO® V3 bâtiment	https://geoservices.ign.fr/sites/default/files/2021-07/DC_BDTOPO_3-0.pdf
Relief	Modèle numérique de terrain RGE Alti	https://geoservices.ign.fr/rgealti
Zone d'eau	BD TOPO® V3 plan d'eau	https://geoservices.ign.fr/sites/default/files/2021-07/DC_BDTOPO_3-0.pdf
Routes	BD TOPO® V3 tronçon de route	https://geoservices.ign.fr/sites/default/files/2021-07/DC_BDTOPO_3-0.pdf
Cadastre	Parcellaire Express (PCI) parcelle	https://geoservices.ign.fr/parcellaire-express-pci#:~:text=Parcellaire%20Express%20(PCI)%20fournit%20l,au%20parcellaire%20cadastral%20du%20PCI.

Tableau 1 : principales sources et lien d'accès de données librement accessibles

Les deux dernières lignes sont grisées car elles sont traitées par le modèle de données sans être directement utilisées pour la modélisation microclimatique. Elles peuvent être utilisées lors de la mise en contexte de la simulation, pour un diagnostic de site par exemple.

2.2. TRAITEMENT DES DONNEES GEOREFERENCEES

Une fois les données collectées, elles sont reprojctées et homogénéisées. Le système de coordonnées EPSG:4326 n'est pas idéal, et il est préférable de travailler en mètres pour des calculs géométriques. Les données sont donc reprojctées dans le système de coordonnées EPSG:2154 à l'aide du package Python *GeoPandas* qui utilise les développements de la librairie *GDAL* (Rouault et al. 2024). Également, les données sont projetées sur des cellules de 1 m × 1 m.

2.2.1. Utilisation de développements IA pour la couverture du sol

Les données d'occupation du sol et de végétalisation en zone urbaine sont relativement mal renseignées, ce qui exige de les renseigner manuellement. Nous utilisons donc les développements récents du traitement d'images satellites pour automatiser et simplifier la description sous forme d'ensembles, tels que dans l'exemple de la Figure 1, comme base de travail avant complétion manuelle à partir de vues satellite ou de plans de projets.



Figure 1 : illustration de l'identification de l'occupation du sol
projet CoSIA (IGNcommunication 2023)

Dans cet exemple trois types d'occupation du sol sont identifiées : en rose les bâtiments, en gris les surfaces imperméables, en vert clair la pelouse, et en vert foncé les zones arborées par des essences feuillues.

2.2.2. Les données météorologiques

L'objectif étant l'étude de l'aménagement des espaces extérieurs, les données météorologiques essentielles sont l'ensoleillement, la température et l'humidité de l'air, et le vent.

Les données climatiques moyennes (année type *TMY*) sont disponibles au niveau mondial pour des stations météo en général en dehors des centres urbains (Climate.onebuilding.org, ENSIMS EPW Map Tool, EPW Map). Pour prendre en compte l'effet îlot de chaleur urbain sur les propriétés de l'air, nous utilisons code de calcul Urban Weather Generator *UWG* (Ladybug-tools/uwg 2024). Les données précédemment collectées doivent être prétraitées (densité urbaine, hauteur moyenne des bâtiments, ratio de surface verticale/surface horizontale, pourcentage de couverture végétale) pour être utilisées en entrée du modèle *UWG*. Pour réaliser ces opérations de préparation des données, les travaux du projet Geoclimate (Orbisgis/geoclimate 2024) sont utilisés.

Pour des cas d'étude français, un nombre important de données météo est fourni par Meteo-France (<https://meteo.data.gouv.fr/>). Ainsi, il est possible d'obtenir des données météorologiques très localisées. Une fois ces données converties au format epw, les mêmes opérations sont réalisées pour obtenir un fichier météo urbain.

2.3. LE STOCKAGE DES DONNEES EN *POSTGIS*

L'ensemble de ces données est stocké sous la forme d'une base de données *PostgreSQL* avec l'extension *PostGIS* facilitant la manipulation des données géospatiales. Les avantages d'utilisation de ce type de base de données sont nombreux :

- **Intégrité** : propriétés générales de toutes les bases de données relationnelles, à savoir, les propriétés ACID (Atomicité, Cohérence, Isolement et Durabilité) assurant ainsi l'intégrité de la base de données en vérifiant la validité des transactions,

- **Organisation des données** : e relations attributaires et spatiales entre les tables facilitant les requêtes (opérations rapides notamment sur les données géoréférencées),

- **Mutualisation** : les bases de données *PostGIS* sont facilement partageables entre utilisateurs.

2.4. SYNTHESE DES OPERATIONS

La Figure 2 présente les étapes clés de l'ensemble des opérations pour la modélisation microclimatique décrite précédemment.

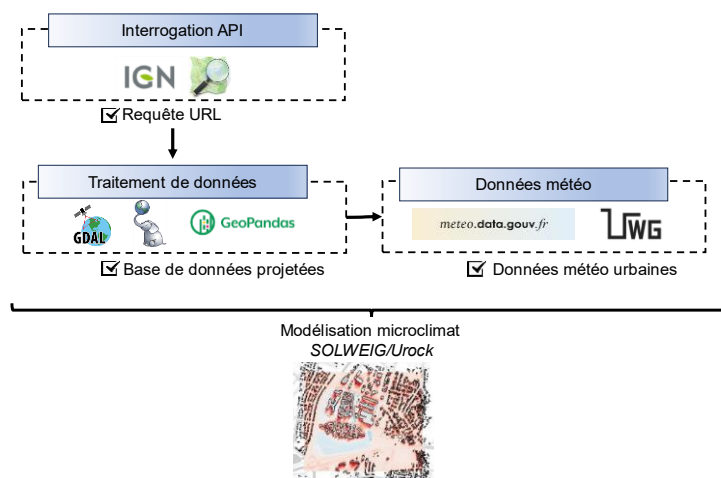


Figure 2 : vue d'ensemble des opérations du MDU pour la modélisation microclimatique

Les données géoréférencées via des API et traitées en interne, ainsi que les données météo urbaines à l'échelle de la ville calculées ici, sont utilisées comme décrites dans la suite (outils *SOLWEIG* et *Urock*) pour calculer la température ressentie à l'échelle urbaine du quartier étudié en détails.

3. SIMULATIONS MICROCLIMATIQUES – SOLAIRE ET AERAULIQUE URBAINE

Pour caractériser la température ressentie dans les espaces extérieurs, nous avons opté ici pour l'indicateur *UTCI*. Cet indicateur très couramment utilisé prend en compte l'ensemble des facteurs microclimatiques, ainsi que les données des occupants, tel que la vêtue, et les données météo simulées précédemment à l'échelle de la ville, avec en particulier la température d'air qui augmente avec l'îlot de

chaleur urbain (calcul *UWG* précédent). Localement, nous réalisons alors des cartographies détaillées de confort à l'aide de l'évaluation des variations dans le quartier lui-même de la température radiante moyenne, de l'ensoleillement et de la vitesse de vent en chaque point.

3.1. LA TEMPERATURE RADIANTE MOYENNE

Le calcul de la température radiante moyenne est réalisé en utilisant le code *SOLWEIG*, développé par l'université de Göteborg (Lindberg, Holmer, et Thorsson 2008). Le code *SOLWEIG* détermine la température moyenne radiante (T_{MR}) d'après la méthode de Höppe (1992). T_{MR} est déterminée en estimant les flux de solaires et thermiques reçus par un corps humain en fonction des facteurs de formes avec la scène.

La modélisation peut être réalisée via un plugin *UMEP* de *QGIS*. Pour réaliser une modélisation, il est nécessaire de réunir les données d'entrée suivantes :

- *DSM.tif* : Digital Surface Model, i.e. fichier raster 2D des surfaces des bâtiments
- *DEM.tif* : Digital Elevation Model ou modèle numérique de terrain
- *CDSM.tif* : Canopy Digital Surface Model, fichier raster 2D de la végétation (partie haute)
- *TDSM.tif* : Tree Digital Surface Model, fichier raster 2D de la végétation (partie basse)
- *landcover.tif* : fichier raster de l'occupation du sol
- *svfs.zip* : Facteur de forme des bâtiments, selon les 4 directions cardinales
- *Height.tif* : fichier raster de la hauteur des murs/bâtiments
- *Aspect.tif* : orientation des murs en degrés (0° pour un mur face au Nord)
- *MeteoFile.txt* : fichier météorologique au format texte

Parmi les données d'entrée précédentes : *DEM.tif* et *MeteoFile.txt* sont directement issus des données API et de post-traitements internes de *PyMDU*. Le fichier *landcover.tif* est issu du traitement des données d'occupation du sol de *CoSIA*, en accord avec les possibilités du code *SOLWEIG* (7 typologies de sol disponibles dans la version utilisée). Une table de correspondance a donc été établie entre les données *COSIA* et les données *SOLWEIG*. Les autres fichiers sont générés par des développements liés au projet *UMEP*, et orchestrés par *PyMDU*.

3.2. LES OMBRES

Les ombrages sont déterminés à partir des mêmes données d'entrée que celle de la température moyenne radiante. Plus spécifiquement, ils sont calculés à partir du modèle numérique terrain et des modèles numériques de surface en utilisant l'algorithme « Shadow casting » développé par Ratti et Richens (1999).

3.3. LE VENT DANS LE QUARTIER D'ETUDE

Le calcul du vent dans la zone urbaine s'appuie sur les développements récents du code open-source *Urock* (Bernard, Lindberg, et Oswald 2023). Il s'agit de la traduction en Python de la méthodologie proposée initialement par Röckle et déjà implémenté dans le logiciel *QUIC-URB* (Pardyjak et Brown 2003). La détermination des vitesses de vent s'effectue en deux étapes. Dans un

premier temps, la forme des zones d'influence derrière les obstacles (bâtiments, arbres) est déterminée sur la base de corrélations établies en soufflerie. Dans un second temps, les flux d'air sont équilibrés dans le but d'assurer la conservation de la masse en modifiant le champ de vitesse initial. Les développements de *PyMDU* permettent de relier le code de calcul *Urock* au fichier météo afin de calculer le vent dans la zone urbaine à chaque pas de temps du fichier météo.

3.4. LA TEMPERATURE RESENTIE (UTCI)

À partir des grandeurs calculées précédemment, des cartographies d'UTCI (Blazejczyk et al. 2012) sont établies. Pour cela, la librairie python *PythermalComfort* (Tartarini et Schiavon 2020) est utilisée. Pour chaque pixel, les calculs précédents permettent de déterminer l'UTCI local : la température et l'humidité d'air sont calculées par *UWG*, la température moyenne radiante par *SOLWEIG*, et le vent par *Urock*.

3.5. RESULTATS ET ANALYSES DU CONFORT EXTERIEURS

Pour notre cas d'étude (preuve de concept) du quartier Atlantech à Lagord (France), nous avons automatisé la génération de simulations microclimatiques, via notre MDU, pour trois mois de simulations au pas de temps horaire. La Figure 3 illustre, au pas de temps horaire, les cartographies d'UTCI (3a), d'ombrage (3b), de température moyenne radiante (T_{MRT}) (3c) et de vent (3d) obtenues pour une journée sur ces trois mois (uniquement le jour en période d'occupation des espaces extérieurs).

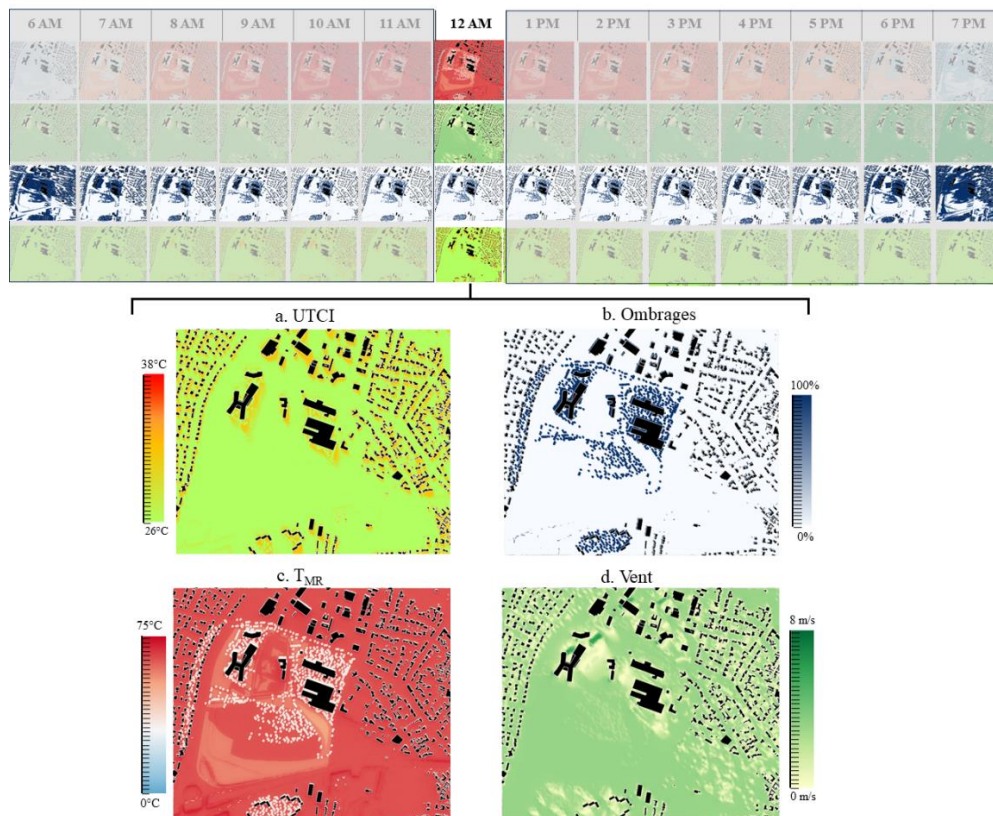


Figure 3 : cartographies des résultats microclimatiques, le 16 août

La Figure 3c, montre une nette diminution de la température moyenne radiante dans les zones ombragées. À midi, T_{MR} mesurée atteint environ 75°C en plein soleil, alors qu'elle vaut environ 30°C à

l'ombre (environ égale à la température de l'air). Sur la Figure 3b, les surfaces au sol ombragées sont représentées en noires. Pour l'ombrage généré par la végétation l'algorithme prend un facteur de transmission lumineuse (par défaut la transmission de la lumière à travers la végétation vaut 3%). Sur la Figure 3d, on observe une réduction de la vitesse du vent derrière les obstacles (arbres et bâtiments) qui dépend de la direction du vent (ici nord-nord-ouest). Pour notre cas d'étude, la température ressentie est la plus élevée dans les zones abritées du vent au soleil (UTCI = 38°C, correspondant à un stress thermique élevée). Cette température ressentie est nettement diminuée à l'ombre de la végétation, où elle avoisine la température d'air (environ 30°C).

4. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

La méthodologie proposée et illustrée ici tire parti de nombreuses bibliothèques et données accessibles, avec des développements pour automatiser la collecte et le traitement de données pour l'étude microclimatique. Un premier résultat avancé de ces développements est la génération automatique de cartographies des phénomènes qui permet de modéliser la température ressentie à l'échelle du quartier. On perçoit l'intérêt certain des décideurs pour ces outils, qui sont aussi un réel atout à des fins pédagogiques.

Cependant, des travaux supplémentaires sont nécessaires pour exploiter pleinement ces cartographies. En effet, la dynamique sur de larges échelles d'espaces et de temps s'avère complexe, et pourrait mener à des analyses erronées. Sans indicateur simple d'agrégation de cette multitude de cartes produites automatiquement, il peut être difficile de tirer des conclusions pertinentes. Ainsi, des travaux sont en cours pour définir des indicateurs quantifiant la qualité thermique des quartiers urbains.

5. BIBLIOGRAPHIE

BD TOPO® | Géoservices. Consulté le 13 février 2024. <https://geoservices.ign.fr/bdtopo>.

Bernard, Jérémy, Fredrik Lindberg, et Sandro Oswald. 2023. "URock 2023a: an open-source GIS-based wind model for complex urban settings." **Geoscientific Model Development** 16 (20): 5703-27. <https://doi.org/10.5194/gmd-16-5703-2023>.

Bechtel, Benjamin, Paul J. Alexander, Jürgen Böhner, Jason Ching, Olaf Conrad, Johannes Feddema, Gerald Mills, Linda See, et Iain Stewart. 2015. « Mapping Local Climate Zones for a Worldwide Database of the Form and Function of Cities ». *ISPRS International Journal of Geo-Information* 4 (1): 199-219. <https://doi.org/10.3390/ijgi4010199>.

Blazejczyk, Krzysztof, Yoram Epstein, Gerd Jendritzky, Henning Staiger, et Birger Tinz. 2012. « Comparison of UTCI to Selected Thermal Indices ». *International Journal of Biometeorology* 56 (3): 515-35. <https://doi.org/10.1007/s00484-011-0453-2>.

Climate.onebuilding.org. Consulté le 22 février 2024. <https://climate.onebuilding.org/>.

ENSIMS EPW Map Tool. Consulté le 22 février 2024. <https://app.ensims.com/epw/>.

EPW Map. Consulté le 22 février 2024. <https://www.ladybug.tools/epwmap/>.

Höppe, P., 1992: Ein neues Verfahren zur Bestimmung der mittleren Strahlungstemperatur im Freien [A new method to determine the mean radiation temperature outdoors]. *Wetter und Leb.*, 44, 147–151

Ladybug-tools/uwg. (2017) 2024. Python. Ladybug Tools. <https://github.com/ladybug-tools/uwg>.

Lindberg, Fredrik, Björn Holmer, et Sofia Thorsson. 2008. "SOLWEIG 1.0 – Modelling Spatial Variations of 3D Radiant Fluxes and Mean Radiant Temperature in Complex Urban Settings." **International Journal of Biometeorology** 52 (7): 697-713. <https://doi.org/10.1007/s00484-008-0162-7>.

- Nassiopoulos, Alexandre, et Frédéric Bourquin. 2010. "Fast three-dimensional temperature reconstruction." **Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering** 199 (49–52): 3169-78. <https://doi.org/10.1016/j.cma.2010.06.022>.
- Orbisgis/geoclimate. (2019) 2024. Groovy. OrbisGIS. <https://github.com/orbisgis/geoclimate>.
- Ratti, Carlo, et Paul Richens. 1999. "Urban Texture Analysis with Image Processing Techniques." In **Computers in Building: Proceedings of the CAADfutures'99 Conference**, édité par Godfried Augenbroe et Charles Eastman, 49-64. Boston, MA: Springer US. https://doi.org/10.1007/978-1-4615-5047-1_4.
- « BD TOPO@ | Géoservices ». s. d. Consulté le 13 février 2024. <https://geoservices.ign.fr/bdtopo>.
- Bechtel, Benjamin, Paul J. Alexander, Jürgen Böhner, Jason Ching, Olaf Conrad, Johannes Feddema, Gerald Mills, Linda See, et Iain Stewart. 2015. « Mapping Local Climate Zones for a Worldwide Database of the Form and Function of Cities ». *ISPRS International Journal of Geo-Information* 4 (1): 199-219. <https://doi.org/10.3390/ijgi4010199>.
- Bernard, Jérémy, Fredrik Lindberg, et Sandro Oswald. 2023. « URock 2023a: an open-source GIS-based wind model for complex urban settings ». *Geoscientific Model Development* 16 (20): 5703-27. <https://doi.org/10.5194/gmd-16-5703-2023>.
- Blazejczyk, Krzysztof, Yoram Epstein, Gerd Jendritzky, Henning Staiger, et Birger Tinz. 2012. « Comparison of UTCI to Selected Thermal Indices ». *International Journal of Biometeorology* 56 (3): 515-35. <https://doi.org/10.1007/s00484-011-0453-2>.
- « climate.onebuilding.org ». s. d. Consulté le 22 février 2024. <https://climate.onebuilding.org/>.
- « ENSIMS EPW Map Tool ». s. d. Consulté le 22 février 2024. <https://app.ensims.com/epw/>.
- « EPW Map ». s. d. Consulté le 22 février 2024. <https://www.ladybug.tools/epwmap/>.
- Goy, Solène, François Maréchal, et Donal Finn. 2020. « Data for Urban Scale Building Energy Modelling: Assessing Impacts and Overcoming Availability Challenges ». *Energies* 13 (16): 4244. <https://doi.org/10.3390/en13164244>.
- « Höppe: Ein neues Verfahren zur Bestimmung der mittleren... - Google Scholar ». s. d. Consulté le 13 février 2024. https://scholar.google.com/scholar_lookup?title=Ein%20neues%20Verfahren%20zur%20Bestimmung%20der%20mittleren%20Strahlungstemperatur%20im%20Freien%20a%20new%20method%20to%20determine%20the%20mean%20radiation%20temperature%20outdoors&publication_year=1992&author=P.%20H%C3%B6ppe.
- IGNcommunication. 2023. *Découvrez CoSIA, la Couverture du Sol par Intelligence Artificielle*. <https://www.youtube.com/watch?v=kDFb8cTWa1s>.
- « ladybug-tools/uwg ». (2017) 2024. Python. Ladybug Tools. <https://github.com/ladybug-tools/uwg>.
- Lindberg, Fredrik, Björn Holmer, et Sofia Thorsson. 2008. « SOLWEIG 1.0 – Modelling Spatial Variations of 3D Radiant Fluxes and Mean Radiant Temperature in Complex Urban Settings ». *International Journal of Biometeorology* 52 (7): 697-713. <https://doi.org/10.1007/s00484-008-0162-7>.
- « orbisgis/geoclimate ». (2019) 2024. Groovy. OrbisGIS. <https://github.com/orbisgis/geoclimate>.
- Pardyjak, Eric R., et Michael Brown. 2003. « QUIC-URB v1.1 - Theory and User's Guide ». Los Alamos National Laboratory. https://lanl.gov/projects/quic/open_files/QUICURB_UsersGuide.pdf.
- Ratti, Carlo, et Paul Richens. 1999. « Urban Texture Analysis with Image Processing Techniques ». In *Computers in Building: Proceedings of the CAADfutures'99 Conference. Proceedings of the Eighth International Conference on Computer Aided Architectural Design Futures Held at Georgia Institute of Technology, Atlanta, Georgia, USA on June 7–8, 1999*, édité par Godfried Augenbroe et Charles Eastman, 49-64. Boston, MA: Springer US. https://doi.org/10.1007/978-1-4615-5047-1_4.
- Rouault, Even, Frank Warmerdam, Kurt Schwehr, Andrey Kiselev, Howard Butler, Mateusz Łoskot, Tamas Szekeres, et al. 2024. « GDAL ». Zenodo. <https://doi.org/10.5281/ZENODO.5884351>.
- « Services Géoplateforme | Géoservices ». s. d. Consulté le 13 février 2024. <https://geoservices.ign.fr/documentation/services/services-geoplateforme>.
- Tartarini, Federico, et Stefano Schiavon. 2020. « pythermalcomfort: A Python package for thermal comfort research ». *SoftwareX* 12 (juillet): 100578. <https://doi.org/10.1016/j.softx.2020.100578>.
- Rouault, Even, Frank Warmerdam, Kurt Schwehr, Andrey Kiselev, Howard Butler, Mateusz Łoskot, Tamas Szekeres, et al. 2024. "GDAL." **Zenodo**. <https://doi.org/10.5281/ZENODO.5884351>.
- Services Géoplateforme | Géoservices. Consulté le 13 février 2024. <https://geoservices.ign.fr/documentation/services/services-geoplateforme>
- Tartarini, Federico, et Stefano Schiavon. 2020. "pythermalcomfort: A Python package for thermal comfort research." **SoftwareX** 12 (juillet): 100578. <https://doi.org/10.1016/j.softx.2020.100578>.

Réflexions sur la définition d'une démarche de validation expérimentale des modèles thermo-hygro-aérauliques urbains couplés intérieur/extérieur pour l'étude du confort et de la santé des personnes en période de forte chaleur

Lucie Merlier*¹, Auline Rodler², Teddy Gresse¹, Julie Soriano¹, Célia Sondaz³, Flavia Barone,⁴ Damien David¹, Frédéric Kuznik⁴, Bassam Moujalled², Marjorie Musy², Laure Roupioz⁵, Martin Hendel⁶, Emmanuel Bozonnet⁷, Marika Vellei^{8,9}

¹ Université Lyon 1, CNRS, INSA de Lyon, CETHIL UMR5008, 9, rue de la Physique 69621 Villeurbanne

² CEREMA, équipe BPE, rue Viviani 44200 Nantes cedex

³ CNRS, INSA de Lyon, Université Lyon 1, CETHIL UMR5008, 9, rue de la Physique 69621 Villeurbanne

⁴ INSA de Lyon, CNRS, Université Lyon 1, CETHIL UMR5008, 9, rue de la Physique 69621 Villeurbanne

⁵ ONERA, Université de Toulouse, 2 Av. Edouard Belin BP74025, 31055, Toulouse Cedex 4, France

⁶ Université Paris Cité, LIED UMR8236, 10, rue Alice Domon & Léonie Duquet 75013 Paris

⁷ La Rochelle Université, CNRS, LaSIE UMR7356, av. Michel Crépeau, F-17000 La Rochelle, France

⁸ Univ. Bordeaux, CNRS, Bordeaux INP, I2M, UMR 5295, F-33400, Talence, France

⁹ Arts et Metiers Institute of Technology, CNRS, Bordeaux INP, Hesam Université, I2M, UMR 5295, F-33400 Talence, France

[*lucie.merlier@insa-lyon.fr](mailto:lucie.merlier@insa-lyon.fr)

RESUME

Dans un contexte d'intensification des fortes chaleurs, en particulier dans les villes, la modélisation et la simulation numériques à l'échelle du bâtiment, de l'ilot et de la rue permettent d'étudier et de soutenir le développement de stratégies passives de rafraîchissement dans le but de préserver le confort thermique et la santé des personnes. Cette contribution analyse les besoins d'un travail de validation des modèles couplés intérieur/extérieur et discute différents retours d'expérience complémentaires issus de campagnes expérimentales en intérieur ou en extérieur, du point de vue de la validation des modèles numériques. L'objectif est de poser les bases d'un travail collectif visant à développer une campagne expérimentale in situ englobant les environnements intérieurs et extérieurs des bâtiments urbains, ainsi que le suivi des occupants, adapté à la validation des modèles couplés intérieur/extérieur. La démarche doit également garantir que les solutions de rafraîchissement, qu'elles concernent l'aménagement ou les bâtiments, sont correctement représentées dans les modèles.

MOTS-CLÉS : *Surchauffe urbaine, modélisation couplée intérieure/ extérieure, validation.*

ABSTRACT.

In a context of increasing extreme heat events, and particularly in cities, numerical modeling and simulation at the building block and street scales is a powerful means for studying and enabling the development of passive cooling strategies with the aim to preserve people's thermal comfort and health. This contribution analyses the needs of a validation work for coupled indoor/outdoor models, and discusses various feedbacks from indoor or outdoor experimental campaigns with the view of numerical model validation. The aim is to lay the foundations for a collective work aimed at developing a field experimental campaign encompassing building indoor and outdoor environments, as well as occupant monitoring, suitable for validating coupled indoor/outdoor urban models. This experimentation must also ensure that cooling solutions, whether urban or building-based, are properly represented in the models.

KEYWORDS : *urban overheating, indoor/outdoor coupled modeling, validation.*

1. INTRODUCTION

En ville, les surchauffes urbaines exacerbent généralement les effets délétères des vagues de chaleur sur le confort et la santé des personnes (Santamouris 2020; Santé Publique France 2022). Si les personnes passent aujourd'hui la grande majorité de leur temps à l'intérieur et que les réglementations thermiques successives ont conduit principalement à isoler les environnements intérieurs de l'extérieur, ces périodes de surchauffes re-questionnent aujourd'hui la conception, la gestion et les pratiques des espaces extérieurs et intérieurs. Les enjeux environnementaux et énergétiques contemporains amènent par ailleurs à repenser les relations intérieur/extérieur et à rechercher des stratégies de rafraîchissement passif tirant le meilleur parti des deux ambiances.

Différentes solutions de rafraîchissement urbain, grises (morphologie urbaine, revêtements réfléchissants...), vertes (végétalisation, désimperméabilisation...) et douces (adaptation comportementales) sont répertoriées dans la littérature (ADEME 2021). Les solutions passives de rafraîchissement à l'échelle des logements sont également assez bien connues (ventilation naturelle, occultation solaire, isolation thermique...). Cependant, la compréhension des effets sur le confort et la santé des personnes de ces solutions considérées dans leur contexte socio-spatial et leurs combinaisons possibles demeure aujourd'hui un enjeu de recherche, notamment en raison du caractère multiphysique, multiéchelles et multifactoriel des phénomènes à considérer. Dans ce contexte, la simulation numérique est un outil d'étude puissant, permettant de représenter une multitude de phénomènes physiques dans une infinité de scénarios et sur différentes échelles de temps, pour mieux appréhender et étudier les effets potentiels de stratégies de rafraîchissement. Différents types de modèles (Fig. 1) existent aujourd'hui, et peuvent être mobilisés en ce sens.

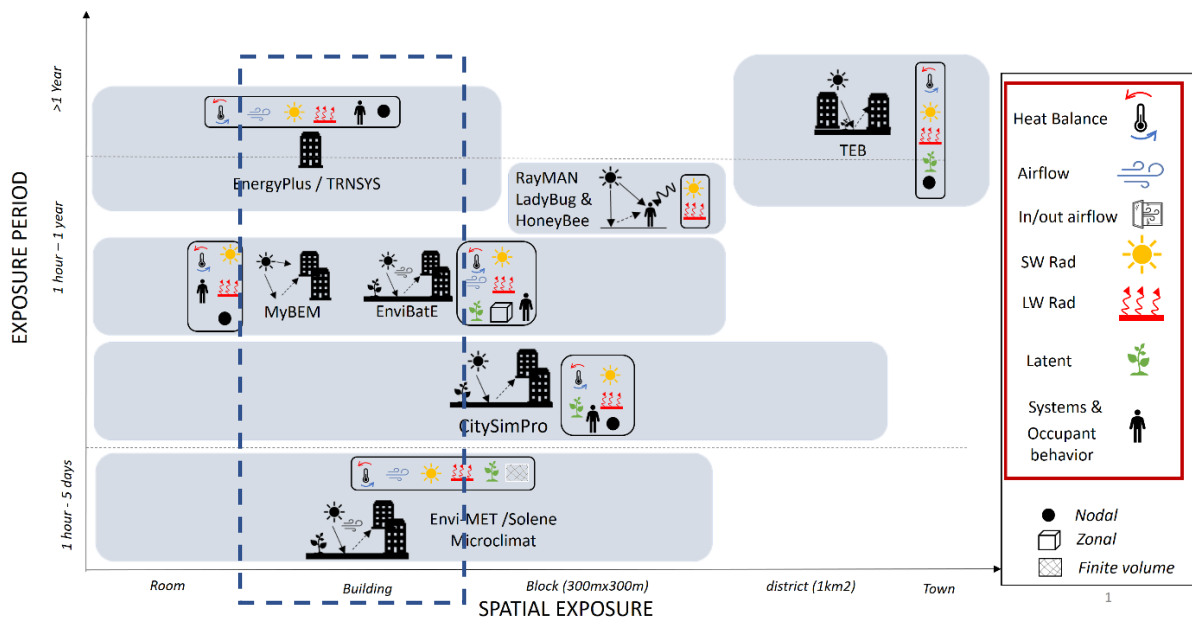


Figure 1: Exemples de modèles aujourd'hui disponibles dans la littérature (Barone 2024). Le cadre pointillé indique les modèles plus particulièrement visés dans cette contribution.

La complexité des phénomènes physiques déterminant les ambiances urbaines nécessite cependant de porter une attention particulière à la fiabilité des modélisations effectuées. Comme le soulignent les méthodologies proposées dans les BESTEST (Judkoff et Neymark 1995), Urban plumber (Lipson et al. 2024) ou, plus récemment, le projet DIAMS (Musy et al. 2023), la qualification des modèles de bâtiment ou de climat urbain est un aspect particulièrement critique d'une telle approche. La validation des modèles par comparaison à des données expérimentales en configuration réelle est généralement l'objectif final d'une telle démarche. Elle est cependant particulièrement complexe, en particulier lorsque les environnements intérieurs/extérieurs et leurs interactions sont considérés de façon équivalente. En effet, la plupart des données de mesure aujourd'hui disponibles se concentrent sur les environnements intérieurs ou extérieurs, la validation des modèles microclimatiques reste un enjeu pour la recherche, et le couplage entre les environnements rend le problème encore plus complexe. La suite de cette contribution propose ainsi 1/ de synthétiser les besoins spécifiques d'un tel travail de validation, 2/ de discuter différents retours d'expérience complémentaires issus de campagnes expérimentales en intérieur ou en extérieur, du point de vue de la faisabilité et de la validation des modèles numériques et 3/ de formaliser des points de vigilance en vue de développer une campagne expérimentale englobant les environnements intérieurs et extérieurs des bâtiments ainsi que le suivi des occupants, adapté à la validation des modèles couplés intérieur/extérieur capables d'évaluer les effets de solutions de rafraîchissement¹ sur le confort et la santé des personnes.

2. SPECIFICATION DES BESOINS

Une expérimentation in situ visant à valider une approche de modélisation telle que définie plus haut doit permettre l'accès à des données observables et représentatives du type de problème à étudier (environnements urbains en période forte chaleur). Ces données doivent permettre la quantification des différents transferts de chaleur dans les ambiances et à l'interface entre le bâtiment et son environnement: transferts radiatifs CLO et GLO, convection/advection, conduction/stockage de chaleur et évapo(transpi)ration. Ces transferts déterminent les ambiances thermo-hygro-aérauliques et le stress thermique des personnes, qui est le résultat final d'intérêt et qu'il convient donc d'évaluer pertinemment. Les protocoles expérimentaux doivent donc être adaptés aux multiples dynamiques temporelles d'intérêt : de l'ordre de la minute (temps de réaction de la température de peau) à plusieurs jours (effets cumulatifs d'une vague de chaleur sur les capacités thermorégulatrices et la tolérance de l'organisme), et à l'étendue des échelles spatiales concernées : du décimètre (segment humain) à la centaine de mètres (influence directe sur l'exposition des personnes). Notons cependant que les modèles existant aujourd'hui ne permettent souvent pas d'accéder aux informations les plus précises, pour lesquelles des

¹ On considèrera ici comme solution : la ventilation naturelle, la protection solaire, la végétalisation, et l'adaptation des revêtements de façade.

approches 3D et de type CFD LES doivent être mobilisées (Gresse 2023), et qu'il est compliqué d'avoir accès à des données en champs dans des campagnes expérimentales in situ. Le positionnement des mesures, souvent ponctuelles, doit donc être stratégique.

La cohérence de la comparaison entre études expérimentales et numériques nécessite de définir précisément (expérimentalement et numériquement) de nombreux paramètres et conditions aux limites. En particulier, la morphologie urbaine et bâtie, incluant les cloisonnements et ouvertures des logements, la constitution des infrastructures urbaines et structures des bâtiments, les propriétés des matériaux, des surfaces minérales et des végétaux ainsi que la modification de la configuration d'étude par les actions humaines (activation de systèmes passifs – notamment à l'interface intérieur / extérieur- ou utilisation de systèmes actifs émetteur de chaleur) déterminent le comportement du système. Ce comportement doit aussi être défini par une loi de comportement ou de contrôle des systèmes, et il dépend des conditions de températures, flux radiatifs, écoulements d'air et humidité aux limites de la zone d'étude, qui doivent donc être localement connues. Notons cependant que la connaissance complète de l'ensemble de ces données de paramétrisation est impossible dans les faits.

3. RETOURS D'EXPERIENCES

Cette contribution initiant un travail collectif à l'échelle nationale, une sélection de campagnes expérimentales réalisées in situ et sur une configuration idéalisée par les auteurs est discutée ici. Les tableaux 1 (principalement extérieur) et 2 (principalement intérieur) synthétisent les principales caractéristiques de celles-ci ainsi que certains de leurs avantages et limites identifiés vis-à-vis de l'objectif de validation de modèles intérieur/extérieur par comparaison avec des données réelles urbaines. Les tableaux 1 et 2 ne visent pas l'exhaustivité mais à illustrer, en toute transparence, l'étendue des possibilités offertes par les différents types de campagnes autant que la diversité des points de vigilance méthodologiques identifiés lors de leur réalisation.

Les résultats synthétisés mettent en évidence la diversité des approches permettant d'accéder à certaines données critiques pour la paramétrisation des modèles ainsi que sur les variables d'ambiance d'intérêt. On peut cependant remarquer sur ces exemples que les campagnes reposent pour la plupart sur des mesures ponctuelles, et qu'elles se sont principalement intéressées à l'extérieur ou à l'intérieur. Dans ce dernier cas, les conditions aux limites des bâtiments ont quand même été mesurées, mais à l'aide d'un nombre limité de mesures, ne permettant pas une description complète des sollicitations du bâtiment.

4. VERS UNE DEMARCHE DE VALIDATION EXPERIMENTALE ADAPTEE

Les sections précédentes ont synthétisé différents besoins, enjeux et contraintes liés à la mise en œuvre d'une démarche de validation des modèles numériques intérieur/extérieur capables d'étudier l'efficacité de solutions de rafraîchissement sur le confort et la santé des personnes par comparaison avec des données expérimentales de terrain. Les prérequis d'une telle approche sont dans l'idéal très nombreux.

Table 1: Avantages et limites de campagnes expérimentales portant principalement sur l'extérieur

5 rues canyon simplifiées à échelle réduite – Climabat (Djedjig et al.2015; Doya, et al.2012) – pour l'étude des effets de revêtements de façades de type 'cool paint' et enveloppes végétalisées sur le comportement transitoire des bâtiments (cycles jour/nuit). Mesures de températures de surface et d'air dans le plan médian des canyons et en intérieur + mesures de référence avec station météorologique sur des saisons complètes			
+	<ul style="list-style-type: none"> Configurations différentes étudiables simultanément dans les mêmes conditions (rues similaires mais adaptables) Très bonne connaissance de la configuration 	/!\	<ul style="list-style-type: none"> Configuration idéale sans occupant
Réseau de 30 stations météorologiques à Paris –réseau LUTECE (Parison, Hendel, et Royon 2020) - pour l'évaluation in situ du stress thermique de piéton dans le cadre de la mise en œuvre de techniques de rafraîchissement sur l'espace public. Mesures de température et humidité de l'air et température globe noir à 1.5m, de température de l'air, rayonnement solaire et vitesse/direction du vent à 4m, et température et flux stocké en profondeur dans les revêtements.			
+	<ul style="list-style-type: none"> Analyse possible par paire de stations, via une méthode d'analyse statistique Before-After-Control-Impact permettant d'évaluer les effets propres des solutions 	/!\	<ul style="list-style-type: none"> Mesures extérieures avec un unique mat par site
Campagne de mesures de températures de surfaces sur les façades et les espaces inter-bâtiments du campus de l'ISAE à Toulouse pour l'étude de leur variabilité spatiale – CAMCATT-AI4GEO (Roupioz et al. 2023)- pendant 15 jours en juin 2021. Mesures thermiques infrarouges aéroportées et par caméra et par 50 ibuttons.			
+	<ul style="list-style-type: none"> Données ponctuelles et de champ disponibles, y compris à l'interface bâtiment / environnement 	/!\	<ul style="list-style-type: none"> Fiabilité des ibuttons altérée par les abris ou les particularités de leur lieu d'implantation Profil de vitesse de vent en condition limite

Il s'agirait en effet de disposer d'un jeu de données complet : identification des propriétés thermiques-radiatives-climatiques nécessaires au paramétrage du modèle, mesure de l'action de l'occupant, mesure via une métrologie exhaustive de l'ensemble des flux et variables de sorties des modèles. Cette ambition est dans les faits souvent limitée par différentes contraintes pratiques. Il est donc utile de mettre en œuvre des démarches de qualification progressives et incrémentales telles que proposées dans le cadre du projet DIAMS (Musy et al. 2023), mobilisant des configurations simplifiées (comme Climabat) et des environnements réels représentatifs. En effet, pour la validation de modèles du point de vue physique, les expérimentations de laboratoire en conditions suffisamment maîtrisées sont bien appropriées car elles permettent d'accéder finement aux données observables en limitant les incertitudes. L'étude des ambiances pour une application au confort et à la santé nécessite cependant des expérimentations in situ, associant de nombreuses mesures physiques et des enquêtes, ainsi qu'une bonne connaissance de la configuration étudiée, d'autant plus si l'on souhaite évaluer des stratégies de rafraîchissement. Ceci est un enjeu majeur, notamment en ce qui concerne la connaissance des divers aménagements et matériaux (sol urbain, réseaux, disponibilité en eau en présence de végétal...) à l'extérieur, et des usages à l'intérieur.

Table 2: Avantages et limites de campagnes expérimentales portant principalement sur l'intérieur

Campagne de mesures dans différents logements et villes françaises – projet CREATIV (Hostein et al. 2022) - pour l'étude du confort thermique en été. Mesures des variables hygrothermiques (toutes les pièces) et extérieur (1/site) et de l'état des fenêtres, portes intérieures, brasseurs, et climatiseurs. Réalisation de questionnaires sur les ménages, leur confort et habitudes durant l'été 2022.			
+	<ul style="list-style-type: none"> Mesures à plusieurs endroits des logements et à l'extérieur Comportement d'ouverture des fenêtres en période chaude selon des paramètres contextuels et des environnements intérieurs et extérieurs 	/!\	<ul style="list-style-type: none"> Difficulté à obtenir des retours suffisants sur les questionnaires si structure inadaptée aux répondants et sur une trop longue durée
Campagne de mesures sur 4 logements à Lyon durant l'été 2020 (Toesca et al. 2022). Mesure de la température extérieure (1 capteur/logement), des température et humidité intérieures (1/pièce), ouverture des portes, fenêtres et volet du logement, complétée par les données des stations synoptiques de MétéoFrance.			
+	<ul style="list-style-type: none"> Mesures à différents endroits des logements et continuum rural/urbain/intérieur Effet de la gestion des portes sur le comportement des appartements traversant 	/!\	<ul style="list-style-type: none"> Manque de précision sur les degrés d'ouverture des ouvrants et volets, et sur l'occupation des logements Manque de représentativité « urbaine » des sollicitations des logements situés en étages élevés
Campagne de mesures sur 6 logements en milieu urbain lors des étés 2022 et 2023 – projet METEORS- pour évaluer l'ambiance intérieure et le comportement individuel. Mesures de températures, d'humidité et CO2 (1/pièce de vie) et de température extérieure sur les balcons, ouverture des fenêtres et volets. Réalisation d'entretiens, carnets de bord et suivi téléphonique intensif sur certaines journées			
+	<ul style="list-style-type: none"> Apport significatif du suivi téléphonique et des entretiens pour la paramétrisation des modèles Information sur l'occupation grâce à la concentration en CO2 modulée par la connaissance de l'ouverture des fenêtres 	/!\	<ul style="list-style-type: none"> Réduction de la qualité des mesures du fait de leur choix de localisation minimisant l'impact des capteurs sur le quotidien des habitants déjà fortement sollicités lors des campagnes avec les enquêtes

Concrètement, pour permettre la réalisation d'une validation pertinente par rapport à des données expérimentales in situ, les retours d'expérience montrent qu'il est nécessaire de porter une attention particulière /de développer des approches adaptées pour :

- réaliser un suivi précis du comportement des usagers et plus précisément de leurs comportements et actions sur le bâtiment pour l'étude des environnements intérieurs.
- choisir et positionner stratégiquement les différents types de capteurs en fonction des objectifs de qualité des mesures et des contraintes d'usages en site utilisé,
- concevoir des expériences ou recourir à des traitements des données permettant d'évaluer l'effet propre de solutions en conditions non maîtrisées, c'est-à-dire en s'affranchissant des différences induites par la variabilité des différents autres facteurs du problème (météo, ...),
- bien choisir les sites d'étude afin de garantir leur représentativité « urbaine », notamment au regard des comportements microclimatiques particuliers observés en milieu urbain dense et

impactant les sollicitation des objets étudiés (voir aussi (Liu et al. 2021)), et par extension de bien décrire les conditions aux limites des configurations étudiées.

De tels retours d'expérience, concrets et pratiques, sont précieux pour la démarche initiée dans cette contribution. Les éléments de réflexion présentés aux sections précédentes doivent cependant être complétés par des considérations sur les résolutions des mesures, entre autres, qui n'ont pas été abordées ici, compte tenu de leur dépendance au type de modèle à valider. Par ailleurs, d'autres retours d'expérience de validation de modèles, non détaillés dans cette contribution, soulignent également l'intérêt de disposer :

- de mesures des différents types de flux de chaleur, notamment aux surfaces des bâtiments,
- de mesures précises permettant l'estimation des débits de ventilation naturelle en configuration de convection forcée ou naturelle,
- de données sur les apports de chaleur anthropiques,
- et d'une grande variété d'informations relatives à la végétation (irrigation, espèces, indices foliaires...), dont l'étude du fonctionnement et la modélisation en milieu urbain contraint demeurent un sujet de recherche ouvert.

CONCLUSION

Cette contribution a discuté des besoins relatifs à la validation de modèles couplés intérieur/extérieur pour l'étude des effets des solutions de rafraîchissement sur le confort et la santé des personnes en milieu urbain. Les enjeux liés aux spécificités des différents modèles et aux contraintes de mise en œuvre pratiques lors de la réalisation de campagnes in situ ont été également abordées. Pour aller au bout de la démarche, la connaissance des facteurs et mécanismes qui déterminent la mise en œuvre ou non de stratégies de rafraîchissement par les personnes seraient également nécessaire, ce qui requiert de mettre en œuvre des études interdisciplinaires, en collaborant notamment avec les sciences humaines et sociales. Par exemple, si la ventilation naturelle peut limiter fortement les surchauffes internes dans des conditions météorologiques tempérées, elle n'est pas nécessairement mise en œuvre par les ménages, même lorsque les conditions intérieures sont thermiquement inconfortables (Vellei et al. 2017). Plus largement, le comportement des personnes, en termes d'action sur leur environnement ou de déplacement, dépend d'une multitude de facteurs multi-domaines et est souvent décisif sur leur exposition à la chaleur. Sa compréhension et sa modélisation en contexte de surchauffe constitue donc une perspective très importante.

5. BIBLIOGRAPHIE

- ADEME. 2021. « Rafraîchir les villes Des solutions variées ». 011441. Ils l'ont fait.
- Barone, Flavia. 2024. « Numerical assessment of heat stress in dwellings and immediate surroundings: development of a Microclimate Zonal Model coupled to Building Models ». These de doctorat, Lyon, INSA.

- Djedjig, Rabah, Emmanuel Bozonnet, et Rafik Belarbi. 2015. « Experimental study of the urban microclimate mitigation potential of green roofs and green walls in street canyons ». *International Journal of Low-Carbon Technologies* 10 (1): 34-44. <https://doi.org/10.1093/ijlct/ctt019>.
- Doya, Maxime, Emmanuel Bozonnet, et Francis Allard. 2012. « Experimental measurement of cool facades' performance in a dense urban environment ». *Energy and Buildings, Cool Roofs, Cool Pavements, Cool Cities, and Cool World*, 55 (décembre): 42-50. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.11.001>.
- Gresse, Teddy. 2023. « Développement et validation d'une modélisation thermo-aéroulque tridimensionnelle et dynamique du bâtiment pour l'étude des environnements thermiques intérieurs complexes ». These de doctorat, Lyon, INSA. <https://www.theses.fr/2023ISAL0018>.
- Hostein, M., B Moujalled, M Musy, et M El Mankibi. 2022. « Taking into account occupant behavior during heatwaves in building simulation ». In *CAT 2022*.
- Judkoff, R., et J. Neymark. 1995. « International Energy Agency Building Energy Simulation Test (BESTEST) and Diagnostic Method ». NREL/TP-472-6231. National Renewable Energy Lab. (NREL), Golden, CO (United States). <https://doi.org/10.2172/90674>.
- Lipson, Mathew J., Sue Grimmond, Martin Best, Gab Abramowitz, Andrew Coutts, Nigel Tapper, Jong-Jin Baik, et al. 2024. « Evaluation of 30 Urban Land Surface Models in the Urban-PLUMBER Project: Phase 1 Results ». *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 150 (758): 126-69. <https://doi.org/10.1002/qj.4589>.
- Liu, Zhixin, Wenwen Cheng, C. Y. Jim, Tobi Eniolu Morakinyo, Yuan Shi, et Edward Ng. 2021. « Heat mitigation benefits of urban green and blue infrastructures: A systematic review of modeling techniques, validation and scenario simulation in ENVI-met V4 ». *Building and Environment* 200 (août): 107939. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.107939>.
- Musy, Marjorie, Lucie Merlier, Auline Rodler, Frédéric Andre, et Ahmad Raessi. 2023. « Validation of urban microclimate models: toward a methodology ». août. in ICUC, Sydney, Australia
- Parison, Sophie, Martin Hendel, et Laurent Royon. 2020. « A statistical method for quantifying the field effects of urban heat island mitigation techniques ». *Urban Climate* 33 (septembre): 100651. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2020.100651>.
- Roupioz, L., X. Briottet, K. Adeline, A. Al Bitar, D. Barbon-Dubosc, R. Barda-Chatain, P. Barillot, et al. 2023. « Multi-source datasets acquired over Toulouse (France) in 2021 for urban microclimate studies during the CAMCATT/AI4GEO field campaign ». *Data in Brief* 48 (juin): 109109. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2023.109109>.
- Santamouris, M. 2020. « Recent progress on urban overheating and heat island research. Integrated assessment of the energy, environmental, vulnerability and health impact. Synergies with the global climate change ». *Energy and Buildings* 207: 109482. <https://doi.org/doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109482>.
- Santé Publique France. 2022. « Bilan canicule et santé : un été marqué par des phénomènes climatiques multiples et un impact sanitaire important ». 22 novembre 2022. <https://www.santepubliquefrance.fr/presse/2022/bilan-canicule-et-sante-un-ete-marque-par-des-phenomenes-climatiques-multiples-et-un-impact-sanitaire-important>.
- Toesca, Adrien, Damien David, André Kuster, Michel Lussault, et Kévyng Johannes. 2022. « An urban thermal tool chain to simulate summer thermal comfort in passive urban buildings ». *Building and Environment* 215 (mai): 108987. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.108987>.
- Vellei, Marika, Alfonso P. Ramallo-González, David Coley, Jeehang Lee, Elizabeth Gabe-Thomas, Tom Lovett, et Sukumar Natarajan. 2017. « Overheating in vulnerable and non-vulnerable households ». *Building Research & Information* 45 (1-2): 102-18. <https://doi.org/10.1080/09613218.2016.1222190>.

Ces travaux ont été initiés dans le cadre du projet ANR DIAMS soutenu par l'Agence Nationale de Recherche ANR-21-CE22-0010.

Création d'une typologie de surfaces urbaines basée sur des paramètres morpho-climatiques

Alexandre Merville^{1,2,*}, Auline Rodler¹, Thomas Leduc³, Marjorie Musy¹, Simon Rouchier²,

¹Equipe de Recherche BPE, CEREMA, Nantes, France

²LOCIE CNRS UMR 5271, Université Savoie Mont Blanc, Chambéry, France

³Nantes Université, ENSA Nantes, Ecole Centrale de Nantes, CNRS, AAU-CRENAU, UMR 1563, F-44000 Nantes, France

*alexandre.merville@cerema.fr

RÉSUMÉ. La modélisation des températures de surface est un des principaux verrous quant à la simulation de la température moyenne radiante. Cet article pose les bases d'une méthodologie permettant de répondre à ce verrou dans le cadre d'un outil rapide et précis, sans utiliser les moyens de simplifications usuelles (simplification du modèle physique ou du domaine d'étude). Pour cela, en partant des profils de température de surface des mailles au sol d'un quartier de la ville de Lyon, nous construisons une typologie de surfaces en cinq classes à l'aide d'un algorithme de classification k-means. Un arbre de décision attribuant une classe est ensuite créé à partir des facteurs de vue du ciel directifs (c'est-à-dire réduits à une partie du ciel selon l'orientation cardinale) d'un jeu d'entraînement composé de 80% des effectifs. Enfin, à partir du jeu de test composé des effectifs restants, nous mesurons le pouvoir prédictif de notre approche par classification qui atteint 80%.

MOTS-CLÉS. Température de surfaces urbaines, typologie, morphologie urbaine

ABSTRACT. Modeling surface temperatures is one of the main challenges in simulating mean radiant temperature. This article lays the groundwork for a methodology that will overcome this obstacle within the framework of a fast and accurate tool, without resorting to the usual techniques of simplification, such as simplifying the physical model or study domain. Based on their temperature profiles, we constructed a five-class surface typology using a k-means classification algorithm. A decision tree assigning a cluster is then created from directive Sky View Factor (i.e. reduced to a part of the sky according to cardinal orientation) from a training set composed of 80% of the meshes. Finally, we measure the predictive ability of our classification approach which reaches 80% on the basis of the test set made up of the remaining workforce.

KEYWORDS. Urbans surfaces temperatures, typology, urban morphology

1. INTRODUCTION

La prise en compte du confort thermique extérieur, et notamment de sa contribution radiative représentée par la température moyenne radiante (T_{mrt}), prend une part de plus en plus importante dans les projets urbains. Un état de l'art a permis de faire une comparaison des outils de simulation de la T_{mrt} (Merville et al., 2023). Ce travail a mis en avant des modèles simplifiés plus adaptés à la conception (rapides, simples à prendre en main, nécessitant peu de données) pour une utilisation par différents acteurs de la ville. Il a aussi permis de montrer que la modélisation de la température de surface dans de tel outils représente la principale limite à leur correcte caractérisation de l'environnement radiatif.

Trois solutions sont possibles pour réduire le temps de calcul : la réduction du domaine d'étude, la simplification du modèle ou l'emploi d'une méthode numérique de réduction de modèle. Afin de garder un modèle de surfaces précis, la troisième méthode est à privilégier. En testant des méthodes de réduction de modèles, Azam et al. (Azam et al., 2018) ont cependant conclu que la limite de ces méthodes est la variété des sollicitations et des caractéristiques des surfaces urbaines, qui complexifient les problématiques d'apprentissage des modèles créés. La création de typologies de surfaces peut permettre d'utiliser ces méthodes ou plus simplement de proposer de nouveaux modèles de surface sur la base de profils moyens.

Cette communication présente les premiers résultats d'un travail de typologie de surfaces extérieures basée sur leur profil de température.

2. MÉTHODE

La méthodologie générale est présentée en figure 1.

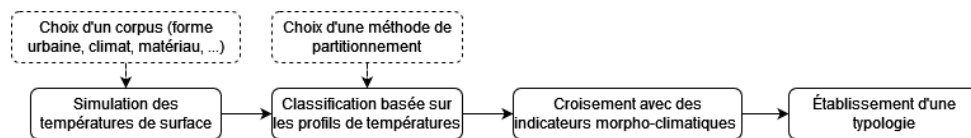


Figure 1 : Création d'une typologie de surface

2.1. SIMULATION DES TEMPÉRATURES DE SURFACE

Afin de construire une typologie applicable dans le cas le plus général possible, il est nécessaire de disposer d'un corpus de profils de température représentatif des conditions d'utilisation souhaitées pour le modèle réduit. N'ayant pas accès à une base de données de mesures suffisamment importante, nous avons choisi de passer par une phase de simulation pour générer un corpus de données synthétiques. Le modèle SOLENE-microclimat (Musy et al., 2015) est utilisé pour réaliser les simulations. Ce modèle propose une représentation fine des échanges radiatifs et son modèle thermique (analogie électrique RC) est une solution très employée dans la littérature (Merville et al., 2023). Pour les simulations, nous utilisons des maquettes représentatives de la diversité morphologique (densité bâtie, hauteur, forme, etc.), des bâtiments français en prenant en compte une variété de matériaux et revêtements urbains.

2.2. CLASSIFICATION ET CROISEMENT

Le choix d'une méthode de classification pour partitionner les mailles (triangulaires) selon leur profil de température représente un point clé de ce travail. De nombreuses méthodes existent et sont utilisées dans divers contextes : k-means, algorithmes hiérarchiques, algorithmes à densité, passage ou non par une analyse en composantes principales, etc. Ce travail s'inscrit dans un cadre particulier de classification car nous traitons des données dynamiques (profils de températures sur une journée) (Warren Liao, 2005).

Afin de déterminer la méthode la plus adaptée à notre étude, nous nous baserons sur trois critères :

- La comparaison d'indices de validation, ou CVI (*Cluster Validity Indices*). Ces indices permettent de mesurer la qualité des classes (Bourdeau et al., 2021).
- La visualisation des différents profils de température par classe : les classes sont-elles

bien formées ? Ont-elles des comportements spécifiques ?

- La visualisation de l’attribution des mailles (observation de l’attribution des classes sur la maquette) : la répartition des classes sur la maquette est-elle descriptible ? Coïncide-t-elle avec d’autres paramètres observables (orientation, facteur de vue du ciel, etc.) ?

Dans le but de borner notre étude, nous nous limitons à la comparaison de plusieurs méthodes ayant été éprouvées par la littérature. Nous étudions ainsi un algorithme agglomératif et un k-means (distance euclidienne) en le précédant - ou non - d’une analyse en composante principale. Enfin, le choix du jeu de données analysé fait l’objet d’une attention particulière : si la prise en compte directe de l’ensemble du corpus (les mailles de la maquette) dans un même algorithme peut être intéressant d’un point de vue méthodologique, il peut s’avérer plus efficace de partitionner « à la main » (lors d’un prétraitement dédié) notre jeu de donnée (sur la base d’une expertise, à partir de propriétés connues, telles que l’orientation ou les matériaux).

Une fois le partitionnement réalisé, les classes pourront être établies sur la base de paramètres morpho-climatiques connus : propriétés thermo-radiatives, hauteur des bâtiments, orientation, facteur de vue du ciel (*Sky View Factor* ou SVF), etc. Cette étape se basera sur la construction d’un arbre de décision et la recherche des paramètres les plus pertinents. Il est à noter que nous privilégions en premier lieu une méthodologie utilisant l’expertise plutôt qu’une approche utilisant un plus grand nombre d’indicateurs. De la même manière que pour le choix de l’algorithme, nous nous basons au maximum et à chaque étape sur de l’observation : la distribution d’un certain indicateur permet-elle d’expliquer l’attribution dans une classe ? L’observation d’une caractéristique sur la maquette coïncide-t-elle avec l’observation des classes ?

3. PHASE EXPLORATOIRE

3.1. CADRE DE L’ÉTUDE

Afin d’élaborer la méthodologie d’ensemble, une phase exploratoire a été nécessaire. Elle a eu pour but de développer les outils requis par notre travail, préciser la méthodologie et sélectionner des indicateurs morpho-climatiques permettant d’expliquer la classification et sur lesquels se baseront notre typologie. Pour cela, nous nous sommes intéressés au quartier de la Buire, à Lyon. Ce choix a été motivé par des raisons méthodologiques (maquette suffisamment simple pour une première approche, présence de végétation, espaces plus ou moins ouverts, représentative des tendances de constructions actuelles) et des raisons pratiques (la maquette étant déjà réalisée dans le cadre d’un autre projet (Musy et al., 2017)).

Les températures de surface ont été simulées sur deux jours avec un pas de temps horaire, sur la base de données météorologiques acquises à Lyon les 25 et 26 juillet 2019 dans des conditions de ciel clair et de faible vent. Seuls les profils de température du 2e jour sont conservés pour l’analyse, limitant l’impact des conditions initiales. Tout le bâti (sol/toit/mur) est composé des mêmes matériaux. Tous les sols possèdent le même albédo (0.15). Les toits sont répartis dans deux familles avec des albédos différents (0.15 et 0.4), et enfin les murs sont répartis dans sept familles différentes avec des albédos compris entre 0.2 et 0.8. Les émissivités sont fixées à 0.9.

3.2. RECHERCHE D’UN ALGORITHME DE PARTITIONNEMENT

Aucun pré-traitement n’a été appliqué au jeu de données. Les données sont toutes de même nature et d’ordres de grandeur comparables (entre 20 et 80°C) ce qui justifie de ne pas les centrer-réduire. Les données étant issues d’une simulation, elles ne sont pas lacunaires et sont uniformément réparties avec un pas de temps horaire (en temps universel UTC).

3.2.1. Restriction du jeu de données

En première approche, l'ensemble du jeu de données (les profils des 30 000 mailles de la maquette) a été analysé. Le 3^e critère évoqué précédemment nous a motivé à mettre de côté cette solution. En effet dans ce cas et pour différentes méthodes, les mailles des toits et des murs sont discernables (selon l'orientation ou l'albédo) tandis que les mailles au sol semblent être décrites de manière très chaotiques : dans une rue entre deux bâtiments, une maille et ses voisines peuvent relever de classes différentes.

Ce constat nous a poussé à partitionner à la main en première étape. Dans la suite, nous étudieront indépendamment les sols, les murs et les toits. Au vu de ces premiers résultats, ce sont les mailles du sol qui demandent l'étude la plus fine, et qui font l'objet d'une description détaillée dans cet article. Un rapide travail sur les murs les affectent dans quatre classes selon leur orientation et les toits en 2 classes selon les deux albédos présents.

3.2.2. Étude des mailles du sol

Plusieurs algorithmes sont testés sur les 7 285 mailles de sol extraites du reste du jeu de données, et leurs CVI sont calculés afin de choisir la méthode de classification la plus pertinente. La figure 2 présente les résultats de plusieurs de ces indicateurs pour un algorithme k-means avec distance euclidienne, le même algorithme après une analyse de composante principale et enfin un algorithme hiérarchique agglomératif (appelés respectivement kmeans, kmeans_pca et agglo).

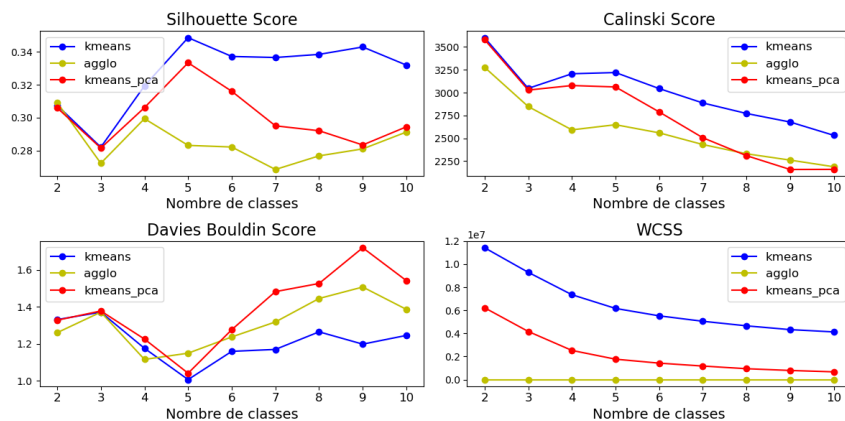


Figure 2 : CVI en fonction de la méthode et du nombre de classes

Aucune cassure de la courbe de WCSS (*within-cluster sum of squares*) n'est discernable et ne permet donc pas d'utiliser ce critère. Davies Bouldin est à minimiser tandis que Silhouette et Calinski sont à maximiser. Pour ces deux derniers, c'est le choix d'un algorithme k-means sans PCA à 5 classes qui est mis en avant. Un maximum local est aussi présent pour Calinski même si le maximum global est obtenu pour 2 classes avec un k-means (avec ou sans PCA). C'est donc sur ce premier choix que se base la suite de nos travaux, choix devant être éprouvé par l'observation des profils et de la maquette.

3.3. PARTITIONNEMENT ET QUALIFICATION DES CLASSES

La figure 3 affiche, pour chaque classe, tous les profils de températures des surfaces appartenant à la classe et le profil moyen correspondant. Une moyenne glissante (moyenne sur trois pas

de temps consécutifs : $h-1$, h et $h+1$) est appliquée à l'ensemble des profils. Ce choix est motivé par un meilleur rendu des profils (en l'occurrence un effet de lissage). La figure 4 présente la répartition des différentes classes sur la maquette elle-même (visualisation via paraview).

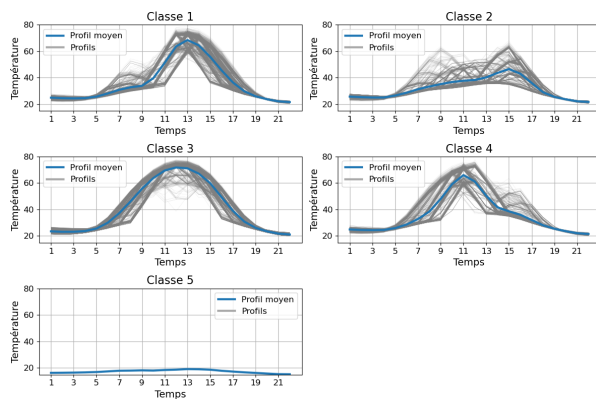


Figure 3 : Moyenne glissante (sur 3 pas de temps consécutifs) des profils de température (en °C)

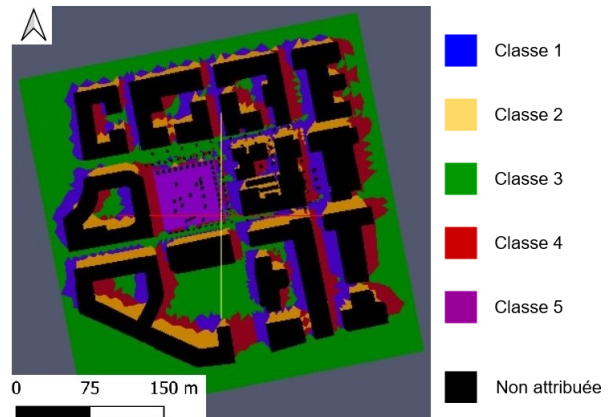


Figure 4 : Répartition des classes - k-means à 5 classes

La classe 5 est facilement discernable car elle correspond au parc. Nous considérons que cette classe est suffisamment bien décrite par cette information et qu'elle ne nécessite donc pas d'être décrite par d'autres paramètres : cette classe est mise de côté pour la suite.

Les quatre autres classes sont moins bien dessinées mais quatre tendances se dégagent néanmoins : une classe avec une allure de gaussienne centrée à 12h, deux classes ayant des comportements symétriques par rapport à l'axe donné à 12h avec une gaussienne avant ou après cet axe. Enfin, la dernière classe regroupe les profils qui limitent la température tout le long de la journée. Nous en déduisons ainsi quatre comportements types :

- Surchauffe d'après midi : classe 1
- Sans surchauffe particulière : classe 2
- Surchauffe méridienne : classe 3
- Surchauffe matinale : classe 4

Nous pouvons remarquer que la place des mailles par rapport aux bâtiments semble jouer un rôle prépondérant dans l'attribution d'une classe. En observant la situation des surfaces par rapport aux masques des bâtiments et à leur orientation, nous pouvons décrire de manière simple les quatre classes : les mailles de la classe 1 voient très bien la part ouest de l'hémisphère de ciel mais pas sa part est, la classe 4 est son symétrique, les mailles de la classe 2 voient la part nord mais pas sa part sud. Enfin, les mailles de la classe 4 voient la part sud. Ce constat nous a conduit à calculer les SVF directs, tels que déjà proposés dans UMEP (Lindberg and Grimmond, 2011) : un SVF par quart de ciel (nord, sud, est, ouest).

3.4. PASSAGE DE SOLENE À UMEP

Aucun outil n'existe actuellement dans SOLENE qui permet de réaliser le calcul des SVF directs. Nous avons choisi de calculer ces indicateurs dans UMEP. La figure 5 décrit la procédure permettant d'attribuer à chaque maille de la maquette SOLENE les quatre valeurs de SVF directs. Il est à noter que les étapes UMEP peuvent être réalisées sur QGIS ou sur un environnement python. t4gpd (<https://t4gpd-docs.readthedocs.io/>) est utilisé ici. Il s'agit d'une bibliothèque python d'analyse spatiale complémentaire à GeoPandas ou Shapely. Les fonctions

utilisées ici ont été développées pour ce travail.

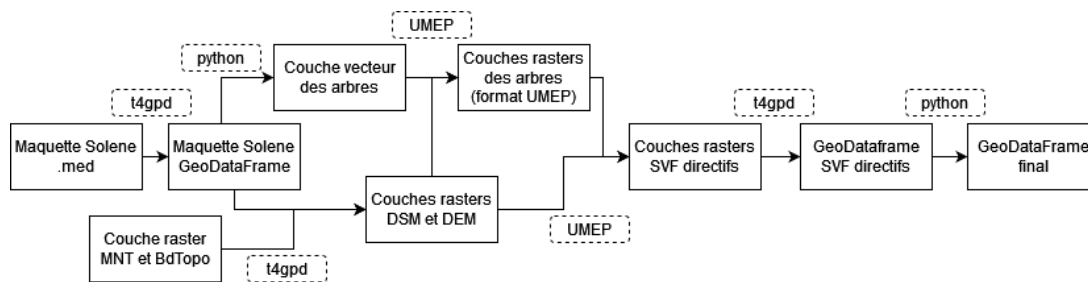


Figure 5 : Méthode du calcul des SVF directs à partir d'une maquette .med de SOLENE

Cette bibliothèque permet de charger et reprojeter, dans un système de coordonnées approprié, la scène urbaine (maquette SOLENE) ainsi que des données topographiques et altimétriques. Le *GeoDataFrame* correspondant à la maquette peut alors être converti en couches DSM et DEM (respectivement *modèles numériques de surface* et *modèle numérique d'élévation*), qui sont ensuite fournies à la fonction « *Urban Geometry : Sky View Factor* » d'UMEP. Les couches rasters issues de ce traitement sont ensuite reconverties en *GeoDataFrame* par t4gpd. Enfin, des valeurs de SVF directs sont associées à chaque maille de la maquette SOLENE par proximité à leur centre de gravité.

3.5. DISTRIBUTION DES SVF DIRECTIFS ET ARBRE DE DÉCISION

Une fois ce processus terminé, nous obtenons la distribution des différents SVF au sein des classes, comme présentée sur la figure 6 pour les classes 1 et 2 (la classe 4 est à peu de choses près symétrique à la 1, et la 3 présente uniquement des SVF très proches de 1).

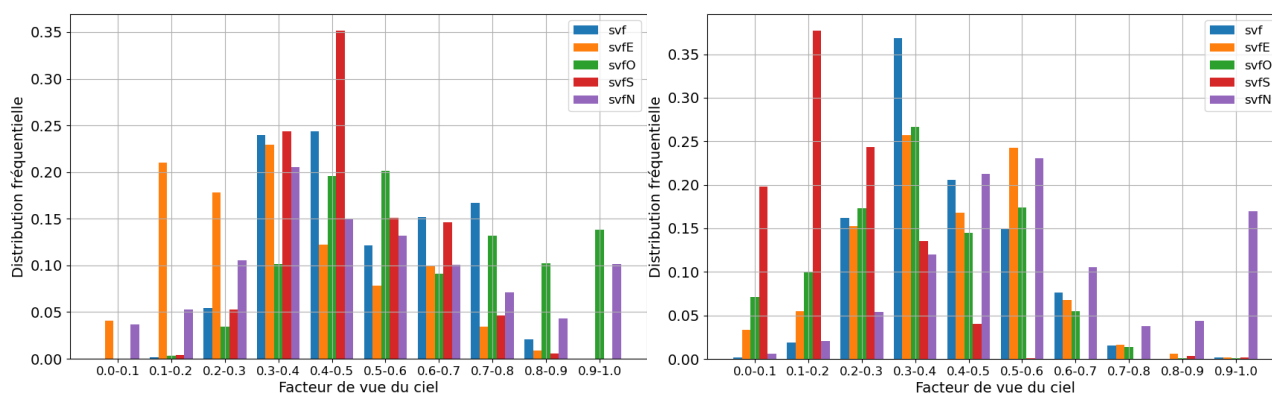


Figure 6 : Distribution des SVF au sein des classes 1 (à gauche) et 2 (à droite)

On observe des distributions clairement distinctes pour chaque classe, qui peuvent alors être décrites via l'usage de ces indicateurs :

- Classe 1 : faible SvfE, fort Svfo
- Classe 2 : faible SvfS, fort Svfn
- Classe 3 : tous les SVF sont proches de 1
- Classe 4 : faible Svfo, fort Svfe

Nous observons donc que, comme pressenti, les classes peuvent être expliquées par les SVF directs ce qui nous motive à construire notre typologie sur la base de ces indicateurs. A l'aide

de la bibliothèque python scikit-learn, un arbre de décision a été créé à partir d'un jeu d'entraînement composé de 80% des mailles. Les paramètres pris en compte ont été les cinq SVF, soit le SVF standard et les quatre SVF directs. Testé pour un jeu de test (les 20% de mailles restantes), l'arbre attribue correctement une classe à 80% de ce jeu de test. Le poids des cinq indicateurs a été évalué : la part sud de l'hémisphère de ciel contribue à hauteur de 42% à l'arbre de décision (tandis que la part est et ouest contribue à hauteur de 18% chacune).

4. PERSPECTIVES ET CONCLUSION

4.1. GÉNÉRALISATION DE LA MÉTHODOLOGIE

Compte tenu des enseignements de la phase exploratoire, il nous paraît pertinent de déployer notre méthode sur un jeu de données plus grand et varié. En effet, il est nécessaire construire une typologie représentative des différents types de tissus urbains. Le choix a cependant été fait de se limiter aux zones résidentielles. Nous nous sommes appuyés sur la typologie morphologique réalisée par Joshi et al. (Joshi et al., 2022). Nous faisons l'hypothèse que la ville de Liège (près de 200 000 habitants répartis sur un territoire de 70 km²) contient toutes les morphologies urbaines que l'on peut rencontrer en France ou en Belgique.

La diversité des matériaux est aussi à prendre un compte. Pour chaque morphologie, nous avons fait le choix d'une façade et d'une toiture dans un scénario « ancien » et un scénario « récent » basés sur les données TABULA (Loga et al., 2016) en considérant des rénovations standards. L'objectif étant de ne pas construire les classes sur des données potentiellement inconnues (matériaux précis, date de construction, type de rénovation, etc.), cette hypothèse simplificatrice répond avant tout à un besoin pratique de modélisation. L'émissivité est fixée à 0.9 pour toutes les surfaces. Pour les valeurs d'albédo, nous nous sommes basés sur les bases de données spectrales CAMCATT (Roupioz et al., 2023) afin de proposer, pour chaque famille, plusieurs valeurs possibles comme celles présentées en tableau 1.

Albédo mur	Albédo toit	Albédo parcelle	Albédo route
0,1 - 0,45 - 0,8	0,1 - 0,3 - 0,5	0,1 - 0,3 - 0,5	0,15

Tableau 1 : Valeurs d'albédo prises par les différents groupes de surfaces

A ce stade, nous faisons l'hypothèse que notre typologie sera peu sensible au climat. Nous comptons ainsi réaliser les simulations et construire la typologie pour un certain climat (i.e. en choisissant un fichier climatique pour une ville), puis vérifier la sensibilité du classement en utilisant le fichier climatique d'une seconde ville. Concernant la donnée météorologique, nous nous limitons ainsi à une période de canicule et une période d'été classique. Ces hypothèses admettent une limite forte : si un méta-modèle décrit le comportement de l'ensemble des mailles d'une classe à partir du profil moyen, il est prévisible que l'amplitude de ce profil dépende du climat et qu'il doive être corrigé pour un autre climat.

Le plan d'expérience est finalement généré à partir de la méthode *d-optimal* (Goupy and Creighton, 2006). Elle nous conduit à mener, pour chaque morphologie et chaque fichier météo, 12 simulations faisant varier albédos et scénario récent/ancien. Ce travail est en cours de réalisation.

4.2. CONCLUSION

Les premiers résultats obtenus sont très encourageants quant à la création d'une typologie de surfaces. Basée sur la simulation et donc sur une considération détaillée du problème physique

(couplage radiatif et thermique), cette typologie pourra dans un second temps être exploitée dans le but de construire des méta-modèles (ou modèles réduits) de températures de surface. Particulièrement dépendant des conditions d'apprentissage, ce type d'approche doit être enrichi afin d'établir des modèles applicables dans le plus grand nombre de situations possibles.

REMERCIEMENTS

Ce projet de recherche a été financé par l'ADEME et Oteis. Les auteurs remercient l'ANR pour le soutien financier du projet PerméPolis ANR-23-CE22-0015-01.

BIBLIOGRAPHIE

- Azam, M.-H., Guernouti, S., Musy, M., Berger, J., Poullain, P., and Rodler, A. (2018). A mixed POD–PGD approach to parametric thermal impervious soil modeling : Application to canyon streets. 42 :444–461.
- Bourdeau, M., Basset, P., Beauchêne, S., Da Silva, D., Guiot, T., Werner, D., and Nefzaoui, E. (2021). Classification of daily electric load profiles of non-residential buildings. 233 :110670.
- Goupy, J. and Creighton, L. (2006). *Introduction aux plans d'expériences (3e édition)*. Technique Et Ingenierie ; Conception. Hachette, dunod edition.
- Joshi, M. Y., Rodler, A., Musy, M., Guernouti, S., Cools, M., and Teller, J. (2022). Identifying urban morphological archetypes for microclimate studies using a clustering approach. 224 :109574.
- Lindberg, F. and Grimmond, C. S. B. (2011). The influence of vegetation and building morphology on shadow patterns and mean radiant temperatures in urban areas : model development and evaluation. 105(3) :311–323.
- Loga, T., Stein, B., and Diefenbach, N. (2016). TABULA building typologies in 20 european countries—making energy-related features of residential building stocks comparable. 132 :4–12.
- Merville, A., Rodler, A., Musy, M., Rouchier, S., and Dufrasnes, E. (2023). A multi-criteria review of mean radiant temperature evaluation models for urban thermal comfort. 2600(9) :092020.
- Musy, M., Maillard, P., Azam, M.-H., Bailly, J.-B., Barel, E., Bozonnet, E., Calmet, I., Gros, A., Inard, C., Morille, B., Mouquet, D., Smadi, I., Tavares, R., and Zaba, S. (2017). EVA (Eau, Végétation, Albédo) Evaluation quantitative de l'impact sur le microclimat, les consommations énergétiques des bâtiments et le confort intérieur et extérieur de trois principes de rafraîchissement urbain. Application au quartier de la Part-Dieu à Lyon. Research report, ADEME ; IRSTV FR CNRS 2488.
- Musy, M., Malys, L., Morille, B., and Inard, C. (2015). The use of SOLENE-microclimat model to assess adaptation strategies at the district scale. 14 :213–223.
- Roupioz, L., Briottet, X., Adeline, K., Al Bitar, A., Barbon-Dubosc, D., Barda-Chatrain, R., Barillot, P., Bridier, S., Carroll, E., Cassante, C., Cerbelaud, A., Déliot, P., Doublet, P., Dupouy, P., Gadal, S., Guernouti, S., De Guilhem De Lataillade, A., Lemonsu, A., Llorens, R., Luhahe, R., Michel, A., Moussous, A., Musy, M., Nerry, F., Poutier, L., Rodler, A., Riviere, N., Riviere, T., Roujean, J., Roy, A., Schilling, A., Skokovic, D., and Sobrino, J. (2023). Multi-source datasets acquired over toulouse (france) in 2021 for urban microclimate studies during the CAMCATT/AI4geo field campaign. 48 :109109.
- Warren Liao, T. (2005). Clustering of time series data—a survey. 38(11) :1857–1874.

Développement d'un moyen d'essai pour l'étude du comportement thermo-aéraulique d'un local électrique

Rafik Moulouel^{*1,2,3}, Maxime Houvin¹, Pascal Borel¹, Marc Abadie^{2,3}, Patrick Salagnac^{2,3}

¹EDF R&D-PRISME, 6 quai Watier – 78400 Chatou

²LaSIE (UMR CNRS 7356) – La Rochelle université

³Laboratoire Commun 4evLab, CNRS - EDF R&D - LaSIE

*rafik.moulouel@edf.fr

RESUME : Cet article présente un nouveau moyen d'essais conçu par EDF-R&D pour étudier les phénomènes thermo-aérauliques dans les locaux de centrales nucléaires abritant des équipements électriques.

Le local d'essai est à l'échelle réelle avec des murs en béton, couvrant une superficie de 40 m² et équipé d'une ventilation mécanique. Plusieurs armoires électriques sont placées à l'intérieur de la pièce pour simuler la dissipation de chaleur des équipements électriques. La cellule d'essai est fortement instrumentée pour permettre la réalisation d'expériences dans des conditions maîtrisées afin de valider les modèles numériques.

Les mesures de température dans les murs en béton et dans l'air sont effectuées à l'aide de fibres optiques exploitant la rétrodiffusion Raman, permettant des reconstructions détaillées des champs de température 3D dans le volume. Les flux convectifs et radiatifs dans les murs sont également mesurés aux parois internes et externes du local à l'aide de 66 fluxmètres de différentes émissivités, distribués de manière symétrique selon la hauteur de chaque mur.

L'article présente une étude de cas détaillée s'étendant sur quatre jours, au cours duquel le régime permanent est atteint. Les données enregistrées ont permis l'analyse du comportement thermo-aéraulique de ce local d'essai et de mettre en évidence la cohérence des mesures, validant ainsi la capacité de l'installation à fournir des données de référence fiables.

MOTS-CLÉS : Instrumentation, ventilation, modélisation

ABSTRACT: This article presents a new testing facility developed by EDF-R&D to study thermo-aeraulic phenomena in nuclear power plant rooms housing electrical equipment.

The full-scale testing facility is built with concrete walls, covering an area of 40 m² and equipped with mechanical ventilation. Several electrical cabinets are placed inside the room to simulate the heat dissipation from electrical equipment. The test cell is instrumented to allow experiments to be carried out under controlled conditions for validating numerical models.

Temperature measurements in the concrete walls and in the air are performed using optical fibers exploiting Raman backscattering, enabling detailed 3D temperature field reconstructions within the volume. Convective and radiative heat fluxes at the walls are also measured at the internal and external surfaces of the room using 66 heat flux sensors with different emissivities, symmetrically distributed along the height of each wall.

This article presents a detailed case study spanning four days, during which steady-state conditions are achieved. The recorded data allows the analysis of the thermal behavior of this test facility and highlight the consistency of multiple measurements, thus validating the installation's capability to provide reliable reference data.

KEYWORDS : Instrumentation, ventilation, thermal modeling

1. INTRODUCTION

Afin de disposer de données de référence sur les phénomènes thermo-aérauliques dans les salles abritant des équipements électriques thermosensibles, une installation expérimentale représentative des locaux électriques ou de commande de centrales nucléaires a été conçue au laboratoire ZEPHYR par EDF-R&D. Cette installation à l'échelle réelle, instrumentée, permet de cartographier les champs de température dans les murs et dans l'air, facilitant la réalisation d'expériences dans des conditions maîtrisées pour valider des modèles numériques 0D/1D et 3D. Diverses configurations de ventilation peuvent être testées, intégrant différents paramètres : débits, températures de soufflage et extérieure, vitesse de soufflage et charges thermiques des armoires. Les données d'essais servent à améliorer la robustesse des modèles numériques dans les états transitoires et stationnaires. Ces modèles peuvent ensuite être utilisés pour réaliser des études plus avancées

Le Local Témoin, illustré sur la Figure 1, comprend un local d'essai avec des parois en béton couvrant une surface de 40 m². Il dispose d'une ventilation mécanique, comprenant une entrée d'air et une sortie d'air situées sur des parois opposées. Il est équipé d'armoires électriques expérimentales, fermées et naturellement ventilées, dissipant la chaleur de plusieurs résistances électriques réparties selon la hauteur des armoires.

Pour maîtriser les conditions limites externes du local d'essai, une deuxième enceinte isolée conditionne l'espace entre les enceintes à l'aide d'une ventilation auxiliaire, assurant l'uniformité des températures de l'air.

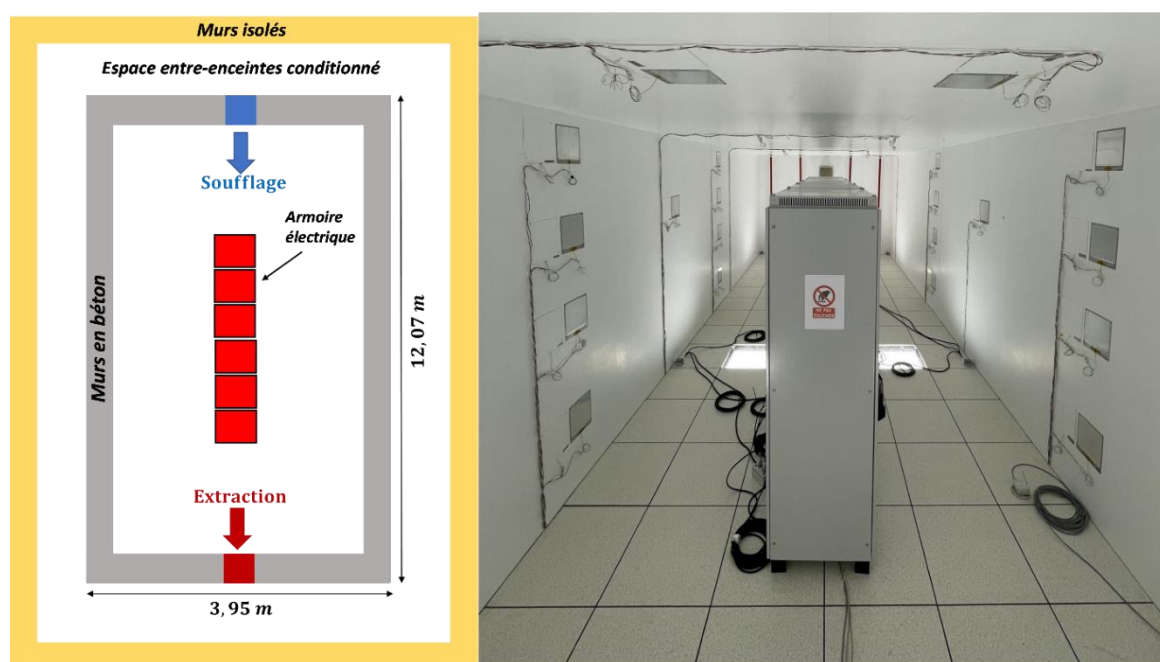


Figure 1 : Photographie et schéma du Local Témoin CNPE.

2. INSTRUMENTATION DU LOCAL TÉMOIN

La mesure de température dans les murs et dans l'air de ce local d'essai repose principalement sur des fibres optiques exploitant l'effet Raman [1]. Cette technologie est robuste et facile à mettre en œuvre. Cette mesure répartie permet de disposer de plusieurs points de mesure sur la même fibre, avec un pas d'échantillonnage de 12,6 cm. L'incertitude d'une mesure ponctuelle est d'environ 0,7 °C, avec un facteur d'élargissement (k) de 2 (incertitude valable uniquement dans le cadre d'application spécifique de ce moyen d'essai).

2.1. MESURE DE LA TEMPERATURE DES MURS

Environ 1 km de fibres optiques, équivalant à environ 8000 points de mesure, sont installés dans les murs et le plafond du local à différentes hauteurs et profondeurs, comme illustré sur la Figure 2. Les fibres centrales et intermédiaires ont été tendues sous les barres de fer avant que le béton ne soit coulé. Les fibres à la surface des murs ont été fixées à l'intérieur de rainures, recouvertes d'enduit. Des sondes Pt100 auto-étalonnables enfouies dans les murs en béton sont utilisées pour surveiller les éventuelles dérives des mesures des fibres optiques.

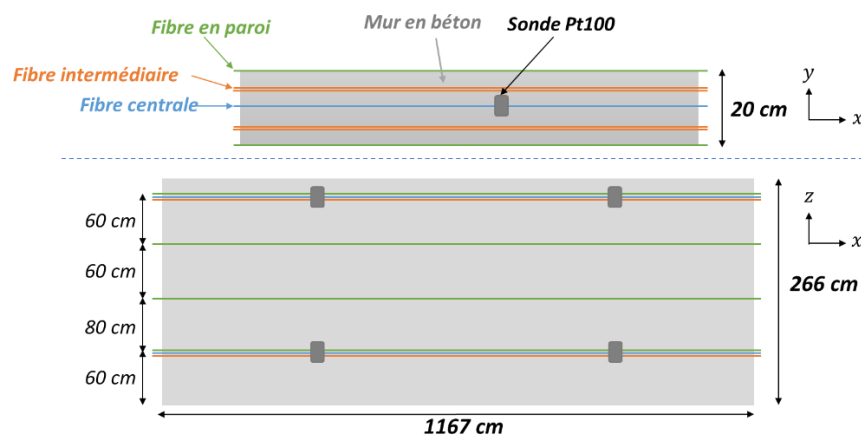


Figure 2 : Schéma des fibres optiques dans les murs en béton du Local Témoin.

Le recalage spatial des fibres, c'est-à-dire la conversion des données brutes linéaires de l'interrogateur Raman $T(x, t)$ en données spatiales $T(x, y, z, t)$, est réalisé en stimulant thermiquement des parties des fibres émergeant de chaque coin des murs (en utilisant un point froid comme expliqué dans [2]). Tous les segments correspondant à des lignes droites de fibres optiques dans les murs sont identifiés à l'aide de points froids. Ces mesures sont enregistrées et associées à un maillage de points (correspondant aux points de mesure par fibres optiques). Le traitement de ces mesures permet d'afficher la distribution tridimensionnelle de la température dans les murs, comme illustré à la Figure 3.

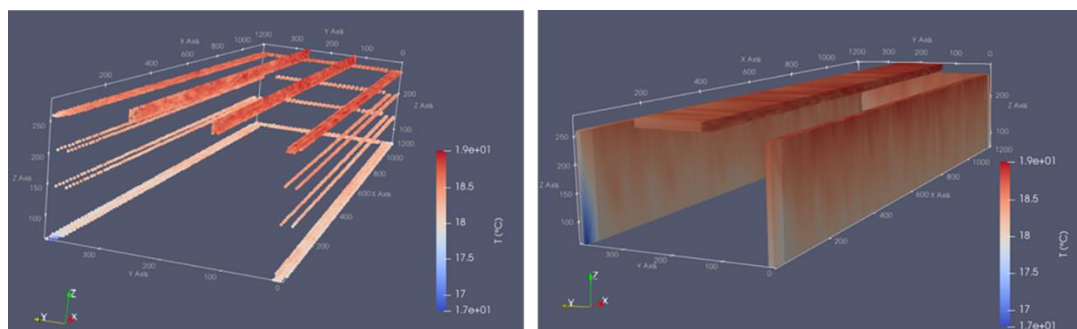


Figure 3 : Reconstruction expérimentale des champs de température dans les murs du local.

2.2. MESURE DE LA TEMPERATURE DE L'AIR

La mesure de la température de l'air peut être sujette à des erreurs significatives induites par le rayonnement thermique [3]. Une méthodologie de mesure spécifique a été développée pour la mesure de la température de l'air, utilisant des fibres fines revêtues d'aluminium. Des expériences ont été menées pour caractériser diverses méthodes de mesure de la température de l'air. Les résultats de cette étude ont démontré que la fibre optique revêtue d'aluminium est la plus représentative de la température de l'air dans un environnement avec des effets radiatifs importants. Environ 500 mètres de fibres optiques sont utilisés pour instrumenter l'air du local. Cela correspond à environ 4000 points de mesure disposés en segments horizontaux à différentes hauteurs, comme indiqué à la Figure 4. Ces fibres sont fixées à des poteaux rigides avec des rubans adhésifs. Les fibres sont disposées symétriquement le long de l'axe x.

Leur espacement diminue progressivement le long de l'axe z pour capturer le gradient de stratification de l'air, qui est particulièrement significatif dans la partie supérieure du local au-dessus des sorties des armoires.

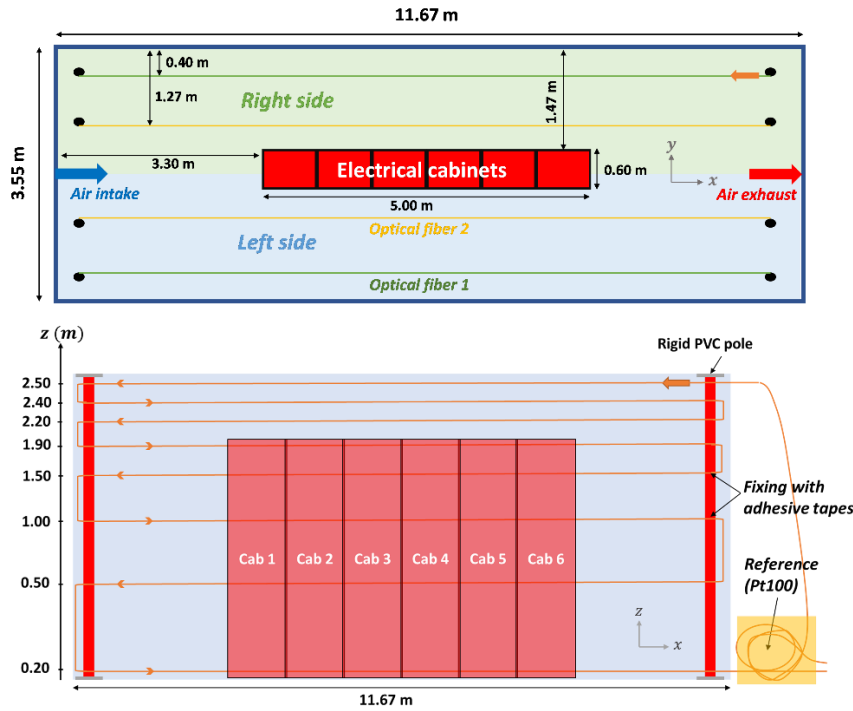


Figure 4 : Schémas des fibres optiques dans l'air du Local Témoin.

Tout comme pour les murs, un recalage géométrique des données brutes est nécessaire pour visualiser et exploiter les données dans l'espace 3D du local. Les segments de fibres optiques dans l'air sont identifiés, puis affichés dans l'espace 3D. Une interpolation des points de mesure peut être réalisée pour reconstruire le champ de température, comme illustré à la Figure 5. Sur l'une des rangées centrales de fibres, seuls trois segments de fibres ont été installés dans la partie supérieure de la salle. Cela permet d'ouvrir les portes des armoires électriques pour l'instrumentation ou les travaux de maintenance.

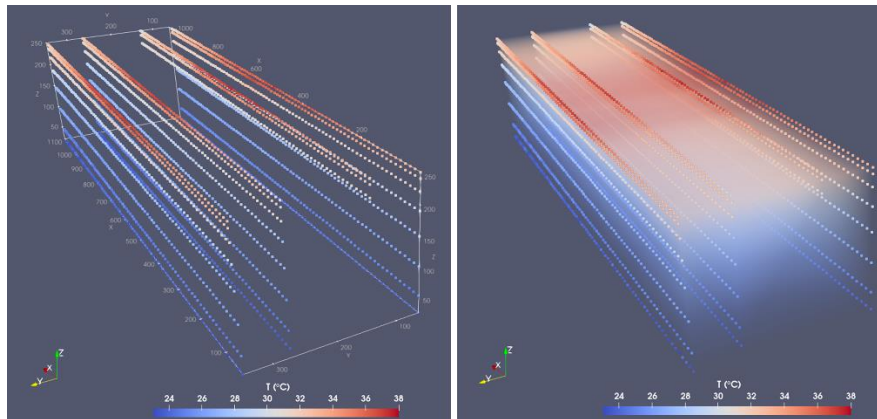


Figure 5 : Reconstruction expérimentale des champs de température dans l'air du local.

2.3. MESURE DES FLUX THERMIQUES AUX PAROIS

Les capteurs de flux thermique retenue pour instrumenter le Local Témoin sont des fluxmètres à gradient tangentiel. Chaque fluxmètre a été étalonné par le fabricant « Captec ». Leur sensibilité est d'environ $290 \mu\text{V}/\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$, avec une incertitude de $\pm 3\%$, correspondant à une erreur absolue de flux d'environ $3 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ dans la plage d'application. Les parois internes sont équipées de fluxmètres, munis de deux revêtements distincts (cf. Figure 6) :

- Certains fluxmètres sont peints en blanc, utilisant la même peinture que celle appliquée sur les parois, assurant la mesure d'un flux identique à celui traversant les parois.
- D'autres sont revêtus d'une fine couche d'aluminium poli. Ces capteurs sont principalement sensibles aux flux convectifs au niveau des parois

Chaque paire de capteurs (S en blanc et D en aluminium) est positionnée côte à côte. Connaissant leurs émissivités respectives, les flux convectifs et radiatifs peuvent être déduits. L'émissivité de surface du fluxmètre peint en blanc a été mesurée ($\varepsilon_S = 0,9$). Le fabricant indique une émissivité de 0,05 pour l'aluminium poli propre, ce qui est cohérent avec les données de la littérature. Le flux mesuré par les deux fluxmètres peut être décomposé comme suit :

$$\phi_S = \phi_{cv} + \varepsilon_S S M^0 \quad (1)$$

$$\phi_D = \phi_{cv} + \varepsilon_D S M^0 \quad (2)$$

Les flux convectifs et radiatifs peuvent alors être déduits :

$$\phi_r = \varepsilon_S S M^0 = \varepsilon_S \frac{\phi_S - \phi_D}{\varepsilon_S - \varepsilon_D} \quad (3)$$

$$\phi_{cv} = \phi_S - \phi_r \quad (4)$$

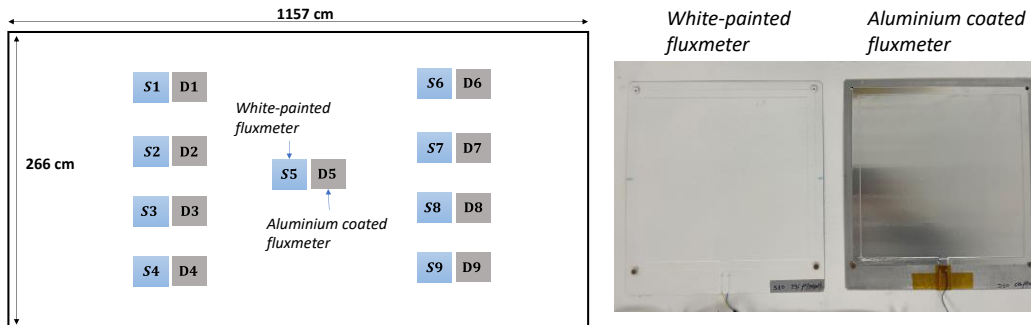


Figure 6 : Photographie et disposition des fluxmètres sur les parois internes des murs.

3. CAS D'ÉTUDE : ABSENCE DE VENTILATION

Le premier cas présenté dans ce document concerne une charge thermique de 6 kW dans la pièce, correspondant à une densité d'environ 150 W/m². Pour cet essai, la ventilation est arrêtée et la température extérieure (de l'espace entre-enceintes) est maintenue à 18,5 °C.

3.1. REGIME INITIAL

Le local est conditionné à 18,5 °C grâce à la ventilation auxiliaire de l'espace entre-enceintes à l'aide de plusieurs gaines microperforées, réparties sur trois hauteurs, comme illustré dans la Figure 7. Ces gaines permettent une alimentation en air à très basse vitesse dans l'espace entre-enceintes, garantissant l'uniformité de la température de l'air à l'extérieur du local d'essai.

Le signal de température de l'air extérieur du local (cf. Figure 7), mesuré par une fibre optique entourant le local béton à trois hauteurs différentes, révèle des températures dans une plage de $\pm 0,5$ °C. La température moyenne de l'air dans cet espace est d'environ 18,5 °C. Cela souligne l'efficacité du système de ventilation auxiliaire afin de maîtriser la condition limite du local d'essai.

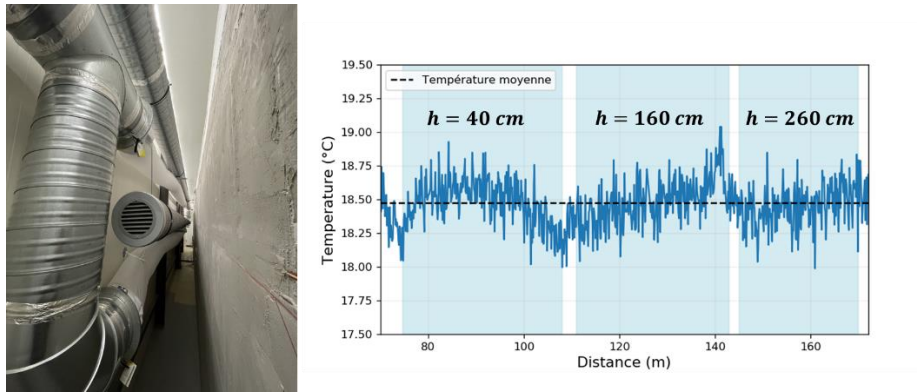


Figure 7 : Photographie des gaines de ventilation de l'espace entre-enceinte (à gauche) et signal de température de l'air mesuré dans cet espace à différentes hauteurs (à droite).

La Figure 8 présente les températures moyennes dans les murs en béton et dans l'air pendant l'état initial, ainsi que les variabilités spatiales associées. La température moyenne pour chacun des murs est d'environ 18,6 °C, avec des écarts-types faibles et équivalents. La distribution de la température en fonction de la hauteur du local illustre également l'absence de stratification thermique dans les murs et dans l'air.

Les profils verticaux de température mesurés par les deux rangées de fibres optiques, à proximité des murs (1) et des armoires (2) (cf. Figure 4), illustrent l'uniformité en température dans l'air du Local Témoin.

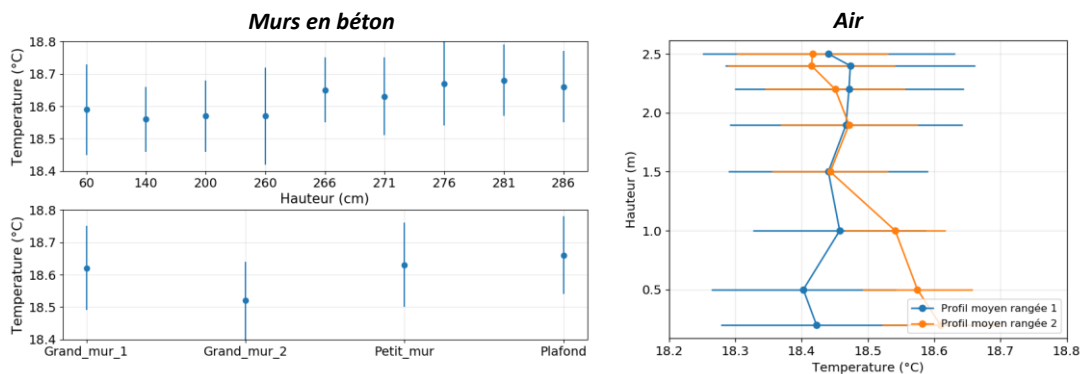


Figure 8 : Températures moyennes dans l'air et dans les murs en régime initial.

3.2. REGIMES TRANSITOIRE ET STATIONNAIRE

Durant cet essai, la température extérieure de l'air est maintenue à 18,5 °C. La Figure 9 illustre l'évolution des températures de l'air selon la hauteur de la pièce, ainsi que la température moyenne des murs.

Pour l'air, les courbes de couleur plus foncée correspondent aux segments du côté droit de la pièce, tandis que des fibres similaires mais plus transparentes se trouvent du côté gauche. Les températures mesurées dans la pièce sont symétriques par rapport à l'axe central le long de la longueur de la pièce. Au cours de la première heure suivant l'activation des sources thermiques, les températures de l'air augmentent rapidement (d'environ +6 °C par rapport à la température moyenne). Par la suite, ces températures évoluent lentement au cours des trois jours suivants jusqu'à atteindre le régime permanent. Cette dynamique peut s'expliquer par constante de temps thermique de l'air, notée $\tau = \rho c_p V / hS$. Cette constante est d'environ 20 minutes pour l'air et de 18 heures pour les murs en béton.

Les températures moyennes des murs augmentent initialement de 18,5 °C à environ 25 °C pour les murs verticaux et 29 °C pour le plafond. Cette différence de 4 °C entre les murs et le plafond s'explique par l'air nettement plus chaud dans la partie supérieure du local, qui échange par convection avec la surface interne du plafond. La température des grands murs verticaux (1 et 2) est identique, confirmant la symétrie des températures, comme observé pour les températures de l'air.

Le petit mur situé du local présente une température légèrement plus basse que les grands murs. Cette différence peut être attribuée au fait que ce mur est moins exposé aux armoires, recevant donc moins d'énergie par rayonnement thermique.

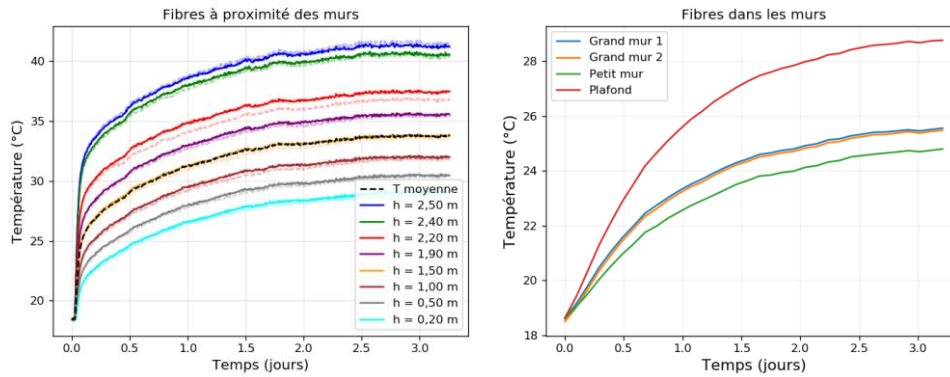


Figure 9 : Evolution des températures dans l'air et dans les murs durant l'essai.

La Figure 10 illustre l'évolution des flux convectifs et radiatifs sur deux parois internes opposées. Les fluxmètres 1, 2, 3 et 4 sont installés sur la surface interne d'un grand mur, en opposition aux fluxmètres 17, 18, 19 et 20, respectivement. Les flux convectifs sont plus importants dans la partie supérieure de la pièce en raison de la température de l'air élevée en haut, et ils sont presque identiques sur les deux murs internes opposés à la même hauteur.

Les flux radiatifs sont moins significatifs que les flux convectifs, et il est également difficile de discerner une symétrie dans les flux radiatifs mesurés. Les fluxmètres 1 et 17, situés à $h = 2,40$ m, sont moins exposés aux surfaces chaudes des armoires et reçoivent donc moins de rayonnement par rapport aux autres capteurs. Il est important de souligner les fluctuations observées dans les flux radiatifs mesurés sur certains fluxmètres, qui sont attribuées au fait que les flux convectifs n'ont pas été entièrement soustraits, et ces fluctuations résultent des variations dans les flux convectifs mesurés par les fluxmètres revêtus d'aluminium.

Le flux convectif moyen est d'environ 28 W.m^{-2} , et le flux radiatif est d'environ 16 W.m^{-2} . L'intégration du flux total sur les parois internes permet de retrouver la puissance des armoires et satisfaire l'équation de bilan thermique.

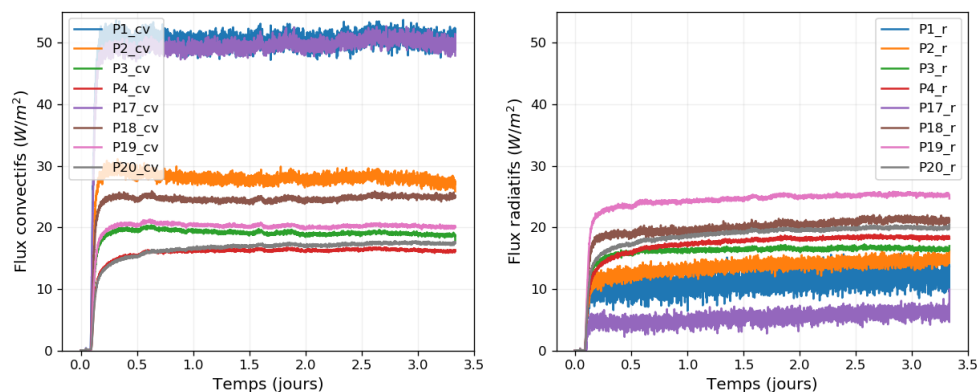


Figure 10 : Evolution des flux thermiques convectifs et radiatifs le long durant l'essai.

L'atteinte du régime permanent est évaluée à l'aide d'une fonction de la forme $ae^{-t/b} + c$, qui a été ajustée sur l'évolution de la température des murs, et qui permet d'estimer la constante de temps, $\tau = 1/b$, qui vaut 21 h. A $t = 3,2$ jours, le régime permanent est atteint à plus de 99 %. La Figure 11 illustre les températures de l'air mesurées par des fibres optiques le long de l'installation à différentes hauteurs. Les armoires électriques, représentées par des rectangles rouges, ont des ouvertures d'admission d'air en bas et des ouvertures d'extraction en haut, à une hauteur de 2,2 m. Pour les hauteurs inférieures à 2,4 m, la température de l'air est quasiment identique pour chaque hauteur. Cependant, dans la partie supérieure de la pièce (entre $h = 2,40$ m et $h = 2,50$ m), une zone particulièrement chaude est distinguée au centre de l'installation, entre $3,5 \text{ m} < x < 8,5 \text{ m}$. Cette zone correspond aux positions des sorties d'air des armoires le long du local, qui se concentre sous le plafond. L'écart maximal de température entre le haut et le bas du local est de $15 \text{ }^\circ\text{C}$.

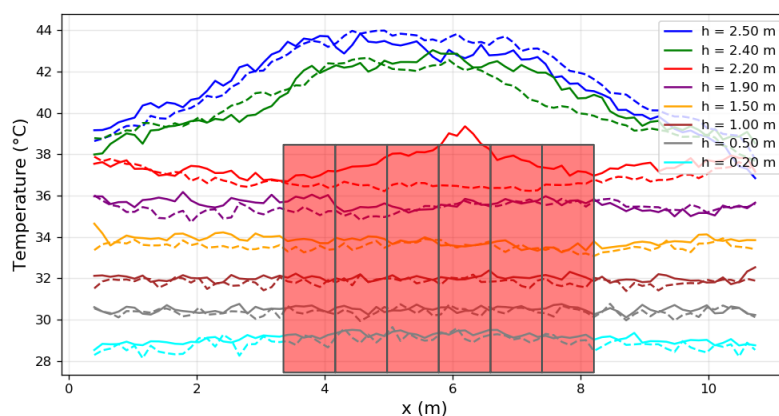


Figure 11 : Températures de l'air mesurées par les fibres optiques à différentes hauteurs (les rectangles rouges correspondent aux positions des armoires électriques dans le local).

4. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Dans cet article, le moyen d'essai Local Témoin d'EDF R&D est présenté. Ce local est spécifiquement conçu pour réaliser des études expérimentales thermos-aérauliques, dans le but de valider des modèles numériques. Les murs et l'air de ce local d'essai sont maillés en des fibres optiques, permettant ainsi de cartographier les champs de température. De plus, des fluxmètres instrumentent les parois des murs, mesurant les flux thermiques radiatifs et convectifs.

Un premier cas d'étude, sans ventilation, a été présenté, permettant l'étude du comportement thermique du local sur plusieurs jours. Différents essais, intégrant divers paramètres tel que le débit et température de soufflage, seront définis et réalisés, puis comparés aux modèles numériques.

5. BIBLIOGRAPHIE

- [1]. Silixa, *Introduction to Distributed Temperature Sensing*, downloaded from: <https://silixa.com/resources/downloads> (2020)
- [2]. R. Moulouel, M. Houvin, P. Borel, M. O. Abadie, and P. Salagnac, Mesures du champ de température par fibres optiques au sein d'un local expérimental industriel dédié à l'étude des phénomènes thermo-aérauliques, *Congres SFT*, 31, 289-296, Reims, France, doi.org/10.25855/SFT2023-045 (2023)
- [3]. H. Huwald, C. W. Higgins, M.-O. Boldi, E. Bou-Zeid, M. Lehning, and M. B. Parlange, Albedo effect on radiative errors in air temperature measurements, *Water Resources Research*, 45, (2009)

EXPERIMENTAL VALIDATION OF MULTI-3DPTV ON THE DISPERSION OF A SINGLE UNOBSTRUCTED COUGH JET IN INDOOR SPACE

Mohammed Umar MUSA*¹, Pascal Henry BIWOLE¹, André LABBE²

¹ Université Clermont Auvergne, Clermont Auvergne INP, CNRS, Institut Pascal, F63000 Clermont-Ferrand, France.

² Université Clermont Auvergne, Clermont Auvergne INP, CHU Clermont-Ferrand, CNRS, Institut Pascal, F-63000 Clermont-Ferrand, France.

*mohammed.musa@uca.fr

ABSTRACT

Indoor air quality and its health impacts are significant concerns, especially in light of challenges like COVID-19 and persistent indoor pollutants. Understanding indoor air dynamics, including airflow patterns and pollutant trajectories, is crucial for creating healthy and thermally comfortable indoor environments. Optical methods for measuring indoor airflow such as particle image velocimetry (PIV) have laser safety issues and small measurement volume limitations, prompting the use of three-dimensional particle tracking velocimetry (3DPTV) for quantitative, nonintrusive measurement of indoor airflow. To cover large spaces like rooms in buildings, this study proposes the use of multiple 3DPTV systems hereafter referred to as multi-3DPTV. A new change of base and linking method between 3DPTV systems was already developed and tested on synthetic particle images. This paper presents an experimental validation of the multi-3DPTV on the dispersion of a passive single unobstructed cough jet from a human model manikin. The results demonstrate the method's effectiveness in linking trajectories of multi-3DPTV systems, making it suitable for airflow measurements in large inhabited areas.

KEYWORDS: Indoor air quality; Three-dimensional particle tracking velocimetry; Multi-3DPTV, thermal comfort

RÉSUMÉ

La qualité de l'air intérieur et ses impacts sur la santé sont des préoccupations majeures, en particulier à la lumière de défis tels que la COVID-19 et les polluants intérieurs persistants. Il est essentiel de comprendre la dynamique de l'air intérieur, notamment les schémas d'écoulement d'air et les trajectoires des polluants, pour créer des environnements intérieurs à la fois sains et confortables sur le plan thermique. Les méthodes optiques telles que la vélocimétrie par images de particules (PIV), présentent des limitations telles que la sécurité des lasers employés et les faibles volumes de mesure, ce qui incite à utiliser la vélocimétrie par suivi lagrangien de particules en trois dimensions (3DPTV) pour la mesure quantitative et non intrusive des écoulements d'air intérieur. Pour couvrir de grands espaces tels que les pièces de bâtiments, cette étude propose l'utilisation de systèmes multi-3DPTV. Une nouvelle méthode de changement de base et de liaison entre les systèmes de 3DPTV a déjà été développée et testée sur des images de particules synthétiques. Cet article présente une validation expérimentale de la méthode multi-3DPTV sur la dispersion d'un jet de toux passif et unique sans obstruction provenant d'un mannequin utilisé comme modèle humain. Les résultats démontrent l'efficacité de la méthode dans la liaison des trajectoires des systèmes multi-3DPTV, la rendant ainsi appropriée pour les mesures d'écoulement d'air dans de vastes zones habitées.

MOTS-CLÉS : Qualité de l'air intérieur ; vélocimétrie par suivi lagrangien de particules en trois dimensions ; Multi-3DPTV, confort thermique

1. INTRODUCTION

Concerns about indoor air quality and its health impacts, emphasized by challenges like COVID-19 and persistent indoor pollutants, underscore the need to understand indoor air dynamics. Indoor airflow patterns and airflow field measurement play a significant role in creating a healthy and thermally comfortable indoor environment by providing adequate quantitative information on indoor air pollutant distribution and local air velocity.

Optical methods such as particle image velocimetry (PIV) provide only instantaneous two-dimensional (2D) velocity fields, or 3D fields limited to a few cubic centimeters, and cannot be deployed to actual inhabited rooms for laser safety and security reasons. Three-dimensional particle tracking velocimetry (3DPTV) is one of the most flexible techniques for airflow measurement, allowing the estimation of three-dimensional velocity fields. The conventional 3DPTV technique, introduced in 1997 by (Virant & Dracos 1997) has been widely applied to investigate small-scale flows (Bourgoin, Pinton, & Volk 2014; La Porta *et al.* 2001; Voth *et al.* 2002). Unlike PIV, 3DPTV is capable of using off-the-shelf hardware facilities such as continuous light in place of lasers for measuring fluid flow, making it more suitable for use in indoor environments. As a result, 3DPTV has been increasingly applied to building and large-scale flows, especially in indoor airflow studies (Biwole P. H. 2009; Fu *et al.* 2018). A 3DPTV system consists of image acquisition CCD cameras, illumination, and tracer particles to seed and visualize the flow. A possible and simplified hardware design using three cameras is shown in Figure 1(a).

However, in many applications the images are recorded over extended periods, yielding high volumes of raw data to process for a few hundred millimeters measurement volume (Guezennec *et al.* 1994; Shnapp 2022). Recently, progress has been achieved by using several 3DPTV systems for the study of airflow in large cavities, such as atriums or conference rooms, a method referred to as multi-3DPTV (Nedaei *et al.* 2022). The concept of multi-3DPTV is simple, comprising two or more neighboring 3DPTV systems, all cameras synchronized, with a non-zero intersection between them (Figure 1(b)). Regarding the data processing aspect of the method, this paper details a new change of base and linking strategy between two single 3DPTV systems. The objective of this work is to experimentally validate the multi-3DPTV code through its application to a passive, unobstructed single cough jet dispersion from a manikin at laboratory scale.

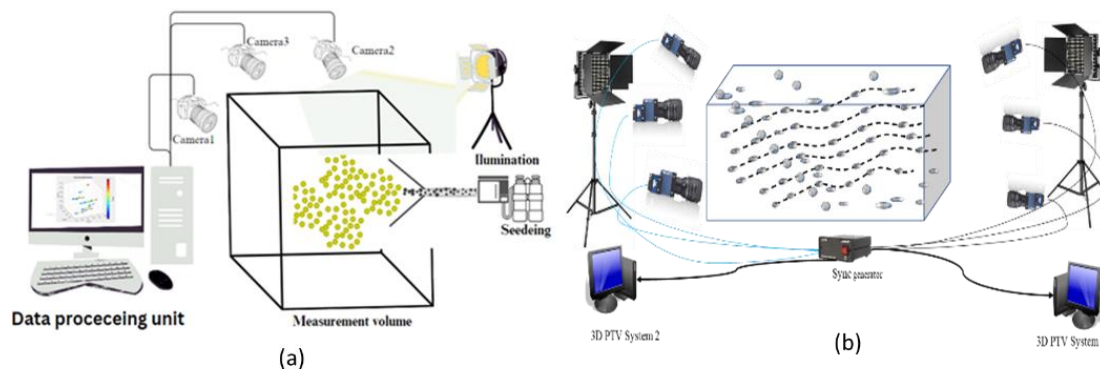


Fig.1: (a) The scheme of the 3DPTV single setup using three cameras; (b) A simple multi-3DPTV setup comprising two 3DPTV systems.

2. METHODS

2.1 3DPTV DATA PROCESSING

Image processing and camera calibration

Input data for classical 3DPTV data processing includes image sequences and camera parameters. The flow is visualized by neutrally buoyant particles that appear as bright spots that cannot be automatically detected from the images. The image processing step cleans the image sequences of noise or artifacts by background subtraction, thresholding, and high pass filtering to remove nonuniformities in the background illumination. An example of a raw and clean particle image used for 3D PTV is shown in the first frame of Figure 2. Calibration is a process used to estimate camera parameters, which can be

categorized into intrinsic and extrinsic parameters. Intrinsic parameters refer to the characteristics specific to each camera, such as the focal length, the angle of inclination of the axes of the CCD or CMOS sensor, and distortion coefficients. These parameters allow to maps 3-dimensional measurement space onto a 2-dimensional plane, called the image space, through the camera model. Our camera model similar to the one proposed by(Heikkila et Silven 1997). On the other hand, extrinsic parameters comprise the rotation and translation matrices that allow the transition from the 3D reference unique to each camera, centered on the lens, to a common 3D reference. Many camera calibration algorithms are detailed in the literature (Beardsley et Murray 1992; Hartley,R. 1994; Owen 1994; Stein, G 1995; Liebowitz, D., Zisserman, A 1998; Bouguet 2022).

Tracking algorithms

With the calibration data of each camera and clean particle images, particle tracking can be performed in three-dimensional real-world space. The automated processing results in three-dimensional trajectories of particles and velocity fields. The tracking algorithms generally involve several image processing and computer vision tasks, as shown in Figure 3:

- Detection of particles in the images by localization of particles with subpixel accuracy using a weighted average method.
- Establishment of stereoscopic correspondences using the epipolar constraint (Malik, Dracos & Papantoniou 1993) or centroid sorting (Biwole. P. H. 2009; Fu et al. 2018).
- Determination of 3-D particle coordinates.
- Tracking in object and image space.
- Post-processing for trajectory and velocity visualization.

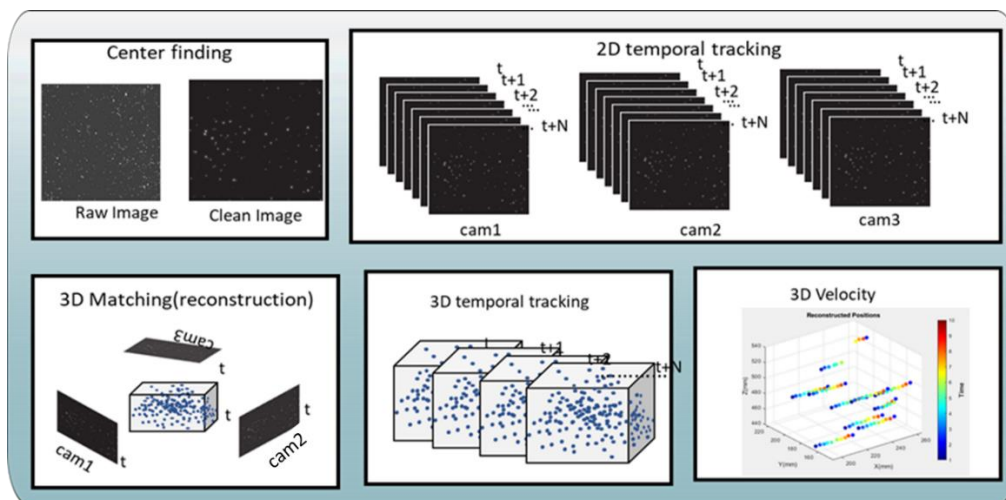


Fig.2: Tracking algorithms steps for analysis of classical 3D-PTV

2.2 MULTI 3DPTV

Multi 3DPTV System calibration

To perform calibration for multi-3DPTV systems, the calibration of the cameras is first performed separately for each system. Images of the calibration target are sent to the algorithms, The calibration target used in our case is a flat checkerboard containing black and white squares, the calibration target images are taken at different positions of the measurement volume, and then forwarded to the calibration algorithm by (Bouguet 2022). For each camera, the algorithm first estimates the intrinsic parameters, to compute the extrinsic parameters of the individual system it is important to compute a common 3D world reference common to each system's cameras. The calibration target must be viewed simultaneously by all cameras when computing the common-world real-world reference frame. The extrinsic parameters are then computed using the images taken for common-world real-world reference frames.

In the second step, a 3D reference frame common to all the different 3DPTV systems must be defined. For clarity, suppose that this step must be performed for two 3DPTV systems only, denoted system (1) and system (2), positioned side by side, and each composed of three cameras as shown in

Figure 3. The fundamental condition for calibrating the multi-3DPTV systems is that at least one camera of the system (2) sees the position of the calibration target used to define the 3D reference common to the cameras of the system (1). The camera is referred to as the linking camera. In the example of Figure 3, camera 6 is the linking camera. This condition can be extended to any number of systems each comprising an indefinite number of cameras, and allows for the change of base reference frame from one system to the other.

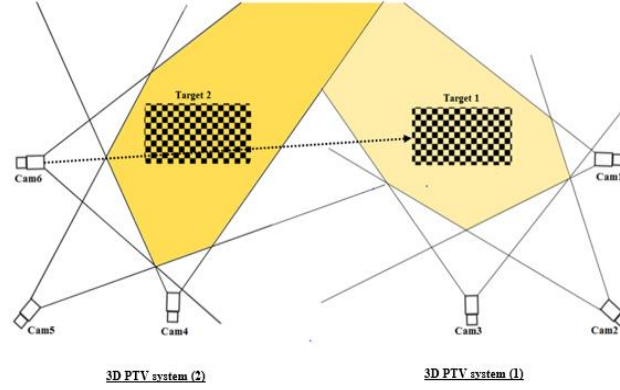


Fig. 3: Camera 6 of the system (2) has a view of the calibration target of the system (1)

Change of base reference frame

Let (m) and (n) be two neighboring systems. Within the system (n) , the relation linking the 3D frame specific to the camera i denoted $XX_{Ci}^{(n)}$ and the common reference of the system (n) , as defined by the calibration target (n) and denoted $XX^{(n)}$, is written:

$$XX_{Ci}^{(n)} = R_i^{(n)} \cdot XX^{(n)} + T_i^{(n)} \quad (1)$$

where $R_i^{(n)}$ and $T_i^{(n)}$ are the extrinsic parameters of the camera i calculated during the calibration step of the cameras of the system (n) only. If the same camera i of the system (n) also sees the position of the calibration target defining the common reference $XX^{(m)}$ of the system (m) , then the relation between $XX_{Ci}^{(n)}$ and $XX^{(m)}$ is written:

$$XX_{Ci}^{(n)} = R_i^{(m)} \cdot XX^{(m)} + T_i^{(m)} \quad (2)$$

where $R_i^{(n)}$ and $T_i^{(n)}$ are the extrinsic parameters of camera i relative to the reference frame (m) . From equations (1) and (2), the relationship between the reference frames XX^m and XX^n can be written as:

$$XX^{(n)} = \left[R_i^{(n)} \right]^{-1} \left[R_i^{(m)} \cdot XX^{(m)} + T_i^{(m)} - T_i^{(n)} \right] \quad (3)$$

Returning to the example of Figure 1 where camera 6 of the 3DPTV system (2) sees the calibration target of the system (1), the previous reasoning leads to the following relationship between the markers (1) and (2):

$$XX^{(2)} = \left[R_6^{(2)} \right]^{-1} \left[R_6^{(1)} \cdot XX^{(1)} + T_6^{(1)} - T_6^{(2)} \right] \quad (4)$$

This method can be extended to an indefinite number of combined 3D PTV systems and allows all the coordinates of the particles to be given according to a single reference frame chosen by the experimenter.

Linking of trajectories between several systems

After changing the base, two 3D coordinates from two 3D PTV systems are declared "similar" (i.e., corresponding to the same particle), if the Euclidean distance between the calculated 3D positions, noted below A and B, is less than or equal to a threshold value s :

$$\|A - B\|_2 = \sqrt{(x_A - x_B)^2 + (y_A - y_B)^2 + (z_A - z_B)^2} \leq s \quad (12)$$

If the threshold value is respected for at least three instants, then the algorithm proceeds to combine the trajectories $XX(1)'$ and $XX(2)'$. The coordinates of the particle at the points of intersection are calculated as the average of the "similar" coordinates. The algorithm therefore proceeds to a comparison of the 3D coordinates, particle by particle, and at each time step. Based on this mathematical model, a calculation was developed and its robustness has already been tested on synthetic particle images representing large-scale two-dimensional analytical solutions for incompressible Navier-Stokes equations by (Nedaei et al. 2022).

3. RESULTS

Experimental facilities

To reproduce a passive single unobstructed cough jet in an indoor space, a human model manikin, as shown in Figure 4(a), was utilized with the bubble generator nozzle located at the mouth aperture. To avoid adding complexity to the outflow, the model's nose orifices are blocked, allowing air only to be exhaled through the mouth of the model without obstruction.

To mimic passive coughing, a sage action bubble generator (Anonymous 1988), Model 5 Console, was used, as shown in Figure 4(b). Bubble soap solution (BFS), helium gas, and air are introduced in the bubble generator. Air is maintained at 40 psi (2.75 bar), and helium at 20 psi (1.37 bar). The bubble generator is equipped with two Mini-Vortex Heads capable of generating 300 bubbles per second per head, three toggle valve openings that can precisely reproduce the cough flows under study, and a micro-metering valve that enables the user to reproduce the desired bubble size (1 mm to 4 mm) with a lifespan of 1-2 minutes. For this experiment, neutrally buoyant bubbles of uniform size (2 mm) in diameter were generated from each bubble output. Figure 4(c) shows the exits of the bubbles through the generator nozzle. The initial velocity distribution of exhaled air from coughing was measured by an anemometer and the air pressure was regulated to main 15 m/s corresponding to the average initial coughing velocity of a male adult (Kwon et al. 2012).

To conduct the experiments under the desired conditions, a closed, unventilated indoor room of size 1.5m by 3m by 1.5m was used, in which a room temperature of 20 to 25°C was maintained. The room was well-illuminated by two continuous light Fluo Soft lamps manufactured by Dixel Lighting Inc. Figure 4(d) shows the schematic arrangement of the cameras for each 3DPTV component within the room, with camera 1 of system 2 positioned such that it can see the calibration target of both system 1 and system 2. The height of the mouth aperture from the floor is 1m in the sitting posture of the manikin.

In the first step, images of the calibration targets for each camera were acquired and analyzed using the calibration toolbox (Bouguet 2022). It is noted that this step can also be performed after the cough image acquisition, but camera position and orientation must be maintained throughout the experiment. In the second step, the cough images were continuously acquired at 60 fps for 1 minute for all cameras. Images captured before the opening of the valve that mimics the cough and contains no particles were discarded. 600 frames for each camera, corresponding to 10 seconds of image acquisition, were processed.

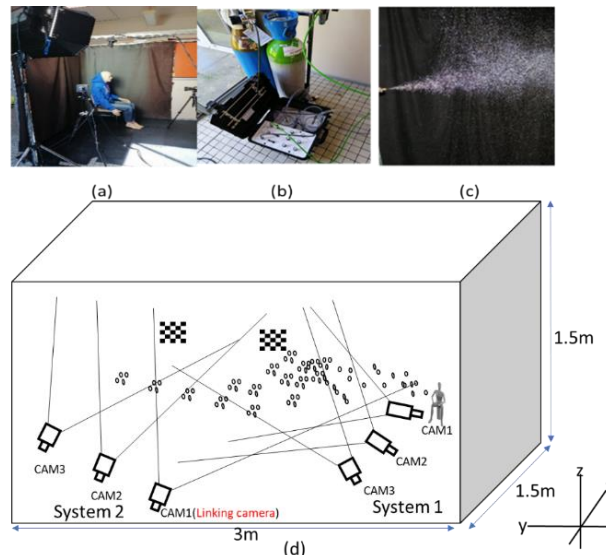


Fig. 4. Experimental facilities for single unobstructed cough experiment (a) Human manikin (lateral view), (b) helium-filled soap bubble generator (Sage Action), (c) sample image of the exit bubble from the nozzles (d) Camera arrangement for experiment with Camera 1 of system 2 as linking camera.

3D path and velocity description of a single unobstructed cough jet

Initially, the 3D trajectories of particles were reconstructed separately for each system, as explained in section 2.1. Figure 5 shows the particle paths of the single unobstructed cough jet for each 3DPTV

system. A clear observation reveals a non-zero intersection of the trajectory paths between the two systems.

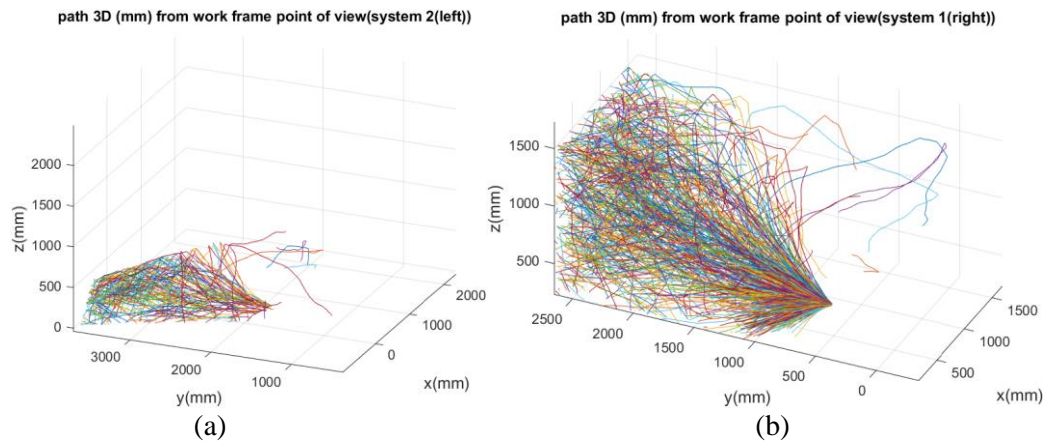


Fig. 5: 3D trajectories of the single unobstructed cough jet for each 3DPTV: (a) left 3DPTV(system1) (b left 3DPTV (system1)).

In the subsequent step, the three-dimensional trajectories of particles of system 2 were all represented in the coordinate system of system 1, as outlined in section 2.2. The trajectory linking was then performed based on the 3D coordinates of the particles situated at the intersection of the two systems. Figure 6(a) illustrates the linked 3D particle trajectories of the single unobstructed cough jet for both systems. Similarly, Figure 6(b) represents the results of the 3D trajectories of System 1 transformed into the coordinates of System 2, then linking was performed based on the 3D coordinates of the particles situated at the intersection of the two systems. The results are similar In both transformation and linking. The results demonstrate that particles falling within the non-zero intersection were successfully linked, thereby enabling the integration of multi-3DPTV systems.

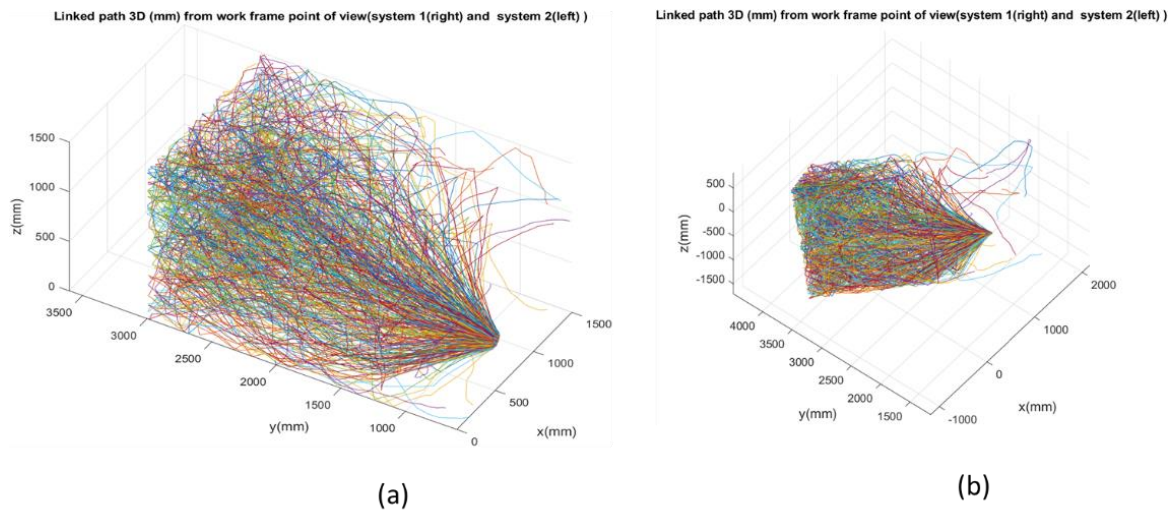


Fig. 6: (a)Linked trajectories after base transformation from system 1 to system 2(b)Linked trajectories after base transformation from system 2 to system 1

Figure 7 shows two-dimensional trajectories (in pixels) of the single unobstructed cough jet as seen by each camera.

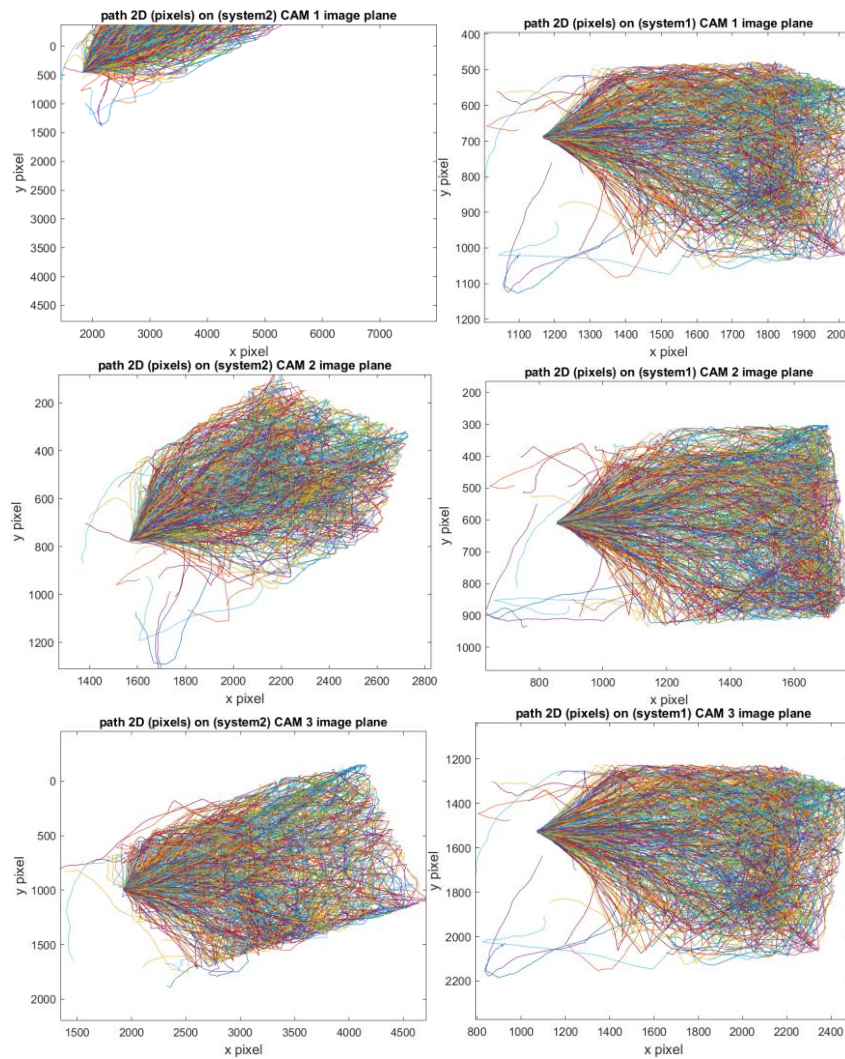


Fig.7: Two-dimensional trajectories (in pixels) of the single unobstructed cough jet as seen by each camera

4. CONCLUSION AND PERSPECTIVES

The multi-3DPTV system presented in this study offers a promising solution for measuring indoor air dynamics, addressing the limitations of optical methods like PIV. The new change of base and linking method developed for multi-3DPTV systems was experimentally validated using a passive single unobstructed cough jet from a human model manikin. One major limitation of this study is the size and weight of the helium-filled soap bubbles, which are different from those of the actual micron-sized particles emitted during a cough. However, the results demonstrate the method's effectiveness in linking trajectories of multi-3DPTV systems, making it suitable for airflow measurements in large inhabited areas. Currently, we are conducting studies in a controlled indoor environment, specifically, the qualidiff test cell of the Civil Engineering and Mechanical Engineering Laboratory (LGCGM), University of Renne 1, where we can regulate parameters like temperature and inlet airflow rate. This will enable us to investigate the impact of isothermal and non-isothermal conditions on indoor air dynamics. By understanding the airflow patterns and pollutant trajectories under various conditions, we can develop strategies to improve indoor air quality and create healthy and thermally comfortable indoor environments. The multi-3DPTV system presents a valuable tool for such studies, and we look forward to exploring its potential in future research.

5. ACKNOWLEDGMENT

The authors would like to thank the National Research Agency which funded the “TRAQ” project under grant number ANR-20-CE04-0004.

6. BIBLIOGRAPHY

- Anonymous. 1988. « SAI Bubble Generator: Description and Operating Instructions (New York: Sage) », 1988.
- Beardsley, Paul, et David Murray. 1992. « Camera Calibration Using Vanishing Points ». In *BMVC92*, édité par David Hogg et Roger Boyle, 416-25. London: Springer London. https://doi.org/10.1007/978-1-4471-3201-1_43.
- Biwole. P. H. 2009. « Large-scale particle tracking velocimetry for 3-dimensional indoor airflow study [Ph.D. Thesis]. France: Institut National des Sciences Appliquées - Lyon »;
- Bouguet, Jean-Yves. 2022. « Camera Calibration Toolbox for Matlab ». [object Object]. <https://doi.org/10.22002/D1.20164>.
- Bourgoin, Mickael, Jean-François Pinton, et Romain Volk. 2014. « Lagrangian Methods in Experimental Fluid Mechanics ». In *Geophysical Monograph Series*, édité par Thomas Von Larcher et Paul D. Williams, 1^{re} éd., 277-96. Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781118856024.ch15>.
- Fu, Sijie, Pascal Henry Biwole, Christian Mathis, et Philippe Maïssa. 2018. « Numerical and Experimental Comparison of Complete Three-Dimensional Particle Tracking Velocimetry Algorithms for Indoor Airflow Study ». *Indoor and Built Environment* 27 (4): 528-43. <https://doi.org/10.1177/1420326X16682294>.
- Guezennec, Y. G., R. S. Brodkey, N. Trigui, et J. C. Kent. 1994. « Algorithms for Fully Automated Three-Dimensional Particle Tracking Velocimetry ». *Experiments in Fluids* 17 (4): 209-19. <https://doi.org/10.1007/BF00203039>.
- Hartley, R. 1994. « Self calibration from multiple views with a rotating camera, Proceedings of 3rd European Conference on Computer Vision, Stockholm, Sweden, pp. 471-478 »,.
- Heikkila, J., et O. Silven. 1997. « A Four-Step Camera Calibration Procedure with Implicit Image Correction ». In *Proceedings of IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 1106-12. San Juan, Puerto Rico: IEEE Comput. Soc. <https://doi.org/10.1109/CVPR.1997.609468>.
- Kwon, Soon-Bark, Jaehyung Park, Jaeyoun Jang, Youngmin Cho, Duck-Shin Park, Changsoo Kim, Gwi-Nam Bae, et Am Jang. 2012. « Study on the Initial Velocity Distribution of Exhaled Air from Coughing and Speaking ». *Chemosphere* 87 (11): 1260-64. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2012.01.032>.
- La Porta, A., Greg A. Voth, Alice M. Crawford, Jim Alexander, et Eberhard Bodenschatz. 2001. « Fluid Particle Accelerations in Fully Developed Turbulence ». *Nature* 409 (6823): 1017-19. <https://doi.org/10.1038/35059027>.
- Liebowitz, D., Zisserman, A. 1998. « Metric rectification for perspective images of planes, Proceedings of IEEE conference on computer vision and pattern recognition, Santa Barbara, California, pp. 482-488 »,.
- Malik, N. A., Th. Dracos, et D. A. Papantoniou. 1993. « Particle Tracking Velocimetry in Three-Dimensional Flows: Part II: Particle Tracking ». *Experiments in Fluids* 15-15 (4-5): 279-94. <https://doi.org/10.1007/BF00223406>.
- Nedaei, Masoumeh, Karunesh Kant, Pascal H Biwole, Eric Deckneuvel, et Gilles Jacquemod. 2022. « Numerical Evaluations of a Multiple 3D Particle Tracking Velocimetry System for Indoor Air Flow Study. IAQ 2020: Indoor Environmental Quality Performance Approaches,, Athens, Greece, Greece. (hal-03774371v1) », 2022.
- Owen, Tony. 1994. « Three-Dimensional Computer Vision: A Geometric Viewpoint by Olivier Faugeras The MIT Press, London, UK, ISBN 0-262-06158-9, 1993, 663 Pages Incl Index (£58·50) ». *Robotica* 12 (5): 475-475. <https://doi.org/10.1017/S0263574700018063>.
- Shnapp, Ron. 2022. « MyPTV: A Python Package for 3D ParticleTracking ». *Journal of Open Source Software* 7 (75): 4398. <https://doi.org/10.21105/joss.04398>.
- Stein, G. 1995. « Accurate internal camera calibration using rotation, with analysis of sources of errors, Proceedings of the 5th International Conference on Computer Vision, Cambridge, Massachusetts, pp. 230-236 »,.
- Virant, Marko, et Themistocles Dracos. 1997. « 3D PTV and its application on Lagrangian motion ». *Measurement Science and Technology* 8 (12): 1539-52. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/8/12/017>.
- Voth, Greg A., A. La Porta, Alice M. Crawford, Jim Alexander, et Eberhard Bodenschatz. 2002. « Measurement of Particle Accelerations in Fully Developed Turbulence ». *Journal of Fluid Mechanics* 469 (octobre): 121-60. <https://doi.org/10.1017/S0022112002001842>.

Approches multi-fidélité et problèmes inverses pour l'identification in-situ de la résistance thermique de parois de bâtiment

Hadi Nasser^{1,*}, Guillaume Perrin¹, Rachida Chakir¹, Séverine Demeyer², Julien Waeytens¹

¹Université Gustave Eiffel, COSYS
77420 Champs-sur-Marne, France

²Laboratoire National de Métrologie et d'Essais
78190 Trappes, France

*hadi.nasser@univ-eiffel.fr

RESUMÉ. Cet article propose une approche bayésienne pour estimer avec précision la résistance thermique totale (R_{Tot}) de murs, en tenant compte des diverses sources d'incertitudes, tant pour les parois faiblement isolées que pour celles fortement isolées. À l'aide d'un prototype développé dans le cadre du projet ANR RESBATI et d'une révision du modèle thermique pour le rendre indépendant des coefficients d'échange thermique, cette méthode permet d'estimer R_{Tot} à partir d'une instrumentation du mur non-intrusive, tout en associant un intervalle de confiance à cette estimation. L'étude présente un cas concret, la méthode d'identification de R_{Tot} , ainsi que son application sur deux parois distinctes, offrant ainsi des perspectives pour une meilleure évaluation énergétique des bâtiments.

MOTS-CLÉS. Résistance thermique, apprentissage statistique, quantification des incertitudes, approche multi-fidélité, problèmes inverses.

1. INTRODUCTION

En France, une partie significative des bâtiments présente des pertes énergétiques importantes. En 2012, la réglementation thermique française (RT, 2012) a imposé une résistance thermique minimale de $4 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$ pour les bâtiments neufs ou rénovés afin de réduire la consommation énergétique. Le but de cette étude est de permettre l'estimation de la résistance thermique totale (R_{Tot}) pour des parois avec une isolation par l'intérieure (ITI), en prenant en compte différentes sources d'incertitudes. La méthode proposée permet d'identifier R_{Tot} aussi bien pour des parois faiblement isolées ($R_{Tot} \leq 2 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$) que pour des parois fortement isolées ($R_{Tot} \geq 5 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$). Pour limiter l'influence des conditions extérieures, un prototype développé dans le cadre du projet ANR RESBATI réalise une sollicitation active sur la surface intérieure et mesure les réponses thermiques sur les surfaces de la paroi. D'autre part, une réécriture du modèle thermique est proposée pour limiter l'influence des coefficients d'échange thermique, qui sont généralement mal-connus, sur l'estimation de R_{Tot} .

Dans la littérature, plusieurs études existantes proposent des approches pour identifier les propriétés thermiques des parois opaques. Par exemple, dans l'étude numérique (Ha et al., 2020), les auteurs comparent trois approches pour identifier la résistance thermique totale des parois, les trois méthodes parviennent à identifier la résistance thermique de parois ITI avec une précision de 20% lorsque l'épaisseur totale est inférieure à 0.45 m. Ces méthodes ont été utilisées par les mêmes auteurs dans une application expérimentale (Ha et al., 2022), dans des conditions naturelles et contrôlées, en testant différents types de parois. Les premières expériences menées montrent que pour 10 heures de mesures, seules les premières couches

du mur peuvent être caractérisées dans le processus d'identification proposé. Il existe plusieurs revues des méthodes récentes d'évaluation thermique in situ. Par exemple, (Teni et al., 2019) ont passé en revue les méthodes in situ non destructives récentes pour évaluer la transmission thermique (valeur U) des murs. (Bienvenido-Huertas et al., 2019) ont passé en revue les publications récentes sur l'évaluation de la valeur U des murs, mais les méthodes d'évaluation actives et certains modèles théoriques de base font défaut. (Yang et al., 2022) ont passé en revue les développements récents, y compris les méthodes en régime permanent, les méthodes transitoires et d'autres méthodes d'évaluation non destructives. La démarche théorique ainsi que l'instrumentation et les systèmes sont analysés.

Ce travail s'articule autour de trois sections principales. Le cas d'étude est présenté dans la section 2. La méthode d'identification de R_{Tot} est ensuite présentée dans la section 3. La section 4, présente enfin l'application de l'identification sur deux parois différentes.

2. DÉFINITION DU PROBLÈME DIRECT

Cette étude est focalisée sur des parois avec une isolation thermique intérieur (ITI) comme présenté dans la Figure 1. Une telle paroi est composée de quatre couches, chacune ayant des propriétés physiques différentes. Pour chaque couche i , on note λ_i les conductivités, ρC_i les capacités thermiques, e_i les épaisseurs, et R_i les résistances thermiques associées. Ces propriétés correspondent aux paramètres d'entrée du modèle direct. Les valeurs possibles pour ces propriétés physiques sont issues de l'étude (Ha et al., 2020). Des capteurs sont ensuite placés sur les surfaces intérieure et extérieure pour mesurer durant 6 jours les températures T_{S_i} et T_{S_e} , ainsi que les flux thermiques φ_{S_i} et φ_{S_e} .

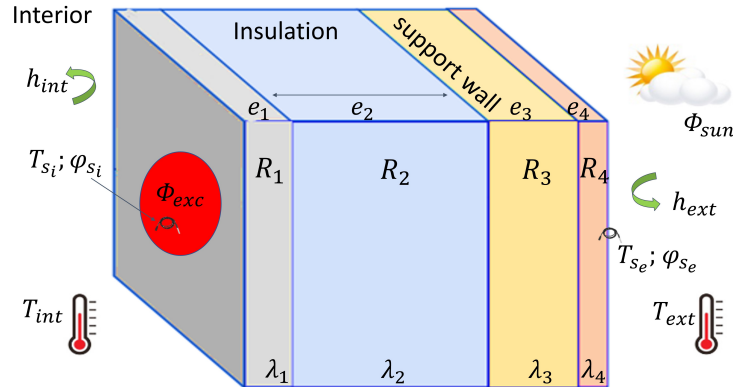


Figure 1 : Géométrie d'un mur ITI à 4 couches pris en compte dans l'étude.

Dans le cadre du projet ANR RESBATI, sur lequel s'appuie ce travail, une sollicitation thermique active a été proposée, pour chauffer une zone sur la surface intérieure du mur avec une excitation de type Heaviside. Durant la première phase de l'essai, appelée "période de stabilisation" (3 premiers jours de l'essai), il n'y a pas de flux de surface intérieure imposé ($\Phi_{exc} = 0 \text{ W.m}^{-2}$). Durant les 3 jours qui suivent la phase de stabilisation, l'excitation Φ_{exc} est de 400 W.m^{-2} durant les 3 jours qui suivent la phase de stabilisation. Cette technique permet de surmonter les limitations liées aux sensibilités aux conditions externes (François et al., 2020). Pour plus de détails sur le prototype expérimental développé, on pourra consulter (Ha et al., 2020). Les températures intérieure et extérieure sont par ailleurs notées T_{int} et T_{ext} . La méthode est testée numériquement pour une paroi orientée sud, en considérant la météo de Carpentras

sur une période de 6 jours extraite de la réglementation thermique française de 2012 (RT, 2012). La surface extérieure de la paroi est exposée au flux solaire, que l'on note Φ_{sun} , qui varie durant le temps. Une difficulté importante de cette étude provient du fait qu'aucun capteur thermique n'est disposé dans de la paroi (ou à l'interface entre les différentes couches), ce qui limite la connaissance du profil de température au sein de la paroi au moment du lancement de la sollicitation thermique. Pour limiter l'impact de cette incertitude liée à la condition initiale CI obtenue ici par un calcul thermique stationnaire, nous proposons dans ce travail de faire précéder la phase de sollicitation thermique d'une période de stabilisation de 3 jours, d'après l'étude (Roulet et al., 1987), qui montre qu'une période de plus de 3 jours de stabilisation est nécessaire pour ne pas avoir l'influence de la température initiale de la paroi.

2.1. MODÈLE SIMPLIFIÉ 1D

Le modèle thermique 3D est trop coûteux numériquement pour être directement utilisé lors de l'estimation de la résistance thermique totale d'un mur aux propriétés inconnues. On propose ainsi de ne considérer qu'un modèle simplifié 1D lors de la phase d'inversion. Etant donné que les épaisseurs de chaque couche ne sont pas connues, on propose d'adimensionner les équations pour ne plus les faire dépendre de e_i . Ce modèle dépend des résistances thermiques $R_i = \frac{e_i}{\lambda_i}$ et des capacités thermiques des matériaux $e_i \times \rho C_i$ dans chaque couche i . Pour $1 \leq i \leq 4$, en notant $T_i(x_i, t)$ la température dans la couche i à la profondeur adimensionnée $x_i \in [0, 1]$ et à l'instant $t \in [0, t_f]$, l'équation aux dérivées partielles adimensionnée que doit vérifier T_i en tout x_i et tout t est ainsi donnée par

$$e_i \times \rho C_i \frac{\partial T_i}{\partial t} - \frac{1}{R_i} \frac{\partial^2 T_i}{\partial x_i^2} = 0. \quad (1)$$

Cette équation est caractérisée par deux paramètres à estimer, à savoir $e_i \times \rho C_i$ et R_i . Des conditions de continuités (de températures et flux) aux interfaces sont prises en compte, et pour tout $0 \leq t \leq t_f$, les conditions aux limites (au niveau des surfaces intérieure et extérieure de la paroi, c'est à dire $x_1 = 0$ et $x_4 = 1$) sont définies par :

$$\begin{cases} -\frac{1}{R_1} \frac{\partial T_1}{\partial x_1}(0, t) = \Phi_{exc}(t) + h_{int}(T_{int}(t) - T_1(0, t)), \\ -\frac{1}{R_4} \frac{\partial T_4}{\partial x_4}(1, t) = -\Phi_{sun}(t) + h_{ext}(T_4(1, t) - T_{ext}(t)). \end{cases} \quad (2)$$

Deux coefficients inconnus apparaissent dans ces conditions limites, à savoir le coefficient d'échange intérieur, h_i , et le coefficient d'échange extérieur, h_e . Ces coefficients jouent un rôle crucial dans l'efficacité énergétique des murs de bâtiment. Dans (Berger et al., 2016), on montre ainsi que h_{int} a une forte influence sur T_{S_i} et que l'influence de h_{ext} sur T_{S_e} varie entre le jour et la nuit, tout en restant significative tout au long de la période d'étude. Pour ne pas rendre dépendants de ces coefficients les résultats de l'estimation de la résistance thermique totale de la paroi, une reformulation du problème indépendante de h_{int} et h_{ext} est maintenant proposée. L'idée est d'introduire dans les conditions limites les températures de surface T_{S_i} et T_{S_e} , qui seront mesurées lors de l'essai, ce qui se traduit par les nouvelles conditions limites suivantes :

$$\begin{cases} T_1(x_1 = 0, t) = T_{S_i}^{mes}(t), \\ T_4(x_4 = 1, t) = T_{S_e}^{mes}(t), \end{cases} \quad (3)$$

où $T_{S_i}^{mes}$ et $T_{S_e}^{mes}$ sont les mesures de T_{S_i} et T_{S_e} respectivement.

3. ESTIMATION DE LA RÉSISTANCE THERMIQUE TOTALE DU MUR

Une méthode d'estimation est présentée dans la section 3.1. Ensuite, pour réduire le temps de calcul, un méta-modèle est créé dans la section 3.2. Une analyse des sources d'incertitudes est enfin présentée dans la section 3.3.

3.1. MÉTHODE D'IDENTIFICATION

On note

- $\mathbf{z} = (e_1\rho C_1, \dots, e_4\rho C_4, R_1, \dots, R_4)$ le vecteur regroupant les propriétés thermiques de la paroi que l'on cherche à caractériser,
- \mathbf{y} le vecteur regroupant les mesures des flux thermiques sur les surfaces intérieure et extérieure de la paroi aux différents instants d'acquisition une fois la sollicitation active enclenchée,
- $\mathbf{u}(\mathbf{z})$ le vecteur des flux thermiques intérieur et extérieur simulés par le modèle direct, discrétisés aux mêmes instants que les mesures,
- N le nombre de points de mesure disponibles, c'est-à-dire le nombre de composantes de \mathbf{y} .

L'objectif est alors d'estimer \mathbf{z} de telle sorte que les valeurs simulées $\mathbf{u}(\mathbf{z})$ soient les plus proches possibles des valeurs mesurées \mathbf{y} . Afin d'intégrer les différentes sources d'incertitudes du problème, une approche bayésienne est adoptée dans ce travail (Kaipio and Fox, 2011). Cette approche consiste à modéliser les quantités mal-connues sous la forme de quantités aléatoires, ici le vecteur \mathbf{z} et les potentielles erreurs de mesure et de modèle, et d'en rechercher les distributions conditionnées par les mesures. En notant $\pi(\mathbf{z})$ la densité de probabilité (PDF) a priori de \mathbf{z} , que l'on choisira uniforme sur son domaine de définition, on peut déduire $\pi(\mathbf{z}|\mathbf{y})$ comme la PDF a posteriori de \mathbf{z} sachant les mesures \mathbf{y} . Cette PDF est donnée par la formule de Bayes, et s'écrit :

$$\pi(\mathbf{z}|\mathbf{y}) = \frac{\pi(\mathbf{z}) \times \pi(\mathbf{y}|\mathbf{z})}{\int_{\mathbf{z}'} \pi(\mathbf{z}') \times \pi(\mathbf{y}|\mathbf{z}') d\mathbf{z}'}, \quad (4)$$

où $\pi(\mathbf{y}|\mathbf{z})$ est la fonction de vraisemblance. En supposant les erreurs de mesure et de modèle centrées et gaussiennes, cette fonction de vraisemblance s'écrit sous la forme :

$$\pi(\mathbf{y}|\mathbf{z}) = c \times \exp\left(-\frac{1}{2}(\mathbf{y} - \mathbf{u}(\mathbf{z}))^T \mathbf{W}^{-1}(\mathbf{y} - \mathbf{u}(\mathbf{z}))\right), \quad (5)$$

où c est une constante de normalisation indépendante de \mathbf{z} . Les propriétés statistiques des erreurs de mesure et de modèle sont ainsi caractérisées par une matrice de covariance \mathbf{W} , que l'on suppose ici connue en se basant sur la quantification des sources d'incertitudes présentée dans la section 3.3. Le dénominateur définissant $\pi(\mathbf{z}|\mathbf{y})$ dans l'équation (4) étant inconnu, on utilise une approche de type Markov Chain Monte Carlo (MCMC) pour générer une séquence de N_s valeurs de \mathbf{z} , notées $\{\mathbf{z}^1, \dots, \mathbf{z}^{N_s}\}$, que l'on peut considérer comme des réalisations indépendantes d'un vecteur aléatoire de PDF $\pi(\mathbf{y}|\mathbf{z})$.

La méthode MCMC est très efficace pour estimer la distribution a posteriori des paramètres, mais nécessite un grand nombre d'évaluations du modèle direct. Cependant, malgré son caractère approché, le modèle 1D reste coûteux numériquement dans une approche bayésienne,

de l'ordre de 20 secondes par simulation en utilisant un ordinateur portable standard avec Intel(R) Core (TM) i7-1185G7 @ 3.00 GHz. Pour réduire ce coût tout en maintenant une bonne précision pour l'estimation de la résistance thermique du mur, un modèle approché du modèle 1D est créé et présenté dans la section 3.2.

3.2. APPRENTISSAGE STATISTIQUE ET MODÈLE SIMPLIFIÉ

Comme expliqué en fin de Section 3.1. l'estimation de \mathbf{z} par une approche MCMC nécessite un nombre très important d'appels au modèle direct 1D, ce qui limite fortement l'estimation de la résistance thermique du mur en un temps raisonnable. On propose alors de remplacer le modèle direct 1D par un modèle approché en s'inspirant des travaux menés dans (Perrin, 2020). Sur la base de cette étude, le modèle approché est créé en utilisant deux niveaux de fidélité : le niveau haute fidélité correspond au modèle direct 1D, et le niveau basse fidélité correspond à un modèle 0D avec 5 résistances et 4 condensateurs (noté R_5C_4 dans la suite). On modélise ainsi la réponse du modèle direct 1D sous la forme d'un processus gaussien (PG) à valeur vectoriel \mathbf{u}^{Meta} , caractérisé par une fonction moyenne $\boldsymbol{\mu}$ à valeur dans \mathbb{R}^N , donnée par la projection de la réponse du modèle de basse fidélité aux différents instants d'acquisition des mesures, et d'une fonction de covariance \mathbf{C} à valeurs dans $\mathbb{R}^N \times \mathbb{R}^N$ dépendant des propriétés de la paroi :

$$\mathbf{u}^{Meta} | \alpha \sim PG(\alpha \boldsymbol{\mu}, \mathbf{C}). \quad (6)$$

Dans cette équation, $\mathbf{z} \mapsto \boldsymbol{\mu}(\mathbf{z})$ est la fonction moyenne associée au modèle 0D, α est un coefficient scalaire à estimer caractérisant la corrélation entre le modèle haute fidélité (modèle 1D) et le modèle basse fidélité (modèle 0D), et $(\mathbf{z}, \mathbf{z}') \mapsto \mathbf{C}(\mathbf{z}, \mathbf{z}')$ est une fonction de covariance. Pour plus de détails sur le choix de cette fonction de covariance, on oriente le lecteur intéressé vers les travaux (Kerleguer, 2023; Perrin, 2020).

3.3. QUANTIFICATION D'INCERTITUDES

Dans cette étude, l'objectif n'est pas seulement d'identifier la résistance thermique d'une paroi mais également de fournir un intervalle de confiance des paramètres estimés. Pour y parvenir, quatre sources d'incertitudes sont quantifiées et prises en compte. On note ainsi :

1. $\varepsilon_{\varphi}^{mes}$ l'incertitude sur la mesure des flux thermiques φ_{S_i} et φ_{S_e} ; celle-ci est prise égale à 3% (Ha et al., 2022) ;
2. ε_T^{mes} l'incertitude liée aux mesures des températures sur les surfaces intérieure et extérieure, qui sont ici prises comme conditions aux limites du modèle direct ; cette incertitude est propagée au niveau des flux thermiques en évaluant le modèle 1D en n_t profils de température réalistes et représentatifs ;
3. ε^{Meta} l'incertitude liée au remplacement du modèle 1D par son modèle approché ; pour plus de détails sur l'estimation de ε^{Meta} , voir (Perrin, 2020) ;
4. $\varepsilon(\theta)$ l'incertitude de modèle résiduelle associée à la modélisation d'un phénomène 3D par un modèle simplifié 1D.

4. APPLICATIONS

Dans cette partie, la méthode proposée est appliquée à l'estimation des propriétés thermiques de deux parois de référence, pour lesquelles ces propriétés thermiques sont connues, et choisies de sorte que

1. la paroi 1 présente une faible isolation ($R_{Tot} = 0.918 \text{ m}^2.K.W^{-1}$) et une faible épaisseur ($e_{Tot} = e_1 + e_2 + e_3 + e_4 = 0.210 \text{ m}$),
2. la paroi 2 est fortement isolée ($R_{Tot} = 8.622 \text{ m}^2.K.W^{-1}$) tout en ayant une grande épaisseur ($e_{Tot} = 0.453 \text{ m}$).

La composition de chaque couche des deux parois testées (épaisseurs, conductivité et capacité thermique) est détaillée dans le tableau 1.

Tableau 1 : Composition des parois testées (e en m, Conductivité λ en $W.m^{-1}.K^{-1}$ et capacité thermique ρC en $J.K^{-1}.m^{-3}$)

# Couche	Paroi 1			Paroi 2		
	e_i	λ_i	ρC_i	e_i	λ_i	ρC_i
#1 Enduit intérieure	0.01	0.80	1.10^6	0.01	0.25	75.10^4
#2 Isolant	0.04	0.04	5.10^4	0.20	0.025	3.10^4
#3 Mur support	0.15	2.30	24.10^5	0.22	0.40	1.10^6
#4 Enduit extérieure	0.01	1.50	9.10^5	0.02	1.00	9.10^5

On se place ici dans un cadre où les mesures sont simulées. Les réponses thermiques de chaque référence sont ainsi simulées à partir d'un modèle thermique 2D axisymétrique, puis bruitées conformément à ce que l'on pourrait obtenir en pratique. Les évolutions des températures des surfaces intérieure et extérieure bruitées et lissées (pour les imposer dans le modèle 1D) sont présentées dans la figure 2.

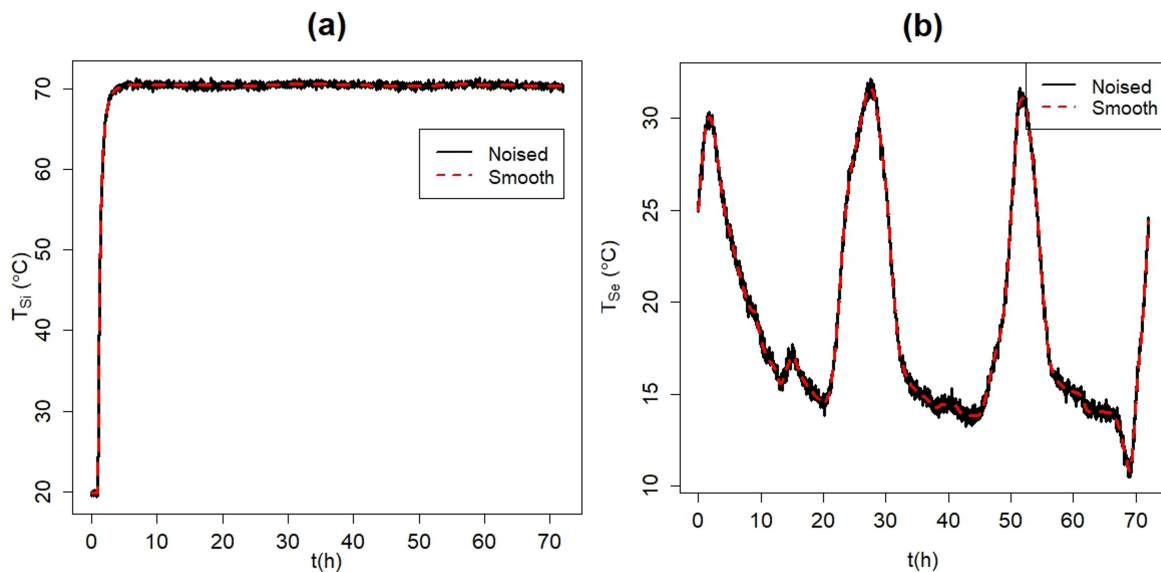


Figure 2 : Températures bruitées (en noir) et lissées (en rouge) issues d'un calcul 2D axisymétrique, dans le cas de paroi 2 : (a) T_{Si} , (b) T_{Se} .

Les valeurs de référence des huit paramètres caractérisant les propriétés thermiques des parois étudiées sont présentées dans le tableau 2.

Pour chaque paroi testée, un modèle approché est créé en se basant sur l'approche multi-fidélité décrite dans la section 3.2. On notera que le modèle générant les données (modèle 3D résolu par

Tableau 2 : Propriétés thermiques des parois étudiées (R_i en $m^2.K.W^{-1}$, $e\rho C_i$ en $m.J.K^{-1}.m^{-3}$ et e en m)

Paroi testée	R_1	R_2	R_3	R_4	$e\rho C_1$	$e\rho C_2$	$e\rho C_3$	$e\rho C_4$	R_{Tot}	e_{Tot}
Paroi 1	0.013	0.833	0.065	0.007	10000	2000	360000	9000	0.918	0.210
Paroi 2	0.052	8	0.55	0.02	9750	6000	220000	18000	8.622	0.453

un code 2D axisymétrique) n'est pas le même que ceux utilisés pour l'inversion (modèles 0D et 1D), justifiant la prise en compte du terme correctif $\varepsilon(\theta)$ présenté en Section 3.3. La méthode d'identification des résistances est ensuite appliquée et les résultats sont présentés dans le tableau 3.

Tableau 3 : Résultats de l'identification appliquée pour les deux parois testées. (R_{Tot}^{ref} en $m^2.K.W^{-1}$, $e\rho C_{Tot}^{ref}$ en $m.J.K^{-1}.m^{-3}$ et e_{Tot} en m)

Paroi testée	e_{Tot}	R_{Tot}^{ref}	R_{Tot}^{est} [$IC_{95\%}$]	$e\rho C_{Tot}^{ref}$	$e\rho C_{Tot}^{est}$
Paroi 1	0.210	0.918	0.894 [0.800; 1.051]	381000	381258 [331977; 507212]
Paroi 2	0.453	8.622	10.471 [8.823; 10.636]	253750	235424 [201557; 295448]

Le tableau 3 présente pour deux parois ayant des propriétés thermiques très différentes, les résistances totales estimées (R_{Tot}^{est}) par l'approche proposée, ainsi que les intervalles de confiance à 95% ($IC_{95\%}$) relatifs à ces estimations (exprimés sous la forme d'intervalles dans le tableau). Ces résultats montrent une bonne estimation de R_{Tot}^{ref} (moins de 3% d'erreur) dans le cas de la paroi avec une faible résistance thermique, ainsi que des incertitudes d'estimation tout à fait acceptables. Dans le cas de la paroi fortement isolée, qui correspond au cas le plus difficile à traiter vu l'écart plus important attendu entre le modèle 3D et le modèle simplifié utilisé, les résultats d'estimation ont tendance à légèrement surestimer la résistance totale. Il est important de souligner que la méthode est capable de détecter le caractère fortement isolé de la paroi et également de fournir une estimation pertinente de la résistance thermique minimale de la paroi. D'autre part, l'identification des capacités thermiques totales des deux parois (ce qui n'est pas le but principal de cette étude) est acceptable mais avec de larges intervalles de confiance. En conclusion, l'approche proposée dans cette étude, permet non seulement d'identifier la résistance thermique totale de la paroi, mais également de donner des indications utiles pour le confort thermique via l'estimation de la capacité thermique globale de la paroi.

5. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Ce travail propose une méthode bayésienne pour l'estimation de la résistance thermique totale de murs pouvant présenter des propriétés thermiques très différentes, en tenant compte de diverses sources d'incertitudes. La méthode est appliquée sur des données simulées en supposant inconnues les épaisseurs de chaque couche. Pour réduire l'influence des conditions extérieures sur les résultats, un prototype permettant de chauffer la surface intérieure est utilisé et une révision du modèle direct est appliquée. Les résultats d'estimation sont très encourageants pour les deux parois étudiées (l'application de cette méthode à l'analyse de parois réelles est en cours). En première perspective à ce travail, on pourra s'intéresser plus précisément à l'influence sur les résultats d'estimation de la réduction du temps de stabilisation, qui se traduit par une méconnaissance de la température dans la paroi lors de l'activation de la sollicitation thermique, qui peut détériorer l'estimation de la résistance thermique totale dans le cas des parois

très épaisses. Proposer des prédicteurs exploitant des simulations 3D et pas seulement 1D et 0D est une autre piste d'amélioration à ce travail. Pour les parois épaisses et fortement isolées, ceci permettra d'obtenir des simulations plus proches des mesures réelles, de réduire l'incertitude de modèle et ainsi obtenir une meilleure précision d'identification de R_{Tot} .

BIBLIOGRAPHIE

- Berger, J., Orlande, H. R., Mendes, N., and Guernouti, S. (2016). Bayesian inference for estimating thermal properties of a historic building wall. *Building and Environment*, 106 :327–339.
- Bienvenido-Huertas, D., Moyano, J., Marín, D., and Fresco-Contreras, R. (2019). Review of in situ methods for assessing the thermal transmittance of walls. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 102 :356–371.
- François, A., Ibos, L., Feuillet, V., and Meulemans, J. (2020). Estimation of the thermal resistance of a building wall with inverse techniques based on rapid active in situ measurements and white-box or arx black-box models. *Energy and Buildings*, 226 :110346.
- Ha, T., Feuillet, V., Waeytens, J., Zibouche, K., Thebault, S., Bouchie, R., Le Sant, V., and Ibos, L. (2020). Benchmark of identification methods for the estimation of building wall thermal resistance using active method : Numerical study for iwi and single-wall structures. *Energy and Buildings*, 224 :110130.
- Ha, T.-T., Feuillet, V., Waeytens, J., Zibouche, K., Peiffer, L., Garcia, Y., Le Sant, V., Bouchie, R., Koenen, A., Monchau, J.-P., et al. (2022). Measurement prototype for fast estimation of building wall thermal resistance under controlled and natural environmental conditions. *Energy and Buildings*, 268 :112166.
- Kaipio, J. P. and Fox, C. (2011). The bayesian framework for inverse problems in heat transfer. *Heat Transfer Engineering*, 32(9) :718–753.
- Kerleguer, B. (2023). Multifidelity surrogate modeling for time-series outputs. *SIAM/ASA Journal on Uncertainty Quantification*, 11(2) :514–539.
- Perrin, G. (2020). Adaptive calibration of a computer code with time-series output. *Reliability engineering & system safety*, 196 :106728.
- Roulet, C., Gass, J., and Marcus, I. (1987). In-situ u-value measurement : reliable results in shorter time by dynamic interpretation of measured data. *ASHRAE Trans*, 108(2) :1371–1379.
- RT, R. T. (2012). Ed. centre scientifique et technique du bâtiment. (*in French*).
- Teni, M., Krstić, H., and Kosiński, P. (2019). Review and comparison of current experimental approaches for in-situ measurements of building walls thermal transmittance. *Energy and Buildings*, 203 :109417.
- Yang, Y., Chen, Z., Wu, T. V., Sempey, A., and Batsale, J.-C. (2022). In situ methodology for thermal performance evaluation of building wall : A review. *International Journal of Thermal Sciences*, 181 :107687.

Modeling-Experimental Methodology for Estimating the Psychological Adaptive Component of Occupants' Perceived Comfort

Tosin Omoya^{1,2}, Denis Bruneau^{1,2,3}, Thomas Recht^{1,2}, Aline Barlet³

¹Univ. Bordeaux, CNRS, Bordeaux INP, I2M, UMR 5295, F-33400, Talence, France

²Arts et Metiers Institute of Technology, CNRS, Bordeaux INP, Hesam Université, I2M, UMR 5295, F-33400 Talence, France

³École Nationale Supérieure d'Architecture et de Paysage de Bordeaux, I2M (UMR 5295), 33405 Talence, France

Mél. : tosin.omoya@u-bordeaux.fr

RÉSUMÉ : L'objectif de cet article est de développer un modèle capable d'évaluer la capacité d'adaptation psychologique des occupants afin d'améliorer l'évaluation et la prédiction du confort perçu par les occupants. Un modèle existant a été exploré, qui prenait en compte à la fois la composante physiologique et adaptative du confort thermique. Ce modèle a donc été modifié et amélioré de manière à ce que la capacité d'adaptation psychologique des occupants puisse être évaluée. Le modèle amélioré était composé de six variables inconnues dans cinq équations opérationnelles dont la sixième ou équation de fermeture était nécessaire. Cela a conduit à des recherches expérimentales où les perceptions thermiques des sujets ont été prises dans des enceintes expérimentales ou des espaces intérieurs où les conditions thermiques ont été modifiées en automne, en hiver et en été. C'est ainsi qu'a été dérivée l'équation de fermeture, qui est une fonction des stimuli thermiques physiques des sujets et d'une composante psychologique du confort thermique. Par conséquent, la capacité d'adaptation psychologique des sujets a été évaluée et reliée à la température opérative intérieure et à la température extérieure.

MOTS-CLÉS : capacité d'adaptation psychologique, confort perçu, perception thermique, stimuli thermiques

ABSTRACT: The aim of this paper is to develop a model that can evaluate the psychological adaptive capacity of occupants to enhance the evaluation and prediction of occupants' perceived comfort. An existing model was explored which considered both the physiological and adaptive component of thermal comfort. Hence, this model was modified and enhanced so that the psychological adaptive capacity of occupants can be evaluated. The enhanced model was made up of six unknown variables in five operational equations of which the sixth or closure equation is required. This led to some experimental investigations where the subjects' thermal perceptions were taken in some experimental enclosures or indoor spaces where the thermal conditions was modified in the autumn, winter and summer seasons. Thus the closure equation was derived, which is a function of the physical thermal stimuli of the subjects and a psychological component of thermal comfort. Therefore, the psychological adaptive capacity of the subjects was evaluated and further linked to the indoor operative temperature and outdoor air temperature.

KEYWORDS: psychological adaptive capacity, perceived comfort, thermal perception, thermal stimuli

1.0 Introduction

The emerging change in the world climate fixture and global warming has become a crucial factor that influences the thermal comfort of occupants. This climate change has induced some corresponding change in the human thermal adaptation and psychological comportment, which has influenced occupants' thermal perception. It's therefore necessary to infuse these thermal, adaptive and psychological variations into thermal comfort evaluations.

Two kinds of approach exist in contemporary thermal comfort evaluation: (1) the heat balance approach based on laboratory studies and (2) the adaptive approach based on field studies (Yao et al. 2009). The heat balance approach mainly considered the thermal equilibrium and heat exchange between the occupant's body and the surroundings while the adaptive thermal comfort approach, considered the adaptive feedbacks and behavior of occupants as a significant component of the thermal comfort evaluation.

The heat balance approach functions on the principle that to attain thermal balance in the body, the rate of heat produced (ϕ) by the body metabolism must be equal to the rate of heat loss (L) to its

external environment via the body surface, respiratory system and other physiological heat exchange mechanism. Therefore thermal equilibrium is attained when;

$$\varphi = L \tag{1}$$

where $L = W + \varphi^{conv} + \varphi^{rad} + \varphi^{evap} + \varphi^{cond}$

In which φ^{conv} , φ^{rad} , φ^{evap} , φ^{cond} are the heat losses via convective, radiant, evaporative and conductive exchanges and W is the work done by the activity of the body.

The Fanger (1970) predicted mean vote (PMV) model was based on the heat balance principle. However, the Fanger PMV model is not universal, because of some discrepancies with the field results; hence the concept of “adaptive thermal” comfort approach was integrated.

Adaptive Thermal Comfort Evaluation

The fundamental principle of the adaptive approach is expressed by the adaptive principle: if any change occurs such as to produce discomfort, people react in ways which tend to restore their comfort (Nicol et al., 2002). Based on this fundamental principle, researchers were able to categorize the adaptive comfort factors into two main families: (1) physical and (2) psychological family. The physical adaptive factors refers to physical changes a person makes, in order to adjust oneself to their environment conditions (reactive adaptation), or the changes a person makes in order to alter the environment conditions to his needs (interactive adaptation) (Nikolopoulou et al. 1999). The psychological adaptation refers to an altered perception of, and reaction to, sensory information due to subjective past thermal experiences and expectations (de Dear et al. 2002). Some of the psychological adaptive processes include; (1) expectations and experience (2) perceived control (3) environmental stimulation (4) place factor and much more. Thus to integrate some of these adaptive factors into thermal comfort evaluation some models were developed. One of these models is the adaptive predicted mean vote (aPMV) model of Yao et al. 2009 which relates PMV to the thermal sensation vote (TSV) of subjects using a “black box” model approach. Yao et al. was able to enumerate theoretically that Fanger’s PMV model is mainly a relationship between the physiological processes of the human body and the thermal conditions of his environment, thereby omitting the adaptive and psychological factor that influences the thermal perception of the occupant. Therefore Yao postulate that, similar to the steady state theory, physiological processes are contained within the ‘Black Box’, but psychological and behavioral processes will give an ‘Adaptive (contrary) Feedback’ (Yao, 1997). This implies that the physiological component (X) that exist in the “black box” (G) responds proportionately to the thermal load influencing the physical thermal stimuli (δ). While the adaptive component (Y) acts adaptively contrary to the value of the physiological component (X) when weighed on a thermal sensation scale (TSS), as illustrated in Figure 1 below.

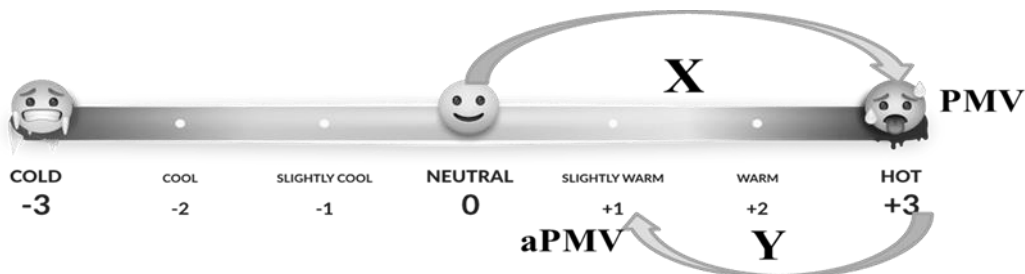


Figure 1: Reaction between the physiological X and adaptive Y component of thermal comfort

Thus, the mathematical expressions below define Yao proposed model:

$$aPMV = X - Y \quad [-] \tag{2}$$

where the physiological component has been proposed by Yao as follows:

$$X = G \times \delta = PMV \quad [-] \quad (3)$$

and the adaptive component has been proposed by Yao by introducing a psychological coefficient K_δ :

$$Y = G \times K_\delta \times aPMV \quad [-] \quad (4)$$

Yao also proposed the adaptive factor η as a function of physical thermal stimuli δ and K_δ :

$$\eta = \frac{K_\delta}{\delta} \quad [-] \quad (5)$$

Then Combining equations 2-3-4-5

$$aPMV = \frac{PMV}{1 + \eta \times PMV} \quad [-] \quad (6)$$

The Yao's model is thus suitable for this research objective because it aim to evaluate the physiological component (X) and the adaptive component (Y) of the "black box" and then integrated these components into a single thermal comfort value. However, it focused of the behavioral adaptive factors of the occupant. Nevertheless, these qualities of Yao's model validated its use in quantifying the psychological component of occupants' thermal perception. Hence, some modifications were made to enhance the results of the modified proposed model.

2.0 Proposed Modeling-Experimentation Methodology

Firstly, to evaluate the physical thermal stimuli δ we propose that the operative temperature T_{op} is a more relevant parameter than the air Temperature T_a (proposed by Yao) because it takes into account more thermal parameters influencing the stimuli of the human body as depicted in the equation (7):

$$T_{op} = \frac{T_{mrt}h_r + T_a h_c}{h_r + h_c} \quad [^\circ\text{C}] \quad (7)$$

Where T_{mrt} is the mean radiant temperature, h_c and h_r are the heat transfer coefficient due to convective and radiant heat exchange respectively.

Thus we proposed the physical thermal stimuli to be:

$$\delta = T_{op} - T_{op}^n \quad [^\circ\text{C}] \quad (8)$$

Where T_{op}^n is the neutral operative temperature, instead of the neutral air temperature T_a^n proposed in Yao's model. Hence, T_{op}^n is the operative temperature when the subject neither feels hot or cold nor have any impulse to adjust himself or his environments' thermal conditions. Therefore, it is the operative temperature where $aPMV = 0$

$$T_{op}^n = T_{op} \Leftrightarrow aPMV = 0 \quad [^\circ\text{C}] \quad (9)$$

Thirdly, the Yao equation (6) implies that when $PMV = 0$ then $aPMV = 0$. This Yao's expression could not efficiently evaluate the adaptive behavior of the subjects when $PMV = 0$; because the aPMV outcome from the equation is a value not other than zero. Therefore, we chose to modify equation (6). Thus we proposed that;

$$aPMV = PMV - \eta \quad [-] \quad (10)$$

This equation (10) respects the Yao (1997) postulation that the physiological evaluation and adaptive factor reacts contrary to each other as graphically expressed in Figure 1; and the fundamental principle of adaptive comfort by Nicol et al. (2002).

The physiological component of equation (10) is evaluated via fanger's PMV equation (Fanger, 1970):

$$PMV = (0.303e^{-0.036 \varphi} + 0.028) \times (\varphi - L) \quad [-] \quad (11)$$

To calculate for the total heat loss L from the subjects body;

$$L = \varphi_{cl}^{Conv} + \varphi_{cl}^{rad} + \varphi_{sk}^{Sw} + \varphi_{sk}^{Diff} + \varphi_{res}^{Conv} + \varphi_{res}^{evap} \quad [W \cdot m^{-2}] \quad (12)$$

Where φ_{cl}^{Conv} , φ_{cl}^{rad} , φ_{sk}^{Sw} , φ_{sk}^{Diff} , φ_{res}^{Conv} , φ_{res}^{evap} are the heat loss via the clothing surface cl , skin surface sk and respiratory tracks res by convection, radiation, sweating, diffusion, and evaporation.

Then to evaluate the values of the physical thermal stimuli δ and the psychological coefficient K_δ , equation (8) and (5) were used respectively.

Based on the model equations above (equation (10), (11), (12), (8) and (5)) there are 6 unknown variable namely $aPMV$, PMV , L , T_{op}^n , K_δ , δ in 5 equations. Therefore, obtaining the 6th equation for closure is necessary; this ‘‘closure equation’’ was obtained by conducting some experiments and evaluating its results. Hence, this equation formulates the relationships that exist between the psychological coefficient and some physical thermal parameters.

2.1 Modeling Protocol

Figure 2 below illustrates the operation that evaluates the psychological coefficient K_δ as a function of some physical thermal factors that influences the subjects’ perception (6th or closure equation).

The physical measurements collected from the experimental cell and the subjects clothing were utilized to calculate the PMV values using equations (11) and (12); then the questionnaires’ results were evaluated into thermal sensation votes (TSV), used specifically to evaluate the aPMV values. According to equation (10) the adaptive factor η values were obtained. After which, the value of the neutral temperature T_{op}^n is determined in accordance with the definition given in equation (9); making it possible to obtain the value of the physical thermal stimuli δ via equation (8). Lastly the values of the psychological coefficient K_δ were calculated using equation (5).

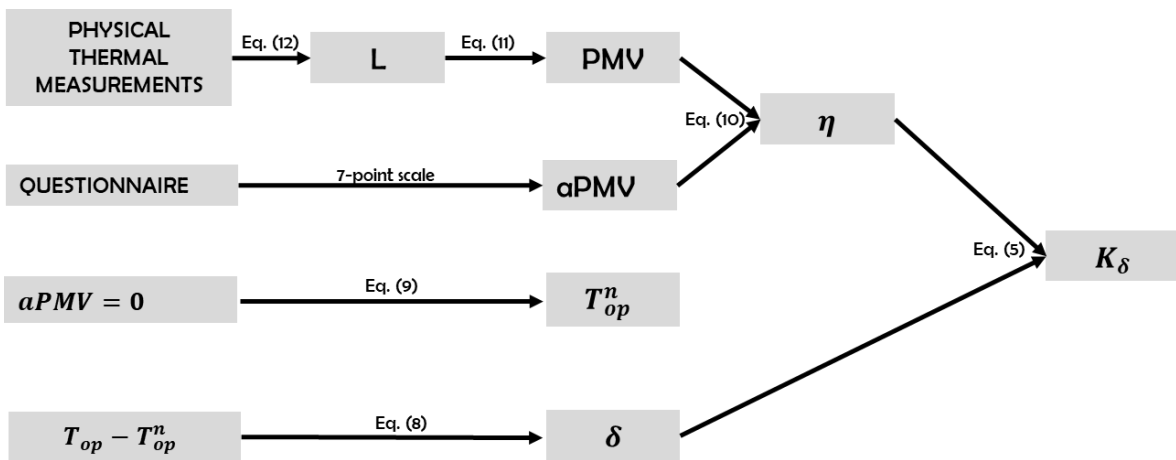


Figure 2: Scheme of the combined experimental-modeling protocol; up to the values of psychological coefficient K_δ

2.2 Experimental Setup

The objective of the experiments is to create an indoor space with precise and measurable surface characteristics such that the magnitude of the thermal factors and temperatures can be modified and measured accurately. Then the information about the thermal flux reception and thermal perception of the subjects within the enclosure can be obtained simultaneously.

Three forms of experimental protocol were conducted; this includes (1) the ‘‘autumn (20/10/2022 to 26/10/2022)’’ (2) the ‘‘winter (30/01/2023 to 03/02/2023)’’ and (3) the ‘‘summer (05/07/2022 to 08/07/2022)’’ experiments. These experiments were carried out in a naturally ventilated room with no insolation (for the winter convective and radiant conditions). Also, a dedicated experimental cell of about 2.5 m \times 4 m rectangular floor area which was built in the Institute of Mechanics and Engineering (I2M), a CNRS laboratory in Bordeaux-France (for the autumn and summer convective

and radiant conditions). The surface temperatures within the experimental cell were adjusted by externally heating and cooling the enclosure. Emulating real office conditions (like experiencing solar gains from a wall), one opaque external wall was either cooled (20 to 10°C range) or heated (20-40°C range). The walls of the experimental cell are made of uniform and conductive surface material (metallic plate of relatively high emissivity at ambient temperature) in order to have an efficient radiant emission from the walls. The ceiling and the floor are made up of gypsum board and terrazzo floor finish respectively. Direct solar radiations (which constitute short wave radiations) were not allowed into the experimental cell, so as to ensure that the radiant load was precisely accounted for.

Participants in the experiments included staffs from diverse offices and laboratories in Bordeaux, aged between 20 to 65 years old (with over 80% falling between 20-32 years old), representing different nationalities, with approximately 70% of France origin. In the ‘winter’ season, there were 17 males and 12 females; in ‘autumn’ 18 males and 6 females; and in ‘summer’ 15 males and 14 females. The outdoor air temperatures varied between 15°C and 22°C in ‘autumn’, 0°C and 14°C in ‘winter’, 23°C and 35°C in ‘summer’ throughout the experiments. Each experiment involved four stages for each participant: the pre-experimental period, the waiting period, the questionnaire period and the post-experiment period.

Hence, the subjects were instructed to complete a questionnaire while in the enclosures. This questionnaire was structured to provide information and data of the thermal sensation vote (TSV) of the subjects so as to evaluate the aPMV values. It also includes questions that will provide quantitative values on the evaluation of psychological adaptation of the subjects.

3.0 Evaluation of psychological coefficient

The values of the psychological coefficient K_δ were calculated via equation (5). Hence the regression graph of the psychological coefficient K_δ versus the physical thermal stimuli δ was plotted to determine the function of the adaptive factor η . This was done for the autumn, winter and summer thermal conditions as represented in Figure 3. According to the graphs below, the psychological adaptive factor of the subjects was deduced to be -0.7, -1.4 and 0.5 respectively, via the regression for the three seasons as enumerated in equation (13), (14) and (15) as shown on Table 1 :

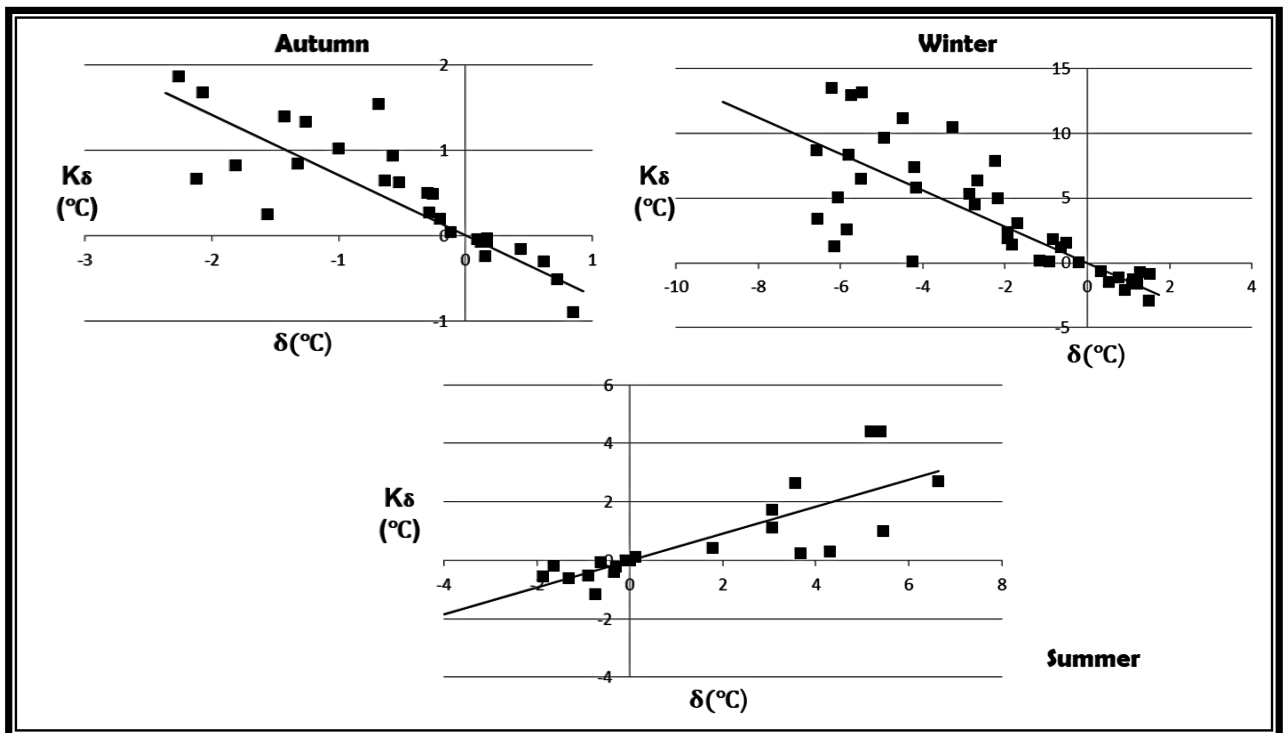


Figure 3: The regression of psychological coefficient and physical thermal stimuli

Table 1: Regression equation and adaptive factor for each season

Season	Regression	R ² coefficient	Adaptive factor	Equation
Autumn	$K_{\delta} = -0.7 \cdot \delta$	0.7	$\eta = -0.7$	(13)
Winter	$K_{\delta} = -1.4 \cdot \delta$	0.6	$\eta = -1.4$	(14)
Summer	$K_{\delta} = 0.5 \cdot \delta$	0.7	$\eta = 0.5$	(15)

These adaptive factors can be referred to as the average adaptive factor for each season. Therefore we further examined the relationship between the adaptive factor and some physical thermal parameters

Relationship between adaptive factor and physical thermal parameters

Different adaptive factor η and neutral temperatures T_{op}^n was evaluated for each season; this implies that these parameters are influenced by the outdoor air temperature T_{out} . Consequently, the magnitude of the psychological coefficient K_{δ} and physical thermal stimuli δ varies with the change in the outdoor temperature T_{out} . Therefore the relationship between the outdoor temperature and the neutral temperature was examined as shown in Figure 4 and its regression equation (16).

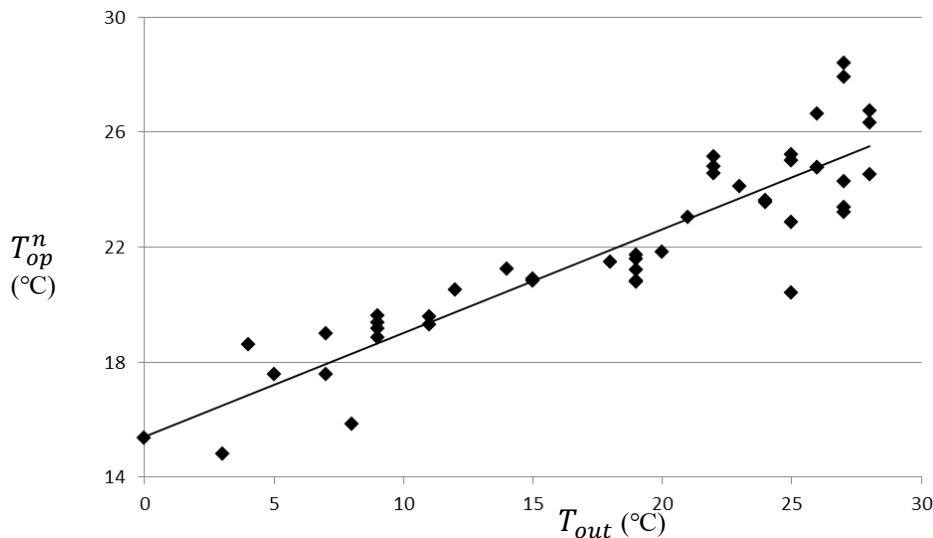


Figure 4: The correlation of neutral temperatures T_{op}^n and the outdoor air temperature T_{out}

$$T_{op}^n = 0.36 T_{out} + 15.4 \quad [^{\circ}\text{C}] \quad R^2 = 0.8 \quad (16)$$

Hence the regression equation can be infused into the adaptive factor equation (5):

$$\eta = \left(\frac{K_{\delta}}{T_{op} - 0.36 T_{out} - 15.4} \right) \quad [-] \quad (17)$$

Furthermore the linear regressions (Figure 5) and equations (Table 2) of the psychological coefficient versus the operative temperature for the autumn, winter and summer season includes:

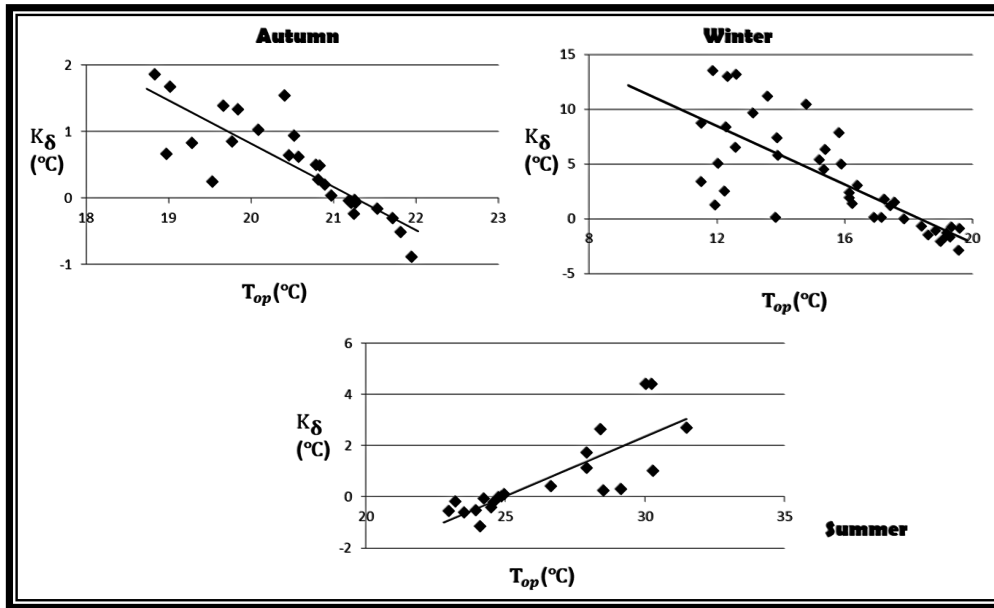


Figure 5: The correlation of psychological coefficient K_δ and operative temperatures T_{op}

Table 2: Regression equation of psychological coefficient and operative temperature for each season

Season	Regression	R ² coefficient	Equation
Autumn	$K_\delta = -0.7 \cdot T_{op} + 13.8$	0.7	(18)
Winter	$K_\delta = -1.3 \cdot T_{op} + 24.3$	0.6	(19)
Summer	$K_\delta = 0.5 \cdot T_{op} - 11.6$	0.7	(20)

Therefore, to be able to evaluate the psychological adaptation of the subjects using physical thermal parameters, we substituted equation (18), (19) and (20) into (17) and the result is shown in Table 3:

Table 3: Resultant equation of the psychological adaptive factor for each season

Season	Regression	Outdoor temperature range	Equation
Autumn	$\eta = \frac{13.8 - 0.7T_{op}}{T_{op} - 0.36T_{out} - 15.4}$	$15^\circ\text{C} \leq T_{out} \leq 22^\circ\text{C}$	(21)
Winter	$\eta = \frac{24.3 - 1.3T_{op}}{T_{op} - 0.36T_{out} - 15.4}$	$0^\circ\text{C} \leq T_{out} \leq 14^\circ\text{C}$	(22)
Summer	$\eta = \frac{0.5T_{op} - 11.6}{T_{op} - 0.36T_{out} - 15.4}$	$23^\circ\text{C} \leq T_{out} \leq 30^\circ\text{C}$	(23)

4.0 Discussion and Conclusions

Based on the results from equations (13), (14) and (15), we can deduce that the adaptive factor obtained for the autumn, winter and summer (-0.7, -1.4, 0.5) are the average value of the adaptive capacity of the subjects for each season mentioned. Moreover we must note that these adaptive factors are psycho-physical quantities since they are evaluated with the thermal sensation scale (TSS) as psychological magnitudes.

Hence equation (21), (22) and (23) endeavored to derive these psychological magnitudes via its relationships with physical thermal parameters. Therefore from these equations we can enumerate that the adaptive capacity of the subjects is largely influenced by the indoor operative temperature and the

outdoor air temperature. This implies that the thermal perception of the occupants is not only influenced by the thermal load in the indoor space, but also by the remembering of the experiences, expectations and information of the outdoor thermal condition in the human cognitive long-term and short-term memory. Consequently, this indicates the impact of schema on the adaptive capacity of occupants.

Schema are cognitive structures that represent the organized knowledge about a given stimulus as well as rules that direct its information processing. Weick (1979) defined schema as an abridged, generalized, corrigible organization of experiences that serves as an initial frame of reference for action and perception. It therefore serves as the tools that people use to extract the maximal useful “information” from an environment using the least amount of effort (Rosch, 1978). The concept of schema implies that information about some stimuli has been categorized or organized in the human cognitive (long-term) memory and the result of this organization is a discernible pattern which may be used as a basis for future judgments, decisions, inferences, or predictions (Markus, 1977). Therefore the human cognitive structure or schema influences the magnitude of diminution (resistance) of sensory response to incoming thermal stimuli by the subjects in the indoor space. Hence the magnitude of these sensory diminutions by the subjects is evaluated as the “adaptive factor”.

Furthermore, this model can be applied to thermo-dynamic simulation for thermal designs of buildings, so that the adaptive capacity of occupants are being captured into thermal designs, for naturally ventilated buildings, mixed mode and even in HVAC building especially those controlled by automated systems. It will aid engineers and professionals to make designs that correspond to the actual thermal requirements and psychological variations of the occupants. Moreover, this approach to thermal designs may eventually aid to minimize energy waste and maximize energy savings in buildings.

Finally, the result of this model-experimentation methodology is limited to Bordeaux geographical location, climate variation, culture and lifestyle. It will be interesting to explore other regions and continents, so as to characterize the thermal and psychological parameters in these regions.

References

- De Dear, R. J., & Brager, G. S. 2002. Thermal comfort in naturally ventilated buildings: revisions to ASHRAE standard 55. *Energy and Buildings*, 34(6), 549-61.
- Fanger, P. O. 1970. *Thermal comfort analysis and application in environment engineering*. Copenhagen, Denmark: Danish Technical Press.
- Markus, H. 1977. Self-schemata and processing information about the self. *Journal of Personality and Social Psychology*, 35, 63-78.
- Nicol, J. F., & Humphreys, M. A. 2002. Adaptive thermal comfort and sustainable thermal standards for buildings. *Energy and Buildings*, 34, 563-72.
- Nikolopoulou, M., Baker, N., & Steemers K. 1999. Thermal comfort in urban spaces: different forms of adaptation, *Proceedings of the REBUILD 1999 on Shaping Our Cities for the 21st Century*, Barcelona, Spain.
- Rosch, E. 1978. Principles of categorization. In Collins, A., & Smith, E. E. (Eds.), *Readings in cognitive science, a perspective from psychology and artificial intelligence* (p. 312-322). Morgan Kaufmann Publishers.
- Weick, K. E. 1979. Cognitive processes in organizations. *Research in organizational behavior: an annual series of analytical essays and critical reviews*, 1, 41-74.
- Yao R., 1997. *Study on Indoor Climate Simulation and Thermal Comfort*. PhD thesis. Chongqing Jianzhu University, Chongqing, China.
- Yao, R., Baizhan, L., & Jing, L. 2009. A theoretical adaptive model of thermal comfort – Adaptive Predicted Mean Vote (aPMV), *Building and Environment*, 44, 2089-2096.

Acknowledgments

The authors wish to thank the Petroleum Technology Development Fund (PTDF) of Nigeria and the Ministry of Culture, France for the financial support they provided for this research.

PREDIS-MHI Thermal Data: Thermal readings from a section of a sub-metered tertiary multi-use building

Seun OSONUGA^{1†}, Ali CHOUMAN^{1,2}, Muhammad-Salman SHAHID¹, Benoit DELINCHANT¹, Frederic WURTZ¹

¹ Univ. Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP*, G2Elab, 38000 Grenoble, France

² Centre Scientifique et Technique du Batiment (CSTB), F-06904 Sophia Antipolis, France

* Institute of Engineering Univ. Grenoble Alpes

† seun.oseonuga@g2elab.grenoble-inp.fr

ABSTRACT. Tertiary buildings could be an important lever to meet the goals necessitated by the energy transition. The availability of high-quality datasets from this sector will be a crucial enabler in meeting these goals by developing and testing new energy management approaches in the buildings. In this paper, we present the thermal energy datasets available and published online for the PREDIS-MHI zone of the GreEn-ER building, a tertiary building with more than a thousand sensors used for research, teaching, and administrative activities in Grenoble. PREDIS-MHI platform is a net-zero sub-section that is energetically isolated from the rest of the building. Its data has been used in a wide range of applications from indoor temperature forecasting, thermal simulation calibration, and even occupant comfort experiments.

KEYWORDS: Open Energy Data; Sub-metered tertiary building; Data Use case.

1. INTRODUCTION

Although not the majority of the world's building stock, tertiary multi-use buildings contribute a significant proportion to the greenhouse gas (GHG) emissions from buildings in most of the world's cities. In France, these buildings represent about 24% (973.4 million m²) of the total floor area, and account for about a third of the final energy consumption in buildings. Most of the energy consumed in building is on spent on heating and cooling. The French Construction and Housing Code had set an obligation for tertiary buildings to reduce their final energy consumption by 40% in 2030, 50% in 2040, and 60% in 2050. According to ADEME, tertiary buildings in France account for almost a third of the energy consumed in the built environment.

As such this article presents the PREDIS-MHI Thermal Data, a thermal energy dataset from a thermally and electrically separated section of the GreEn-ER building in Grenoble (Osonuga et al. 2024). In this article, the HVAC system for the PREDIS-MHI platform is described as well as its machine-readable corollary which is based on the BRICK schema (Fierro et al. 2019). Finally, several use cases are presented of the dataset with special mention given to the use case of an energy simulator calibration.

2. DESCRIPTION OF THE PREDIS-MHI PLATFORM

The GreEn-ER building, in which the PREDIS-MHI platform is found, is a five-storey mixed-used tertiary building in Grenoble France with a total floor space of about 22,700 m² (Delinchant et al. 2016). It houses about 2000 researchers and students who frequent the building either for the resident laboratory G2Elab or the engineering school, ENSE3.

The PREDIS-MHI platform, with a floor space of about 600 m², is located mostly in the corner of the fourth floor of the GreEn-ER building as seen in Figure 1. There are also a few other rooms on the second floor of the same building. The shown area is made of a classroom (Room 4A020), an exposition room (Room 4A013), and 6 offices (Rooms 4A014 – 4A019) as shown on the left side of Figure 1. More details about the dimensions of the PREDIS-MHI platform and the larger building can be found in the 3d model of the platform that is part of the PREDIS-MHI dataset (Osonuga et al. 2024).

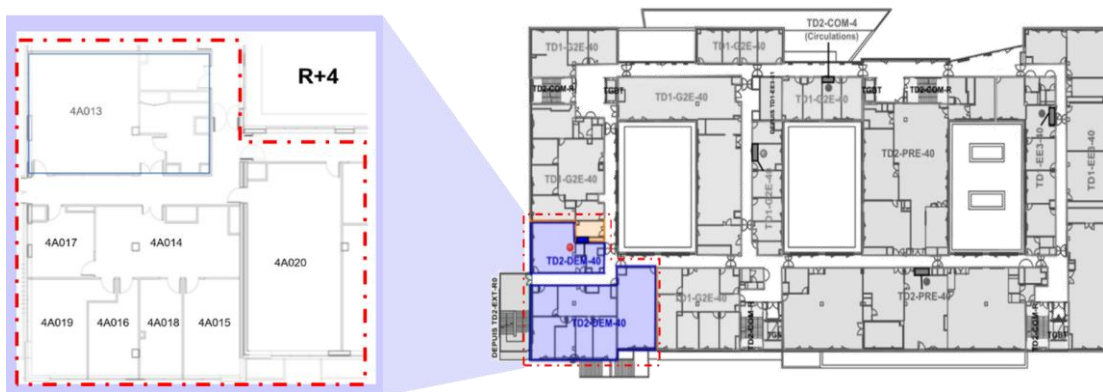


Figure 1: The PREDIS-MHI Platform in the GreEn-ER Building

The PREDIS-MHI platform is served by an exclusive HVAC system. The system has a dedicated Air Handling Unit (AHU) located on the building's rooftop whose schematic is shown in Figure 2. Hydroponic sources from the local district heating network provide the heating and cooling of the HVAC system. Each room is treated as an individual HVAC zone with the ability to regulate the set points for the temperature and CO₂ levels. The temperature control is mostly provided in two modes - through reheat VAV coils, or the installed radiant ceilings. Each of the rooms can be operated in the one of the above modes or in a third that only does ventilation without heating or cooling. In this third mode, the blown air will be the same temperature as the air at the AHU which is preconditioned to 21 degrees in the summer months and 19 degrees in the winter months. A machine-readable description of this system is available as part of the dataset.

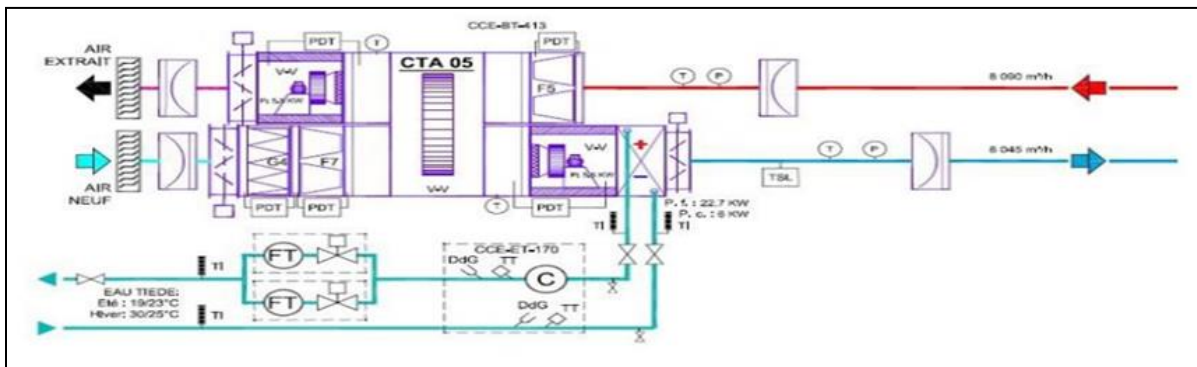


Figure 2: The Air Handling Unit

3. PREDIS-MHI DATA

3.1. DESCRIPTION OF THE DATA

The dataset includes the unsampled data from the building management systems as well as building meta-data. Figure 4 shows the arrangement of the dataset with room-level data including temperature, CO₂, and Airflow rates. There is also specific data from the Air handling unit and general data in the root folder of the dataset.

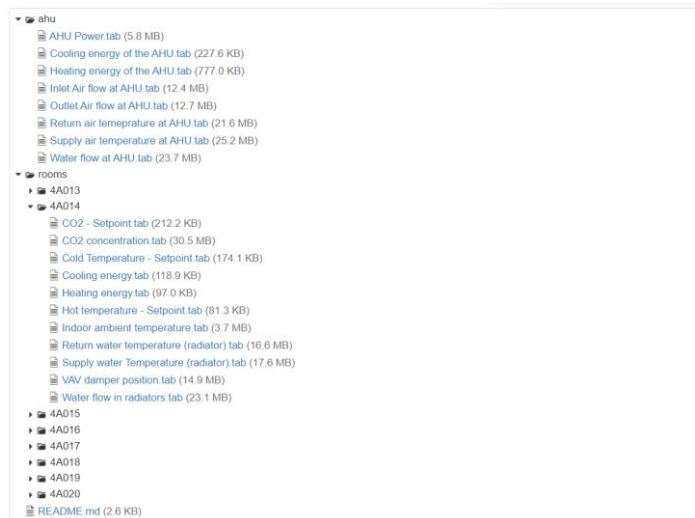


Figure 4: Folder structure of the PREDIS-MHI dataset on *recherche.data.gouv*

3.2. DATASET CONSTRUCTION

The GreEn-ER building is equipped with numerous sensors and actuators which measure the building conditions in real-time and enable the modification of the operating conditions from the building management system, known as EcoStruxure (Mora et al. 2012). The data storage process comprises multiple steps. The data is measured by installed sensors in real time and is stored in the memory of the concerned programmable logic controller (PLC). The PLC has a data retention of 15 days; therefore, every new registered value pushes out the oldest registered value from the memory. To avoid the loss of this data, the values from these PLCs is copied on the SQL database. This SQL database does not have a retention policy. No pre-treatment of data is realised at this stage. This data can be visualized by using the EcoStruxure web interface. Only a limited part of this data is related to the demo zone of the GreEn-ER building, therefore, the data of the demo zone is at disposal for research and teaching. If necessary, a pre-treatment of data is realised at this stage. This data is retrievable from the time-series database on the MHI server (known as influxDB) and can be visualized publicly using the Grafana web interface tool. Figure 5 illustrates a simplified version of the registration and visualisation process of GreEn-ER data.

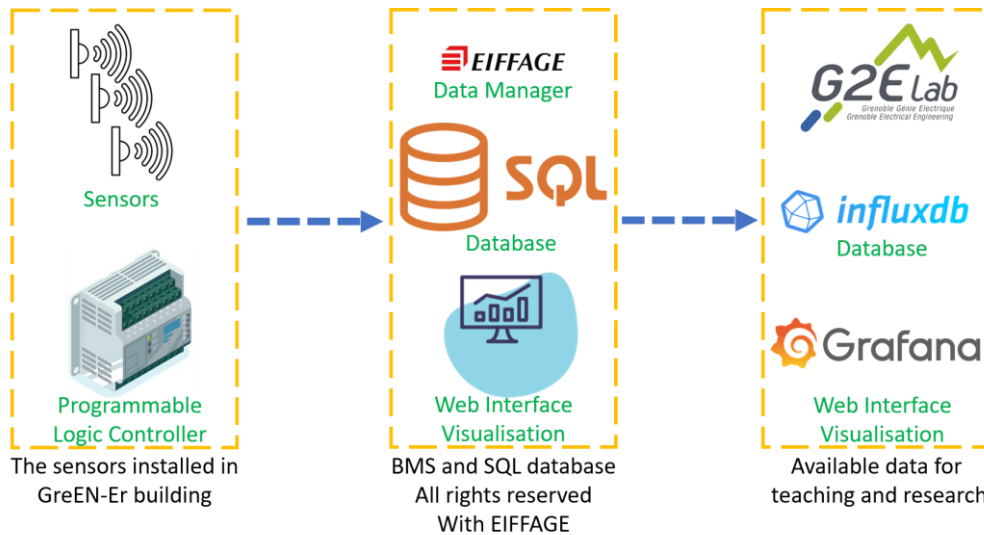


Figure 5: Simplified schematic diagram of GreEn-ER data registration and visualisation process

3.3. VISUALIZATION OF DATA

The raw data collected was a set of DataFrame files containing the values recorded by each sensor for a standard time step. To use and visualize the information given by the sensors, a data treatment script was developed. This script generates graphs of both overall and specific heating and cooling consumption, showcasing energy trends throughout a selected year. It also incorporates indoor temperature and airflow information into the analysis. Data of various measures are consolidated into a single DataFrame, with values standardized to a one-hour interval through interpolation. For temperature datasets containing missing values, these gaps are filled using data from the previous time step. A graphical user interface within the script allows users to select specific datasets for visualization, presenting annual trends of data. Graphs illustrate the operational patterns of the ventilation system, which is inactive overnight as shown in Figure 7, where the air change rate (ACR) value, indicating the volume of fresh air introduced into the space per hour, exhibits elevated levels from 6 AM to 6 PM during the daytime and significantly decreases during the night-time. Similarly, temperature variations within the rooms align with predetermined economy and comfort thresholds for night and day periods, respectively.

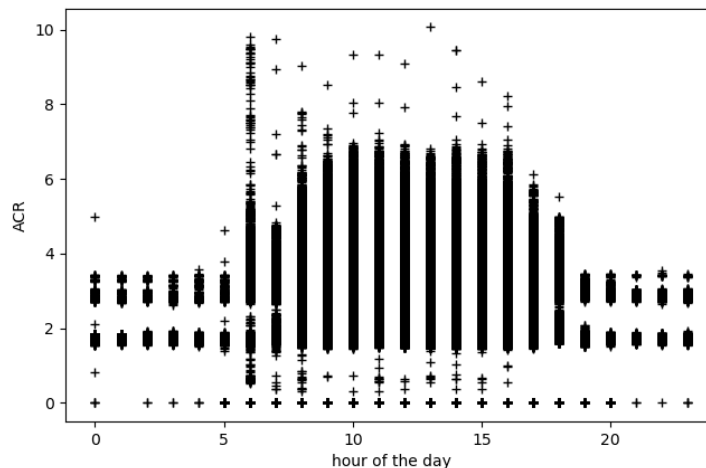


Figure 7: The evolution of air change rate in the rooms according to the day hour.

The energy consumption graphs indicate heating from January to April and October to December, with cooling occurring from July to September (see Figure 8).

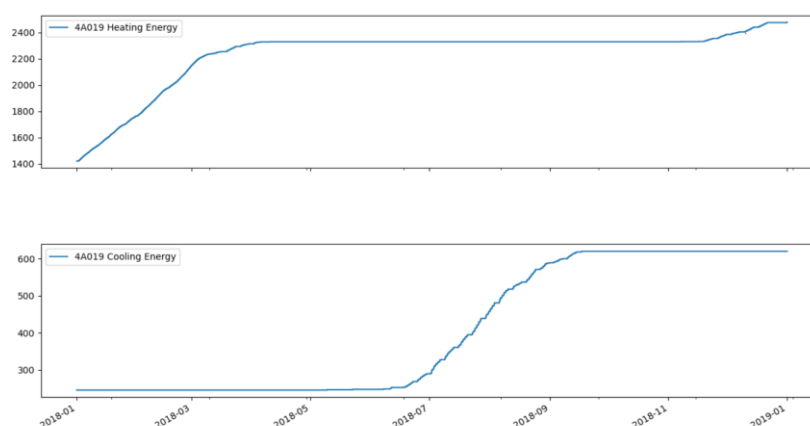


Figure 8: Example of heating and cooling energy in the room 4A019 of PREDIS-MHI zone.

4. VALUE OF THE PREDIS-MHI THERMAL DATASET

The dataset has been in use not only for teaching at ENSE3 and research in G2ELab, rather it is also used for other purposes. The building took part in the energy flexibility competition during the academic year 2021-2022, launched by RTE (the French transmission operator) and a private entity, known as A4MT (short for action for market transformation). The energy savings obtained by modifying the thermal setpoints is calculated thanks to this data.

In addition to this, the G2ELab is part of an ongoing experiment in its living lab. This experiment is part of a research work carried out in the framework of a European project, known as COLLECTiEF (Aghaei et al. 2023). The purpose of this project is to play on the energy flexibility capacity of the HVAC system while considering the human comfort. The analysis of data is ongoing, whereas the initial results are published regarding the indoor thermal comfort analysis (Papadopoulos et al. 2023). Based on these studies, it is envisaged that an automated and robust machine learning based mechanism will be applied to achieve optimum energy flexibility without compromising human comfort in the building.

4.1. USE OF THE DATA

A practical application of PREDIS-MHI data use involves developing a thermal model through the Dimosim simulation tool. This model serves as a foundation for testing and evaluating advanced algorithms for managing energy systems. Dimosim is a bottom-up dynamic simulation platform, developed by the CSTB (Garreau et al. 2021). This tool is based on an object-oriented structure. The models of buildings and energy components are based on a physical description.

To run the Dimosim model, several pieces of information were needed. First, a detailed weather data file in .epw format is required to provide weather conditions. This is sourced from the weather station on the building (PREDIS-MHI (GreEn-ER) 2015). Additionally, the simulation needs to specify the duration of each timestep. A Geojson file describing the building is also crucial. This file includes details about the building's shape and design, in addition to the data of the physical characteristics in the simulated zone. Other information such as thermal energy consumption and energy system specifications are also needed.

The building's technical documentation is used to extract the essential data for the Geojson file, including the building's footprint and the thermal properties of its walls and windows. In addition, a meteorological file is created using data from the building's meteorological station. Furthermore, it's important to estimate both the total energy used to heat and cool the lab and the individual energy used by each office. For this purpose, a large dataset was collected from the lab's database, recording energy and temperature sensor measurements from June 2015 until 2022. For each room within the PREDIS-MHI zone, a virtual global energy meter is designated to approximate the aggregate thermal energy supplied by various energy systems. To enhance accuracy in this simulation, the analysis did not rely on readings from these virtual meters. Instead, calculations of the actual energy distributed to each room were conducted using data from real energy meters. Each office is conditioned using two methods: radiant ceilings and ventilation. The radiant ceilings are equipped with cumulative energy meters, which can calculate the ceiling's thermal energy consumption over time. In the case of ventilation, the energy output of the ventilation air flow is determined by two types of sensors. The first type is a cumulative energy meter at the air handling unit (AHU) level, which allows the estimation of the total energy produced and distributed by the AHU. The second type includes zonal airflow meters. This data is analyzed to determine the proportion of air delivered to the offices as a percentage of the total air delivered from the AHU. The energy delivered to each office is then estimated by multiplying this calculated airflow percentage by the total energy delivered by the AHU.

The collected raw data comprised DataFrame files, which documented the measurements from each sensor at consistent time intervals. A data processing script was crafted to transform and graphically represent the data, enabling the visualization of both overall and specific heating and cooling energy consumption, in addition to the air flow data. The external conditions data are also captured and treated to create the meteo file associated with the model. Indoor temperature and airflow data within the rooms were recorded every 10 minutes, although some datasets contained missing values, which were filled using the data from the preceding time step. Additionally, external weather conditions, including temperature and both direct and diffused solar radiation, were tracked with the same 10-minute resolution. For energy consumption metrics, cumulative energy meters were used, which log data each time a 1 kWh threshold is exceeded, rather than at fixed intervals. To align with the hourly time step of the Dimosim simulation, all collected data was standardized to a one-hour resolution by interpolation. The 3D representation of the model in Figure 6 shows three thermal zones-Greener 0, Greener 1, and Greener 2-which serve as boundary conditions for the simulated PREDIS-MHI area, referred to as G2ELab.

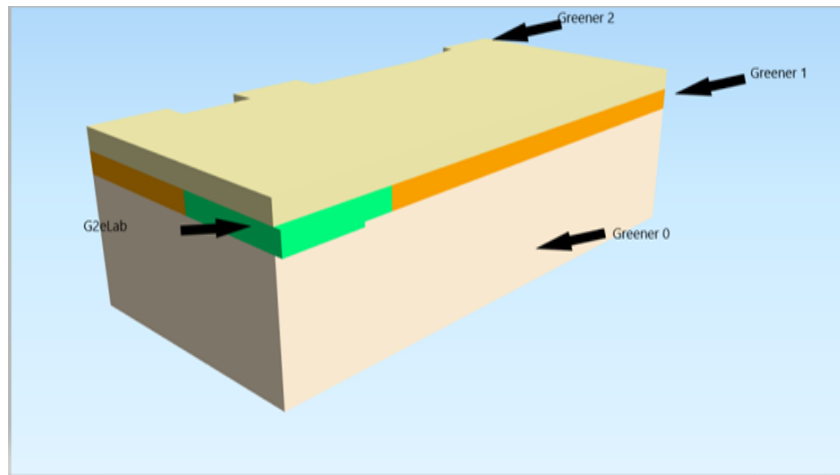


Figure 6: 3d Q-GIS view of the model used in Dimosim simulation.

5. CONCLUSIONS

This article has introduced the PREDIS-MHI Thermal a thermal energy dataset from a thermally and electrically separated section of the GreEn-ER building in Grenoble. In addition to this, the lifecycle was used to describe the process for the available energy datasets from the GreEn-ER building, a mixed-use education building in France.

As future work, we intend to publish the rest of the datasets from the GreEn-ER building. These include the thermal data from the rest of the building, the electrical data from the PREDIS-MHI platform which contains a solar PV array and EV charging points as well as the weather data from the building's weather station.

6. REFERENCES

- Aghaei, Mohammadreza, Amin Moazam, Silvia Erba, Mohammad Hosseini, Italo Aldo Campodonico Avendano, Muhammad-Salman Shahid, Ignacio Torrens-Galdiz, et al. 2023. "Collective Intelligence for Energy Flexibility – Collectief: An EU H2020 Project for Enhancing Energy Efficiency and Flexibility in Existing Buildings." In *2023 International Conference on Future Energy Solutions (FES)*. Vaasa, Finland: IEEE.
<https://doi.org/10.1109/FES57669.2023.10182779>.
- Delinchant, Benoit, Frédéric Wurtz, Stéphane Ploix, Jean-Luc Schanen, and Yves Marechal. 2016. "GreEn-ER Living Lab: A Green Building with Energy Aware Occupants." In *2016 5th International Conference on Smart Cities and Green ICT Systems (SMARTGREENS)*, 1–8.
<http://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7951366>.
- Fierro, Gabe, Jason Koh, Yuvraj Agarwal, Rajesh K. Gupta, and David E. Culler. 2019. "Beyond a House of Sticks: Formalizing Metadata Tags with Brick." In *Proceedings of the 6th ACM International Conference on Systems for Energy-Efficient Buildings, Cities, and Transportation*, 125–34. New York NY USA: ACM.
<https://doi.org/10.1145/3360322.3360862>.
- Garreau, Enora, Yassine Abdelouadoud, Eunice Herrera, Werner Keilholz, G. -E. Kyriakodis, Vincent Partenay, and Peter Riederer. 2021. "District MOdeller and SIMulator (DIMOSIM) – A Dynamic Simulation Platform Based on a Bottom-up Approach for District and Territory Energetic Assessment." *Energy and Buildings* 251 (November): 111354.
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111354>.
- Mora, D., M. Taisch, A. W. Colombo, and J. M. Mendes. 2012. "Service-Oriented Architecture Approach for Industrial 'System of Systems': State-of-the-Art for Energy Management." In

- IEEE 10th International Conference on Industrial Informatics*, 1246–51.
<https://doi.org/10.1109/INDIN.2012.6301130>.
- Osonuga, Seun, Salman Shahid, Ali Chouman, Frederic Wurtz, and Benoit Delinchant. 2024. “PREDIS-MHI Thermal Data.” Edited by Laboratoire de Génie Electrique de Grenoble. Recherche Data Gouv. <https://doi.org/10.57745/TZDEIH>.
- Papadopoulos, Panayiotis M, Ioanna Kyprianou, Muhammad Salman Shahid, Silvia Erba, Frédéric Wurtz, Benoit Delinchant, Peter Riederer, Mohammadreza Aghaei, and Salvatore Carlucci. 2023. “Indoor Thermal Comfort Analysis for Developing Energy-Saving Strategies in Buildings.” In *2023 International Conference on Future Energy Solutions (FES)*, 1–6. Vaasa, Finland: IEEE. <https://doi.org/10.1109/FES57669.2023.10183297>.
- PREDIS-MHI (GreEn-ER). 2015. “Météo GreEn-ER - GreEn-ER - Dashboards - Grafana.” GreEn-ER Open Data Dashboard - Weather. 2015. <https://mhi-srv.g2elab.grenoble-inp.fr/grafana/d/Ao6TxpsMz/meteo-green-er?orgId=3>.

Methodology for a Techno-Economic Evaluation of Heating & Solar Solution Packages in the Context of Energy as a Service – A Case Study

Pedraza Aguirre Paula*^{1,2}, Arnaud Jay², Monika Woloszyn¹, Etienne Wurtz²

¹ LOCIE, Solar Academy, Univ. Savoie Mont Blanc, CNRS,
73370, Le Bourget du Lac, France

² Univ. Grenoble Alpes, CEA, Liten, Campus Ines,
73375, Le Bourget du Lac, France

*paula.pedrazaaguirre@cea.fr

RESUME. Des solutions innovantes ont émergé pour atteindre les objectifs de décarbonisation. L'une de ces solutions est le modèle économique « Energy as a Service (EaaS) », dans lequel les entreprises prennent en charge l'investissement et la maintenance, et les consommateurs obtiennent des services énergétiques durables par le biais de modèles d'abonnement et de location. L'objectif de cette étude est d'identifier les facteurs clés pour la définition d'une méthodologie, dans le contexte de l'EaaS, permettant d'évaluer des solutions de chauffage et d'eau chaude sanitaire (ECS) avec intégration des énergies renouvelables dans le secteur résidentiel français. Pour cela, une simulation de six cas a été réalisée afin d'analyser la performance énergétique (technique, économique et environnementale) d'une maison à Trappes, avant et après rénovation thermique. Les résultats soutiennent l'approche de la méthodologie proposée, tout en soulignant l'opportunité de l'améliorer par l'analyse de nouveaux cas d'étude et la variation de paramètres, tels que la durée de vie de l'équipement et son investissement.

MOTS-CLÉS : STD, ACV, EaaS.

ABSTRACT. Innovative solutions have emerged in response to the need of meeting decarbonisation targets. One of these solutions is the business model Energy as a Service (EaaS), in which companies take responsibility for investment and maintenance, and consumers get sustainable energy services through subscription and lease models. The objective of this study is to identify key factors in the definition of a methodology, in the context of EaaS, for the evaluation of heating and Domestic Hot Water (DHW) solutions with integration of renewable energies in the French residential sector. In order to reach this objective, a simulation of six cases was carried out to evaluate the technical, economic and environmental energy performance of a house in Trappes, before and after thermal retrofitting. The results support the approach of the proposed methodology, while pointing out the opportunity to improve it through the analysis of new case studies and the variation of parameters, such as the life span of the equipment and its investment.

KEYWORDS: BPS, LCA, EaaS.

1. INTRODUCTION

The inclusion of new sustainable energy technologies through new trends and economic models has been a response of the need to reduce the carbon footprint of countries. However, investment is a usual bottleneck in this reduction. This problem is even more important for the most efficient and long lifespan systems which are often more expensive for the investment part (Yu et al. 2023) and, more difficult to be selected by conventional consumers. Hence, in recent years, the idea of Energy as a Service (EaaS)

has become popular: an economic model in which customers do not have to invest in expensive energy systems, but only take advantage of them through leasing (Venegas Ríos 2020). Within the French context, and despite the existence of commercial services such as solar panel lease, this type of service has been poorly evaluated within academia for the HVAC equipment.

Considering the crucial position of the residential sector in the carbon neutrality objectives of France (Giraudet, Bourgeois, and Quirion 2021), this type of service could represent an interesting strategy for climate change mitigation. The aim of this article is to present a methodology for the evaluation of heating and DHW (Domestic Hot Water) packages contributing to an economic model of EaaS in the French context.

2. METHOD

Assuming the residential sector as the perimeter of the study, building performance simulation (BPS) is positioned as an accurate tool to provide a comprehensive understanding of diverse performance factors and variables within energy systems (Clarke and Hensen 2015). Executing BPS requires the integration of multiple stages to conduct a relevant analysis of both the building and its systems' behaviors. The methodological approach proposed in this study to carry out this analysis is shown in *Figure i*.

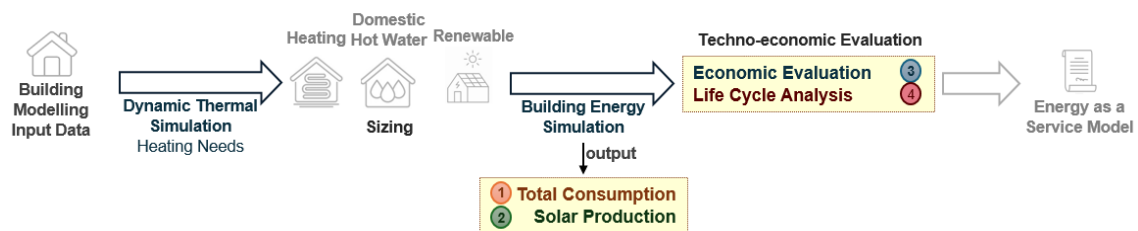


Figure i: Methodology for a techno-economic evaluation of a heating solution with solar integration.

The dynamic thermal simulation (DTS) is performed to assess the thermal balance of the building without associated systems. This simulation allows the determination of the heating needs and the power to size the systems. The solutions are designed to involve a variety of technical specifications, energy sources (gas, electricity and biomass or other renewable sources), and configurations (individual or hybrid).

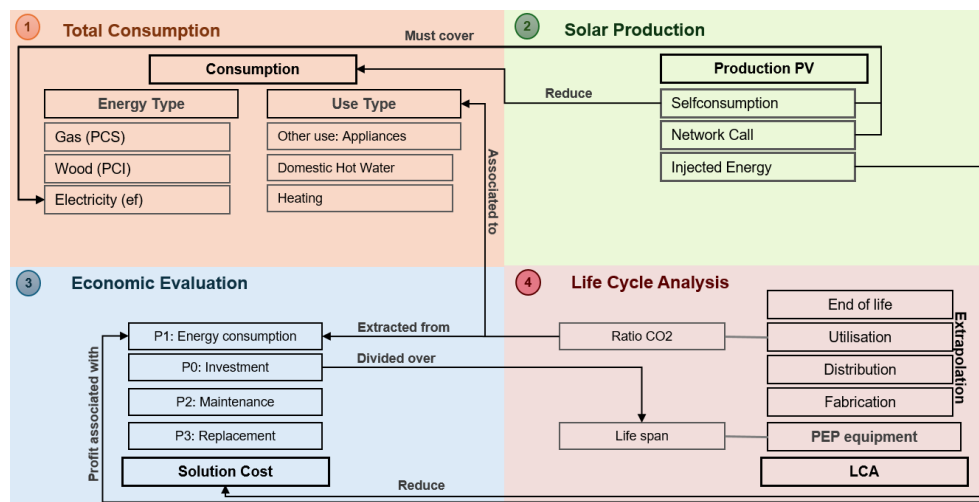


Figure ii: Correlation between the DTS-BES results and the evaluation methods.

In order to carry out the economic and life cycle analysis (LCA), different interactions were established between input parameters, variables and output values. These interactions derive from the BES (Building Energy Simulation), i.e. the assessment of the energy performance of the building with the system. The global cost of each solution (i) is obtained from *equation (1)*, where $Operating\ cost = P_1 + P_2 + P_3$. The component P_1 varies based on the tariff structure (subscription fees and price per kWh) associated with the type of energy consumed, whether it is gas, wood or electricity. The $Surplus_{PV}$ value comes from the solar energy production profit.

$$\text{Annual Cost } i \text{ [€]} = (P_0 / \text{Lifespan}_{\text{equipment}}) + \text{Operating cost} - \text{Surplus}_{PV} \quad (1)$$

For the LCA, the environmental identification card for HVAC products known as PEP is used (INIES). For the purpose of this study, only the Global Warming Potential (GWP) indicator throughout all life cycle stages was contemplated. The extrapolation of the indicator for each system is made based on the Functional Unit, i.e. the reference power and lifespan indicated in the PEP document. For the use stage, the value associated with energy use is not considered in the equipment emissions. This value is replaced by the result of the energy simulation, in which each energy tariff is associated with a ratio of CO_2 equivalent emissions (CGDD 2019). The different GWP values are used in the calculation of the annual emissions of the solution (i), as shown in *equation (2)*.

$$\text{Annual Emissions } i \text{ [kg } CO_2] = (GWP_{\text{product}} / \text{Lifespan}) + GWP_{\text{Energy Use}} - GWP_{\text{Energy Injected into Grid}} \quad (2)$$

Furthermore, in the context of EaaS, the investment cost and the duration of lease contracts are critical (Sorrell 2007). Hence, the impact of product acquisition over the selected lifetime is considered in both equations.

3. CASE STUDY

A multi-criteria case study on a representative house from the 70's was conducted. Following the steps mentioned in the previous section, an evaluation of the building performance was conducted before and after thermal retrofitting (construction materials and heating systems). The simulation was carried out in the French software Pleiades.

3.1. DESCRIPTION AND PROPERTIES OF THE BUILDING

The building is a one-storey 69 m² house. The dwelling has six zones: kitchen, living room, south-facing bedrooms (two rooms), north-facing bedroom (with bathroom), corridor and unheated attic. There is no insulation, only a small air gap (1.2 cm). Additionally, a thin thickness of glass wool (4 cm) is set up on the unheated attic's floor, the windows are simple-glazing, and the exterior door is not insulated. In view of this description, the potential for energy efficiency improvement by thermal retrofitting was evaluated. The modifications considered were the insulation of the exterior walls with polystyrene foam, double-glazing low emissivity windows and an exterior door with lower transmittance. The main construction values, before and after renovation, are given in *Table a*.

Component	Before Renovation	After Renovation
Exterior wall	2.68	0.44
Attic	0.98	0.2
Windows	6.44	1.3
Exterior door	5	1

Table a: Thermal transmittance [W/(m².K)] for different components before and after retrofitting.

3.2. DESCRIPTION OF SCENARIOS AND SYSTEMS

In the context of the study, several key assumptions have been made to model the relevant scenarios. The selected study location is the region with the coldest winters in France (zone H1), which particularly influences heating needs. The weather corresponds to the RT2012 file for Trappes (zone H1a). For other input parameters such as daytime heating scenario (living room and kitchen), power dissipation, occupancy and DHW, the models available in the Pleiades software were used. These scenarios correspond to a T4 dwelling and are based on the French thermal regulation. For the heating scenario at night (rooms and corridor), a constant temperature of 17°C was considered (ADEME 2023). Finally, airflow due to mechanical ventilation systems and infiltration is assumed constant, 0.6 vol/h before renovation and 0.4 vol/h after renovation.

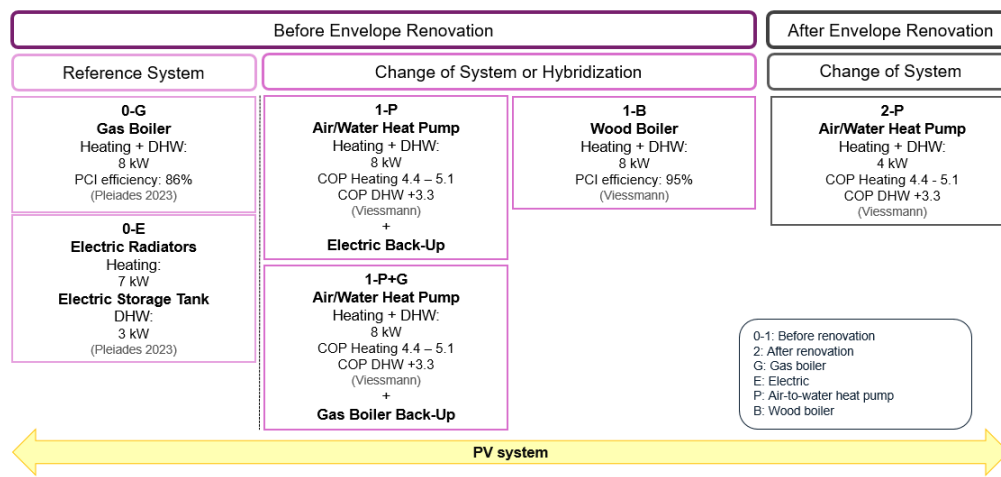


Figure iv: Configurations considered for heating, DHW and renewable systems.

Subsequent to the DTS, the data to size the systems was taken either from the generic systems available in Pleiades, or from commercial sources. The assignment of these systems to a case is based on three states: 0-reference state of the house with existing equipment, 1-no thermal retrofitting but change to more efficient systems from a technical and environmental point of view, and 2-envelope thermal retrofitting and change of equipment adapted to the new heating needs. Additionally, to evaluate the feasibility of integrating an on-grid renewable system, a south faced solar production system of 6 kWp is added for all cases. An overview of the different cases is presented in *Figure iv*.

Regarding the cost analysis, investment and maintenance values were taken from commercial data (Viessmann). Energy tariffs were selected based on energy needs. For gas and electricity, tariffs and ratios of CO₂ equivalent emissions were extracted from the scenarios available in the software (Pleiades 2023). For wood, the tariff resulted from the conversion of the price of a bulk pellet to €/PCI kWh (ÖkoFEN). A more detailed description of all considered tariffs is presented in *Table b*.

Type Energy	Description	Subscription [€]	Unit Tariff [€/kWh TTC]	Ratio CO2 [kg CO2/kWh]
Gas	Annual Base > 6 MWh	238.15	0.0521	0.213
	Annual Base < 6 MWh	119.14	0.075	
Electricity	Base 3 kVA	56.07	0.1564	Heating: 0.18
	Base 6 kVA	96,5	0.1449	DHW and Other
	Base 9 kVA	111,35	0.1462	Use: 0.04
Wood			0.057	0.03 (CGDD 2019)

Table b: P Energy Tariffs and associated CO2 ratios.

Finally, some limitations of the selected software and systems were considered. The temporal variation of the radiators, i.e. the temperature difference between the set temperature and the temperature at which the regulator detects a deviation, was selected for the most unfavorable case (1.8°C). In addition, the calculation of the DHW needs was done with the formula (3) and was not obtained from simulation, as the software does not have this capability.

$$\text{Needs}_{\text{DHW}} [\text{kWh}] = \text{Needs}_{\text{DHW}} [\text{m}^3] \times C_m \times (\text{DHW Set Point Temperature} - \text{Cold Water Temperature}) [^\circ\text{C}] \quad (3)$$

With a requirement of 40 L/day·occupant, the heat capacity of water $C_m = 1.163 \text{ kWh/m}^3 \cdot \text{K}$ and a DHW temperature set point of 60 °C.

4. RESULTS AND DISCUSSION

The heating needs, before and after retrofitting are given in Table c. By improving thermal insulation, an approximate reduction of 70% of these needs is obtained. Indeed, thermal refurbishment is an effective strategy to improve the energy performance of the building. The peak power demand before retrofitting was determined at 8 kW, and after retrofitting at 4 kW. These values consider the maximum peak power for heating, the annual DHW requirements and the temporal variation of the radiators.

Envelope	Heating Needs		Heating Max Power	DHW needs
	kWh	kWh/m ²	W	kWh
0-1	9994	144.5	5715	3234
2	3194	46.2	2658	

Table c: Comparison of thermal needs before and after envelope renovation.

Results of the BES are presented in Figure v, vi and vii. The high-energy consumption for the reference cases is congruent with a poorly insulated house and inefficient systems, as shows Figure v. As an example, in the reference case 0-E the total annual consumption corresponds to 232 kWh/m². In comparison, variants 1-P and 2-P present a reduction in total consumption of 72 % and 87 %, respectively. Regarding the solar energy production, “green” bar for each variant, it can be seen that the amount of energy injected into the grid is two up to six times higher than the amount of self-consumed energy. This is a result of not including a storage system and not sizing the system based on the electricity demand of each variant.

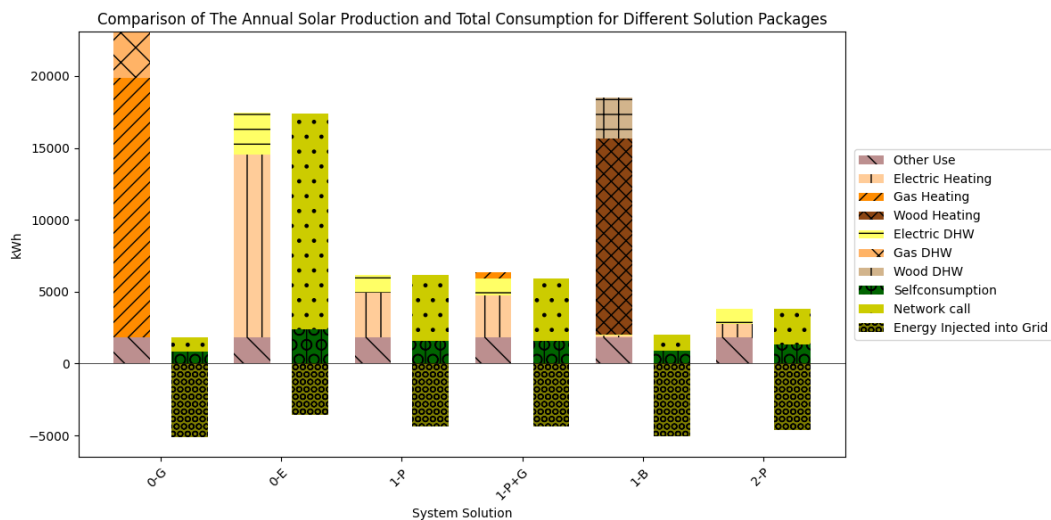


Figure v: Annual energy consumption and solar production before and after envelope renovation.

There is a significant improvement in the energy performance of the building after the inclusion of a technically more efficient system independent of energy type, and further enhanced by the envelope retrofit. Nevertheless, the cost of thermal refurbishment projects can be very high as indicated by figures from ADEME (2019). This situation increases the investment cost and difficult the establishment of a profitable economic energy service model. Therefore, in the following, solutions that do not require thermal refurbishment will be evaluated.

Once the energy consumption and production performance of each case has been obtained, the associated costs are analyzed, as shown in *Figure vi*. Without considering the PV production profit, the costs between the reference variant 0-G and the 1-P solution are relatively similar. In contrast, the other solutions (1-P+G, 1-B) show an increase between 30 and 50 % compared to the same reference system. With regard to the comparison of the reference variant 0-E, all solutions of scenario 1 present a cost reduction ranging from 18 to 54 %. This suggests a special analysis of the efficiency of the system, especially in France, a country where equipment deficiencies or maintenance and repair activities plays an important role in consumers' decisions (Côté and Pons-Seres de Brauwer 2023).

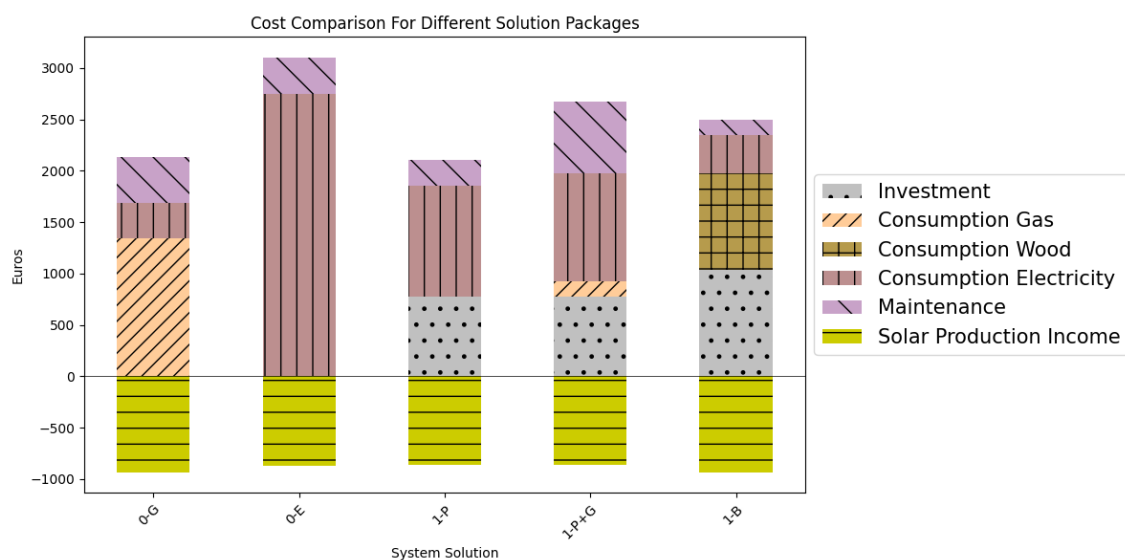


Figure vi: Annual cost estimation for different solutions with solar integration.

Furthermore, it is necessary to consider the cost structure of scenario 1, which in comparison to the reference scenario involves the acquisition of new equipment. Consequently, in this scenario the balance between the annualized investment cost and the operating expenses offers an insight for the establishment of the EaaS model. For a heat pump, the investment represents about 37% of the total costs compared to 63% of the operating costs. Similarly, the proportionality of these values for a wood boiler is 42 and 58%, respectively. These results highlight the importance of the initial investment in relation to the total cost. However, operating costs play a more important role in assessing the profitability and viability of the solution. All this considering that the investment price is annualized based on a standard lifespan. This proportion evaluated over time should also take into account different rates and the variation in energy prices. Besides, the share of profits of producing, consuming and injecting solar energy (green value in *Figure vi*) is similar to the P1 costs in the cases of efficient systems. This reinforces the importance of including a reliable compensation of excess electricity production (Overholm 2015) to generate additional income. This will influence the monthly payment of a heating and DGW equipment rental model.

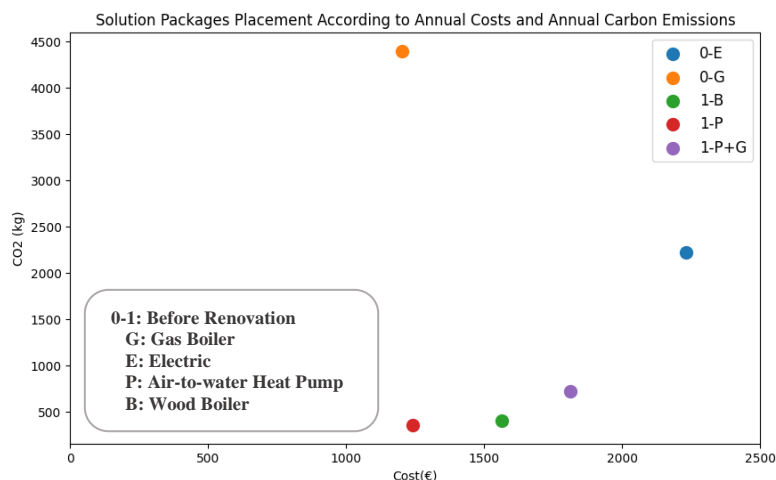


Figure vii: Multi-criteria comparison for different heating solutions with solar integration.

Finally, a positioning of the solutions based on their costs and carbon emissions is carried out, as shown in *Figure vii*. This positioning considers the above-mentioned results and takes advantage of the DTS-BES to compare the building, its consumptions and the nature of its systems as a whole. Through this, an informed decision regarding the different alternatives and limitations of the solutions will allow the creation of rental plans better adapted to the customer and the company itself. As an example, the variants using gas as energy (0-G, 1-P+G) are analyzed. The positioning of these shows the impact of an inefficient system on the environmental performance of the solution. Although 0-G and 1-P are positioned at the same level with respect to costs, the difference in carbon emissions is five times higher for the reference solution. Even if this is only used as a backup (1-P + G), the solution is sub-optimal compared to the other variants in scenario 1. Similarly, the low efficiency associated with the temporal variation of electric radiators leads to a high electricity consumption and therefore to a high cost. In contrast, the heat pump and the wood boiler have similar optimal behaviors. The positioning of these solutions is related to the CO_2 equivalent emissions ratio and the GWP of the equipment. Although the CO_2 emission ratio associated with wood is 83 % lower than the ratio for electricity, the total energy consumption is higher for the 1-B variant than for the 1-P variant. This makes the emissions with respect to energy use relatively similar. Concerning the GWP of the equipment, this value is 66 % lower for a wood-fired boiler than for a heat pump. However, in the different databases consulted there is no value completely consistent with the characteristics of the wood-fired boiler used in the simulation.

5. CONCLUSIONS AND PERSPECTIVES

The presented methodology for techno-economic evaluation using Building Performance Simulation tool enables the assessment of different heating and DHW systems with solar integration in the residential sector in France, under the context of Energy as a Service. Results can be used to identify advantages and disadvantages of different solutions in a scenario of energy leasing services. Furthermore, economic and environmental potential can be quantified.

The conducted case study highlighted the influence of heating and DHW system efficiency on the economic and environmental evaluation of a solution. Hence, the need for a comprehensive assessment of the performance of the building and its equipment to generate an economically and environmentally relevant solution in the context of EaaS. As observed with the variants that include the gas boiler, if the studies are only carried out from an economic point of view, it is possible to fall into solutions that are

cost-effective but inefficient from an environmental perspective. In terms of the integration of a solar energy production system, this is positioned as a valuable strategy for cost reduction and compensation of carbon emissions in all the solutions contemplated. This is a clue to the role of EaaS models in creating sustainable propositions through carbon offsetting. However, limitations such as narrow information on emissions associated with some of the systems considered and maintenance-repair costs for a hybrid system (old gas boiler and PAC) were identified. Future research will focus on the influence of parameters such as equipment lifetime, solar production capacity, energy prices, among others. In addition, solutions that envisage new technologies such as solar thermal collectors would be ideal to repeat the evaluation of the case study and establish new conclusions on the methodology.

Acknowledgements

This work was done within the framework of Solar Academy Graduate School, grant ANR-18-EURE-0016. The author would like to thank the ENERLOC project team for the technical and economic data provided for this study.

6. BIBLIOGRAPHIE

- Agence de la Transition Ecologique (ADEME). 2019. 'Rénovation énergétique des logements: étude des prix. Les enseignements d'une évaluation statistique de grande ampleur. Rapport de synthèse'. [Online] Available: <https://bibliothèque.ademe.fr/urbanisme-et-batiment/1792-renovation-energetique-des-logements-etude-des-prix.html>
- Agence de la Transition Ecologique (ADEME). 2023. 'Un hiver tout confort'. [Online]. Available: <https://bibliothèque.ademe.fr/cadic/6568/guide-hiver-tout-confort.pdf>
- Clarke, J. A., and J. L. M. Hensen. 2015. 'Integrated Building Performance Simulation: Progress, Prospects and Requirements'. *Building and Environment*, Fifty-Year Anniversary for Building and Environment, 91 (September): 294–306. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.04.002>.
- Commissariat Général au Développement Durable (CGDD). 2019. 'Les facteurs d'émission de gaz à effet de serre'. Notre-environnement. [Online]. Available: <https://www.notre-environnement.gouv.fr/themes/climat/les-emissions-de-gaz-a-effet-de-serre-et-l-empreinte-carbone-ressources/article/les-facteurs-d-emission-de-gaz-a-effet-de-serre>.
- Côté, Elizabeth, and Cristian Pons-Seres de Brauwer. 2023. 'Preferences of Homeowners for Heat Pump Leasing: Evidence from a Choice Experiment in France, Germany, and Switzerland'. *Energy Policy* 183 (December): 113779. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2023.113779>.
- Giraudet, Louis-Gaëtan, Cyril Bourgeois, and Philippe Quirion. 2021. 'Policies for Low-Carbon and Affordable Home Heating: A French Outlook'. *Energy Policy* 151 (April): 112140. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2021.112140>.
- INIES, "L'ACV bâtiment". INIES pour le bâtiment. [Online]. Available: <https://www.inies.fr/inies-pour-le-batiment/lacv-batiment>.
- ÖkoFEN. 'Prix du granulé de bois'. [Online] Available: <https://www.oekofen.com/fr-fr/prix-du-granule-de-bois/>
- Overholm, Harald. 2015. 'Spreading the Rooftop Revolution: What Policies Enable Solar-as-a-Service?' *Energy Policy* 84 (September): 69–79. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2015.04.021>.
- PLEIADES. 2023. 'Documentation du logiciel Pleiades d'IZUBA énergies. [Online]. Available: <https://docs.izuba.fr/v4/fr/index.php/Accueil>.
- Sorrell, Steve. 2007. 'The Economics of Energy Service Contracts'. *Energy Policy* 35 (1): 507–21. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2005.12.009>.
- Venegas Ríos, Benjamín, 2020. 'Análisis del modelo de negocio de Energy AS a Service EAAS en el mercado electrónico chileno'. Santiago, Chile: Universidad de Chile - Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. [Online]. Available: <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/177961>.
- Viessmann. 'Documentation ViBooks - bibliothèque en ligne'. [Online]. Available: <https://www.viessmann.fr/fr/services-et-assistance/documentation.html>
- Yu, Fei, Wei Feng, Maohui Luo, Kairui You, Minda Ma, Rui Jiang, Jiawei Leng, and Liqun Sun. 2023. 'Techno-Economic Analysis of Residential Building Heating Strategies for Cost-Effective Upgrades in European Cities'. *IScience* 26 (9): 107541. <https://doi.org/10.1016/j.isci.2023.107541>.

Optimiser les stratégies de rénovation des bâtiments résidentiels à l'échelle territoriale : analyse des plans climats de différentes villes

Martin Rit ^{1,2,*}, Enora Garreau ¹, Mathieu Thorel ¹, Jonathan Villot ², Robin Girard ³

¹Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB), 77420 Champs-sur-Marne

²Mines Saint-Etienne, UMR 5600 EVS, Institut Henri Fayol, Département GEO, F - 42023 Saint-Etienne, France

³Mines Paris – PSL, Centre Procédés, Energies Renouvelables et Systèmes Energétiques (PERSEE), 06904 Sophia-Antipolis

* martin.rit@cstb.fr

RÉSUMÉ. Pour définir une stratégie de rénovation des bâtiments résidentiels, les décideurs politiques ont besoin de modèles qui soutiennent la prise de décisions grâce à une compréhension approfondie du parc bâti. Pour répondre à ce besoin, un modèle d'optimisation a été développé au sein du CSTB qui permet (1) d'informer les décideurs sur les contraintes et limites de rénovation de leur parc, (2) d'identifier de manière adaptée au contexte local des mesures d'économie d'énergie et de carbone (gestes de rénovation), et (3) d'identifier les écarts entre les stratégies actuellement planifiées et les stratégies réellement mises en œuvre. Dans cet article, plusieurs plans climats de différentes villes françaises sont analysés. La principale contribution de ces études est l'échelle géographique : tous les bâtiments résidentiels dans les zones d'intérêt ont été modélisés et simulés en utilisant des données nationales avant d'appliquer une réduction par clustering. L'algorithme d'optimisation est ensuite appliqué à ces bâtiments afin de choisir les gestes de rénovation à appliquer à chacun d'eux permettant d'atteindre les objectifs environnementaux identifiés, en tenant compte des contraintes applicables à chaque territoire (nombre de rénovations par an) et au niveau national (rénovation des passoires thermiques (DPE F&G)). En utilisant des études de plan climat de grandes métropoles françaises, cet article met en évidence un écart significatif entre les stratégies actuellement préconisées par les décideurs et celles proposées par notre modèle d'optimisation. Cette divergence peut s'expliquer notamment par l'écart entre mesures mises en place et objectifs à atteindre comme la relation entre la performance des rénovations et les objectifs climatiques réalisables.

MOTS-CLÉS. Rénovations des bâtiments résidentiels, Analyse de politiques publiques, Mixed Integer Linear Programming, échelle territoriale

1. INTRODUCTION

En France, le secteur résidentiel contribue aux émissions de gaz à effet de serre à hauteur de 27% en émissions directes et indirectes et à 45% de la consommation d'énergie finale (Ministère de la transition écologique et solidaire, 2020), soulignant l'importance de la mise en œuvre de stratégies de rénovation efficaces. Cet article présente une approche novatrice basée sur des données open-source pour optimiser la rénovation de bâtiments résidentiels à une échelle territoriale. Pour cela, en combinant des bases de données ouvertes et des modèles de simulation et d'optimisation, l'objectif est de fournir une méthodologie transparente et reproductible qui aide les parties prenantes à prendre des décisions éclairées. La méthodologie se concentre sur la compréhension du stock de bâtiments existant, la simulation des demandes énergétiques annuelles et l'exploration du potentiel des techniques de clustering dans l'optimisation des stratégies de rénovation. Cette étude contribue non seulement à la compréhension académique de l'optimisation énergétique à l'échelle territoriale, mais offre également des aperçus pratiques

dans le contexte français, où de telles interventions sont nécessaires pour atteindre les objectifs climatiques nationaux et locaux.

La question de recherche qui guide cet article est : ”*Comment un outil d’optimisation peut-il aider et compléter une planification existante de la rénovation d’un parc de bâtiments ?*”.

De part l’état actuel des recherches en France, les contributions de cet article à la problématique scientifique sont (1) l’application d’une méthode d’optimisation multi-étapes avec clustering sur des métropoles françaises, (2) l’évaluation des spécificités et des défis de chaque métropole via l’analyse de leur plan climat et (3) l’analyse des implications des résultats pour les politiques de rénovation énergétique en termes de réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES).

2. MÉTHODOLOGIE

Le modèle d’optimisation a pour vocation à sélectionner les bâtiments à rénover selon certaines contraintes et objectif et à planifier dans le temps cette rénovation afin de proposer une ”trajectoire de décarbonation du parc”. C’est un modèle d’optimisation de type ”sac à dos”, au format MILP, codé en Pyomo et résolu avec le solveur Mosek. D’autres travaux développent des méthodes d’optimisation de rénovation à l’échelle de plusieurs bâtiments comme (Merlet et al., 2022) mais ces travaux ne considèrent pas une optimisation à l’échelle d’un parc de milliers de bâtiments et une comparaison à des plans nationaux existants.

2.1. REVUE DE L’ARBRE DE TRAJECTOIRE ET DU MODÈLE D’OPTIMISATION SHAPE

Cet aspect trajectoire dans la résolution du problème d’optimisation est pris en compte via des arbres de décision. Chaque poste de rénovation $w \in W = \{mur, sol, plafond, fenêtre, chauffage, ventilation, ECS\}$ dispose d’un arbre de décision qui est indépendant des autres. Ainsi, pour un bâtiment donné et un élément de rénovation donné, avec 3 mesures de rénovation possibles (Inchangé, r1, r2) et pour une liste de deux ans, les trajectoires de rénovation pour un bâtiment sont représentées par le type d’arbre de décision montré dans la Figure 1 :

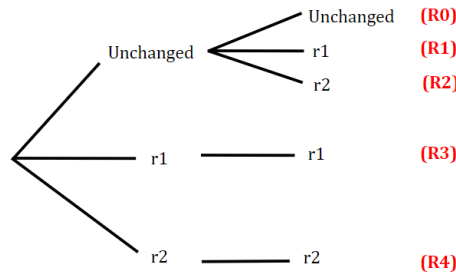


Figure 1 : Arbres de décision pour les trajectoires de rénovation

Le nombre de trajectoires est réduit à $[(n_{r_w} - 1) \times n_y + 1]$ pour chaque poste de rénovation et chaque bâtiment, avec n_{r_w} le nombre de solutions de rénovation pour w et n_y le nombre d’années considérées. La combinatoire \mathbf{C} avec n_b le nombre de bâtiments s’écrit alors :

$$\mathbf{C} = n_b \times \prod_{w \in W} ((n_{r_w} - 1) \times n_y + 1) \quad (1)$$

La combinatoire appliquée aux données de rénovation et au modèle de simulation (Rit Martin, 2024) est résumée dans le Tableau 1. Cela justifie un algorithme d’optimisation pour résoudre

le problème proposé et nécessite de réduire au maximum la combinatoire. Le temps de simulation indiqué est calculé à partir du modèle de simulation linéaire type 3CL-DPE utilisé dans ces travaux (Rit Martin,).

Tableau 1 : Comparaison de la combinatoire par bâtiment

Nombre de Périodes Temporelles	Combinatoire Polynomiale	Temps de calcul
2	$1.02.10^7$	5 jours
3	$1.67.10^8$	75 jours
4	$1.31.10^9$	1.6 ans
5	$6.70.10^9$	8 ans

2.2. DESCRIPTION RAPIDE DE L'OUTIL D'OPTIMISATION SHAPE

Le modèle optimise les choix de rénovation de l'ensemble du parc bâti selon la variable O , qui représente les paramètres physiques et économiques possibles. La variété des variables qui peuvent être utilisés comme cibles ou contraintes dans le modèle est listée dans le Tableau 2 :

Tableau 2 : Métriques optimisables ou contraignables O_{all}

Métriques	Utilisation	Description
$O_{GES.12(3)}$	Optimisation ou contraintes	Émissions de GES en fonctionnement (et indirectes)
O_{NPC}	Optimisation ou contraintes	Coût Global
O_{EC}	Optimisation ou contraintes	Consommation d'énergie
O_{PE}	Contraintes	Pic électrique
$O_{class.DPE}$	Contraintes	Cible de classe DPE minimum
$O_{nb.reno}$	Contraintes	Nombre de rénovations réalisables par type

Plusieurs études se concentrent sur l'optimisation de la rénovation avec des variables de décision binaires utilisées pour implémenter des interventions du côté de la demande ou de l'offre, comme documenté dans (He et al., 2019). Cette formulation par des variables de décision binaires représente avec précision si le décideur opte pour une solution de rénovation ou non. Dans ce travail (A. Rogeau, 2020), les variables de décision binaires w (Équation 2, liée à l'ECS), x (Équation 3, liée au chauffage) et y (Équation 4, liée à la ventilation) représentent donc l'activation (1) ou non (0) des différentes technologies de rénovation. Les variables E_b , K_b et R_b^s représentent les trajectoires pour l'ECS, le système de chauffage et l'isolation.

$$w_{b,E} \in \{0, 1\}, \quad b \in B, E \in E_b \quad (2)$$

$$x_{b,R,K} \in \{0, 1\}, \quad R \in R_b^s, K \in K_b \quad (3)$$

$$y_{b,V,K} \in \{0, 1\}, \quad b \in B, V \in V_b, K \in K_b \quad (4)$$

En tirant parti de la structure des fonctions identifiées ci-dessus, il est possible de décrire le modèle d'optimisation comme les équations suivantes 5 et 6, formulées comme une variante d'un problème de sac à dos (A. Rogeau, 2020) :

$$\text{minimiser} \quad \sum_{b \in B} \sum_{s \in S} \sum_{R \in R_b^s} \sum_{K \in K_b} x_{b,R,K} O^1, \quad O^1 \in O_{all} \quad (5)$$

$$\text{soumis à} \quad \sum_{b \in B} \sum_{s \in S} \sum_{R \in R_b^s} \sum_{K \in K_b} x_{b,R,K} O^2 \leq F_{0^2}, \quad O^2 \in O_{all} \quad (6)$$

L'équation 5 définit la fonction objectif du problème d'optimisation qui varie en fonction de la variable O^1 choisie. Les contraintes dépendent des métriques O^2 sélectionnées dans l'équation 6 et peuvent, par exemple, imposer une limite sur les émissions de GES du parc bâti après rénovation en choisissant $O^2 = O_{GHG}$ et F_{02} un pourcentage de réduction à atteindre pour tout le territoire étudié. L'ensemble des règles métiers, des données de rénovation, d'énergie et le fonctionnement global du module d'optimisation MILP sont décrits dans (Rit Martin, 2024).

Pour résoudre de grands problèmes d'optimisation sur un grand nombre de bâtiments (plusieurs dizaines de milliers), les besoins mémoire et en temps de calcul de la machine qui réalise le calcul sont très élevés. Dans ce cas, une méthode de clustering est nécessaire pour réduire la complexité du problème. La méthode globale qui utilise le clustering hiérarchique ascendant peut se décrire en 3 étapes qui correspondent à (1) la mise en œuvre du clustering sur les données caractéristiques et de performance thermique du bâtiment, leur localisation et leur consommation énergétique (sélection des paramètres basés sur (Rivallain et al., 2019); (2) la prise en compte du médoïd (bâtiment réel représentant au mieux un cluster dans l'ensemble de données) et (3) l'optimisation des solutions de rénovation sur le parc de médoïd.

En prenant en considération le poids du cluster $weight_b$ d'un médoïd b (soit le nombre d'éléments qu'il contient), la fonction d'optimisation, telle que décrite dans l'Équation 5, est modifiée selon l'Équation 7.

$$\text{minimize } \sum_{b \in B} weight_b \left(\sum_{s \in S_b} \sum_{r \in R_s} \sum_{h \in H_b} x_{b,s,r,h} O^1 \right), O^1 \in O_{all} \quad (7)$$

3. ÉTUDE DE CAS : RÉSULTATS D'OPTIMISATION

L'objectif est de comparer et analyser les stratégies de rénovation avec celles existantes, en se concentrant sur les plans d'actions climatiques de Grenoble, Lille, Nantes, et Toulouse.

3.1. PLANS CLIMAT-AIR-ÉNERGIE TERRITORIAUX (PCAET) ET MÉTHODOLOGIE

Les PCAET présentent une approche globale pour les collectivités territoriales pour lutter contre le changement climatique avec un volet pour le secteur résidentiel en visant la neutralité carbone en 2050 via la réduction des émissions de GES, les économies d'énergie et le développement des énergies renouvelables. Le modèle SHAPE est utilisé pour définir des scénarios de trajectoire de rénovation à 2050 atteignant la neutralité carbone tout en optimisant la rentabilité économique. La réalisation de ces trajectoires permettent d'évaluer diverses métriques en 2030 pour comparer aux scénarios du PCAET, comme illustré dans le Tableau 3.

Ce scénario pour la SNBC 2050 vise à réduire les émissions de GES et la consommation énergétique, avec un point de passage pour 2030. L'optimisation sera donc effectuée avec 4 contraintes différentes : une réduction des émissions de GES, un objectif de parc BBC, un nombre de rénovations annuel par gestes et une valeur seuil pour le pic électrique. Le nombre de rénovations annuel a été choisi pour refléter l'ambition gouvernementale de 700.000 rénovations annuelles en 2030 tout en considérant une montée en puissance du secteur. Une obligation de rénovation de l'enveloppe en une seule fois est également mise en place dans un soucis de réalité vis-à-vis du pas de temps de 10 ans.

Tableau 3 : Tableau des contraintes et objectifs

Métriques	Description
$O^1 = NPC$	Optimisation du coût global
$O_1^2 = O_{GES.12}$	Réduction des émissions de GES d'un facteur 10 par rapport à 2016
$O_2^2 = O_{EC.DPE}$	Consommation DPE pour obtenir un parc de bâtiments BBC : 80kWhEP.m2.an en moyenne sur le parc
$O_3^2 = O_{PE}$	< 110% du pic de puissance appelé actuel
$O_4^2 = O_{nb.reno}$	Nombre de rénovations (2020-2030) : 1% par an Nombre de rénovations (2030-2040) : 2,5% par an Nombre de rénovations (2040-2050) : 4% par an
$dy = 10$	L'arbre de décision sera construit pour les années 2020, 2030, 2040, et 2050

3.2. RÉSULTATS

La Figure 2 illustre la comparaison des consommations énergétiques en 2030 entre les objectifs PCAET et les résultats de l'optimisation. On remarque qu'à part pour Nantes, il y a un écart notable entre les objectifs de réduction de la consommation énergétique et les prévisions des PCAET, avec un effort demandé de 15 à 25% supérieur côté optimisation. Cela signifie que les PCAET ne sont pas assez ambitieux en 2030 pour atteindre la SNBC à moindre coût.

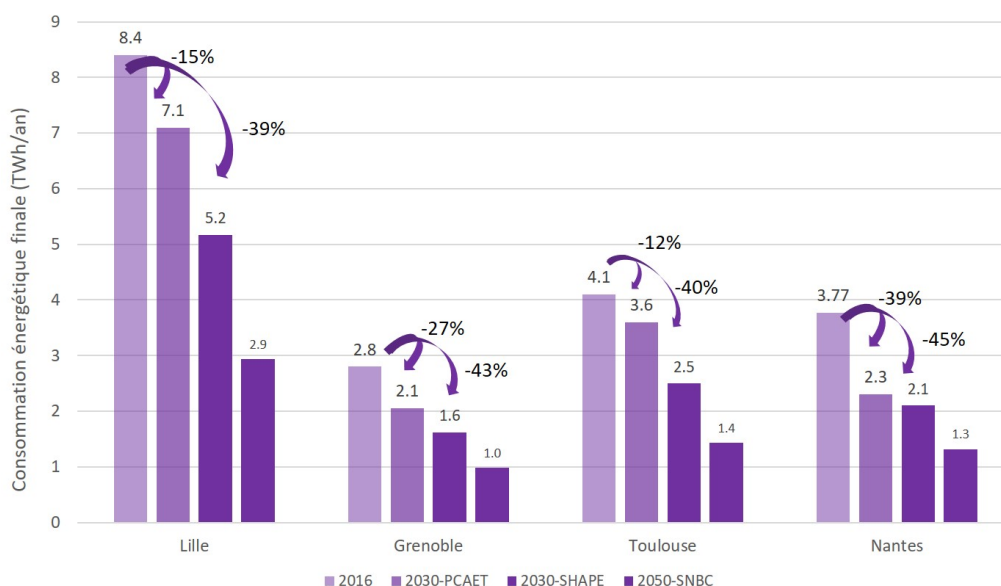


Figure 2 : Consommation énergie 2016, objectifs PCAET / résultats de SHAPE en 2030, SNBC en 2050

Les PCAET se concentrent sur la diminution de la consommation énergétique et des émissions de GES, sans pour autant détailler les stratégies de rénovation spécifiques. Le modèle présenté dans cet article offre la possibilité d'examiner les différentes options de rénovation pour chaque médoid permettant d'observer les changements de vecteurs énergétiques, ainsi que de suivre l'évolution des DPE (Rit Martin, 2024). Une comparaison des stratégies de rénovation est réalisée en Figure 3, définit de manière à illustrer les rénovations allant de celles impliquant de multiples interventions jusqu'aux rénovations monogestes.

On observe une tendance pour des rénovations plus complexes dans l'agglomération de Lille. Cette différence marquée dans le comportement du modèle peut s'expliquer par l'état actuel du parc bâti lillois ainsi que par le climat, qui nécessite une isolation plus poussée. Cette figure

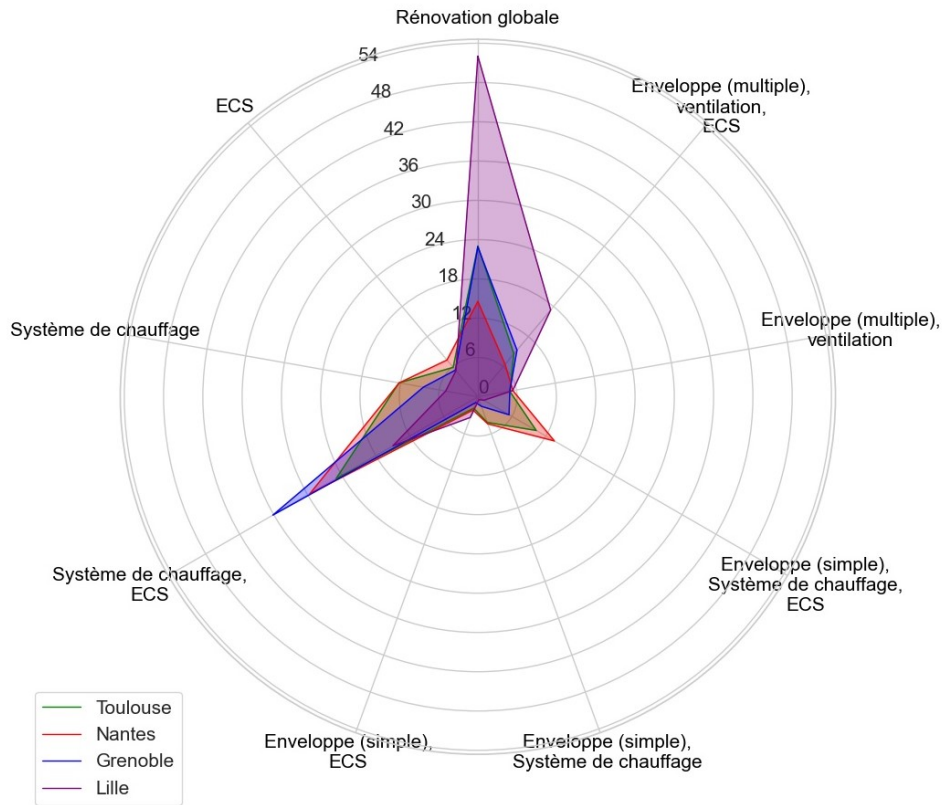


Figure 3 : Répartition des bouquets de travaux entre agglomérations (en % du total de rénovation)

illustre que, bien que le modèle suggère des approches similaires dans toutes les agglomérations pour réduire les émissions de GES, les proportions varient considérablement.

Ces différences de planification des gestes sur un même bâtiment sont visibles d’un point de vue temporel sur la Figure 4.

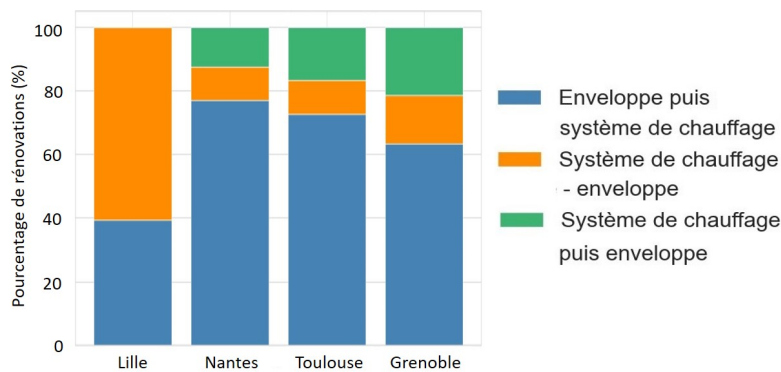


Figure 4 : Répartition temporelle des rénovations entre agglomérations (en % du total de rénovation)

À Lille, les rénovations de l’enveloppe et du système de chauffage sont majoritairement réalisées simultanément. À Nantes, Toulouse et Grenoble, la tendance est de rénover l’enveloppe avant le système de chauffage, permettant un meilleur dimensionnement et une efficacité accrue du système de chauffage.

Ce choix impacte le coût de rénovation du chauffage, comme décrit dans le modèle d’optimisation (Rit Martin, 2024), qui favorise donc la rénovation du chauffage après ou avec

l’isolation dû à un coût réduit d’un chauffage dimensionné correctement.

3.3. APPORTS COMPLÉMENTAIRES AU PCAET - EXEMPLE DE NANTES

L'étude effectuée permet des compléments d'informations par rapport au PCAET qui ne comporte pas de volets sur les évolutions technologiques ou énergétiques du parc bâti résidentiel. Cette section illustre les apports du modèle pour l'agglomération de Nantes.

La Figure 5 illustre l'évolution du parc bâti en termes de classes DPE. Ce graphique montre l'atteinte d'un parc classé BBC d'ici 2050 avec la rénovation de la totalité des passoires énergétiques.

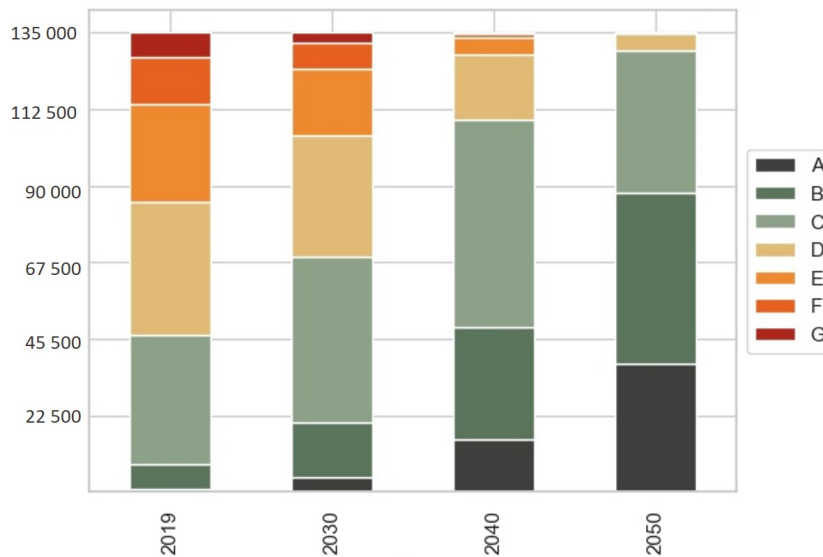


Figure 5 : Evolution classes DPE agglomération Nantes

La répartition des types de travaux de rénovation est représentée en Figure 6 avec 15% des rénovations globales (bleu foncé).

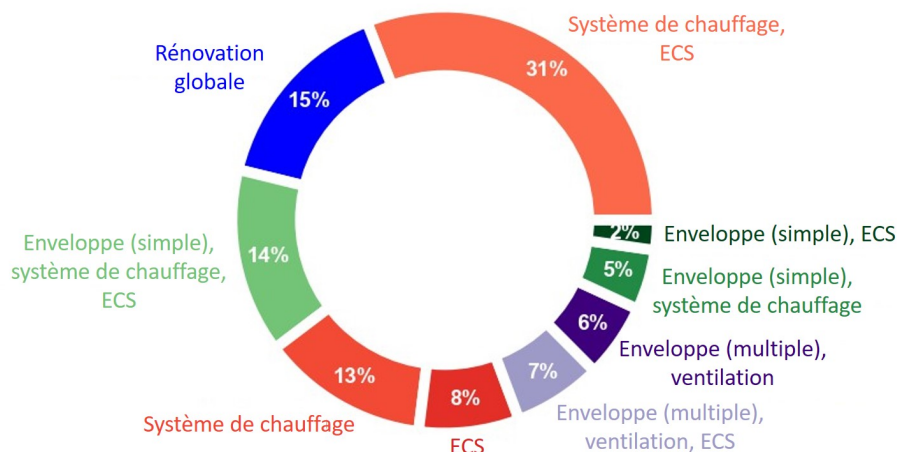


Figure 6 : Répartition des travaux de rénovation pour Nantes

En outre, 35% des travaux concernent des rénovations d'ampleur moyenne (en vert et violet), tandis que les 50% restants sont des améliorations ciblées sur le système de chauffage et l'ECS (en rouge). Cette stratification des travaux indique une approche adaptée aux spécificités de chaque bâtiment. L'accent mis sur la diversité des interventions de rénovation souligne le défi consistant à équilibrer les objectifs à long terme d'un parc bâti BBC avec les besoins immédiats de rénovation, garantissant une réponse adaptée aux exigences de chaque bâtiment.

4. DISCUSSION

Le modèle proposé dans cette étude est améliorable sur divers points abordés dans ce paragraphe. Un test de robustesse du modèle vis-à-vis des incertitudes affectants les entrées du module comme le prix des énergies, le facteur d'émissions, les paramètres de l'optimisation (nombre de périodes temporelles, nombre de rénovations) est à réaliser. Cela peut permettre de proposer différentes trajectoires de rénovations en fonction des données initiales. Un des freins majeurs au déploiement de ce modèle à grande échelle reste le temps de calcul et les besoins de mémoires comme explicité dans (Rit Martin, 2024).

Divers développements sont envisagés pour améliorer la simulation énergétique. Parmi eux, la prise en compte du besoin de froid via une simulation linéaire basée sur les degrés heures d'utilisation représente une avancée significative. L'accessibilité à des bases de données caractérisant la présence de climatisation dans les bâtiments est aujourd'hui un frein à cette étude. Certaines pistes d'amélioration du modèle de simulation énergétique reposent sur l'ajout de paramètres spécifiques supplémentaires. Ainsi, la fin de vie des équipements de chauffage, d'ECS, de ventilation, ou d'isolation des bâtiments sont à considérer, mais la donnée de caractérisation de l'âge des équipements manque actuellement. Une prise en compte de la météo future est primordiale dans ces travaux et sera réalisé lorsque le modèle de simulation prendra en considération les besoins de froid.

5. CONCLUSION

Les résultats de cette étude démontrent le potentiel d'une approche par optimisation pour la rénovation de bâtiments résidentiels à une échelle territoriale. En utilisant un modèle couplant la simulation et l'optimisation avec des techniques de clustering, ces travaux proposent une méthode transparente sur l'ensemble du territoire français. Les principaux résultats soulignent que les trajectoires de décarbonation ne sont pas assez ambitieuses en donnant l'illusion d'une accélération après 2030. Ce choix est démontré ici que ce n'est pas une solution optimale d'un point de vue économique. De plus, il serait souhaitable que les universitaires accompagnent les collectivités afin d'avoir plus de transparence pour ces enjeux sociétaux majeurs.

BIBLIOGRAPHIE

- A. Rogeau, R. Girard, Y. A. M. T. G. K. (2020). Joint optimization of building-envelope and heating-system retrofits at territory scale to enhance decision-aiding. *Applied Energy*.
- He, Y., Liao, N., Bi, J., and Guo, L. (2019). Investment decision-making optimization of energy efficiency retrofit measures in multiple buildings under financing budgetary restraint. *Journal of Cleaner Production*.
- Merlet, Y., Rouchier, S., Jay, A., Cellier, N., and Woloszyn, M. (2022). Integration of phasing on multi-objective optimization of building stock energy retrofit. *Energy and Buildings*, 257 :111776.
- Ministère de la transition écologique et solidaire (2020). Snbcbatiment. page 4.
- Rit Martin, Girard Robin, V. J. T. M. A. Y. Calibration method for an open source model to simulate building energy at territorial scale. *Energy and Buildings*.
- Rit Martin, Thomas Arthur, V. J. T. M. G. E. G. R. (2024). Shape : A temporal optimization model for residential buildings retrofit to discuss policy objectives. *Applied Energy*.
- Rivallain, M., Agapoff, S., Boisson, P., Fouquier, A., and Lee, Y. (2019). Clustering as a simplification tool for the decision-making process on building stock renovation.

STD : Etat de l'art et bon usage des modèles des ponts thermiques et des parois hétérogènes 3D

Jean-Jacques ROUX*¹, Frédéric KUZNIK¹,

¹ INSA Lyon, CNRS, CETHIL, UMR5008, 69621 Villeurbanne, France

*jean-jacques.roux@insa-lyon.fr

RESUME : Le niveau d'isolation augmentant, la part des ponts thermiques dans les « déperditions » s'accroît mécaniquement. Les modes de représentation (en régime dynamique) des ponts thermiques classiques mais également des parois hétérogènes (parois « 3D » : plancher sur hourdis, murs en parpaings ...) sont nombreux et souvent d'une mise en œuvre complexe, ce qui limite certainement leur utilisation effective. Nous donnons ici un guide de bons usages de ces différentes méthodes ainsi que leurs limites, leurs intérêts et des exemples d'outils permettant de les générer et ceux permettant de les utiliser.

Après un état de l'art et une analyse bibliographique concernant les différentes approches, nous en détaillons un certain nombre afin de mettre en avant leurs domaines d'application privilégiés (mur équivalent, identification de modèle RC, modèle d'état réduit ...). L'approche que nous avons développée sur la base des logiciels Heat2 et Heat3 (modifié pour nous par leur auteur) complétée d'outils spécifiques (module Matlab) sont décrits dans le détail. Leur utilisation et la mise en œuvre dans des outils de STD sont illustrées sur quelques exemples dans une démarche pédagogique et pragmatique.

MOTS-CLÉS : Ponts thermiques, réduction des modèles d'état, STD, démarche pédagogique et pragmatique

SUMMARY: As the level of insulation increases, heat losses due to thermal bridges increases mechanically. The modes of representation, under dynamic conditions, of conventional thermal bridges but also of heterogeneous walls (3D walls: floor on hedgerows, walls in block blocks, etc.) are numerous and often complex to implement, which certainly limits their practical use. Here we provide a guide to good use of these different methods and their limitations, interests and examples of tools to generate them and those to use them.

After a state of the art and a bibliographical analysis concerning the different approaches, we detail a number of them in order to highlight their preferred fields of application (equivalent wall, identification of RC model, reduced state model ...). The approach that we developed on the basis of the Heat2 and Heat3 softwares (modified for us by their author) supplemented by specific tools (Matlab module) are described in detail. Their use and implementation in STD tools are illustrated in a few examples in an educational and pragmatic approach.

KEYWORDS: Thermal bridges, state model reduction, DTS, pedagogical and pragmatic approach

1. INTRODUCTION

L'objectif de cet article, à caractère pédagogique et pragmatique et qui s'adresse tout autant aux formateurs qu'aux étudiants, est de faire un état des lieux des méthodes permettant la prise en compte des ponts thermiques et des configurations 2D ou 3D (plancher sur hourdis, parpaings, briques ...) dans les outils de Simulation Thermique Dynamique (STD). L'intérêt pour le sujet n'est pas récent, et dans sa thèse, intitulée « *Etude des ponts thermiques des parois de bâtiment en régime variable des températures* », F. Allard (Allard 1978), avait fait, en précurseur, une proposition utilisable fort intéressante. Les questions concernant ce sujet sont en fait celles de nos étudiants lors des séances d'initiation à la STD intégrées dans nos enseignements : un cours de transferts de chaleur et de masse, suivi d'un cours spécifique de « Thermique du Bâtiment », introductifs à un projet à un projet de STD avec un sujet différent par binôme dans un groupe de TD, les résultats étant présentés lors d'une séance

collective. Les questions des étudiants concernant la modélisation sont nombreuses lors de ces projets. Bien évidemment les problématiques importantes abordées dans ce cadre ne sont pas les questions de consommation de chauffage ou d'éventuelle consommation liée au rafraîchissement en période estivale qui font l'objet de (trop) nombreuses publications. En effet la problématique de la consommation E , en régulation parfaite, peut être abordée par le biais du régime permanent à condition de prendre les valeurs moyenne des sollicitations \bar{U} pour la période considérée (Calcul de la consommation E sur une séquence grâce à un modèle d'état : $\dot{X}=WX+BU$, $Y=P(t)=HX+DU$), $E = -HW^{-1}B \int U dt + G \int U dt = (G - HW^{-1}B) \int U dt = > (G - HW^{-1}B)\bar{U}=E$). Pour des situations plus réalistes (surchauffes, baisse de la puissance disponible temporellement, ...), (Lefebvre et al. 1985) proposent une corrélation $E=f(\tau,G)$ avec τ : constante de temps principale du bâtiment et G : coefficient de déperdition en $Wm^{-3}K^{-1}$.

La sensibilisation à la Thermique du Bâtiment est donc plutôt tournée vers des sujets pour lesquels la STD est indispensable : les gains d'intermittence, le confort, les appels de puissance max., l'inertie, les masques proches et lointains, les vitrages, la gestion de la ventilation ...

Et donc, la représentation des ponts thermiques en STD ainsi que des parois à fortes hétérogénéités est un des sujets récurrents abordés par les étudiants. Ces derniers ont bien compris que les simulations et les analyses doivent être faites sur l'année entière (voire plusieurs années) pour être pertinentes (une solution pertinente en hiver est parfois contreproductive en été) et que les codes de STD existants s'ils intègrent des « briques 2D ou 3D », voient alors leur temps de simulation devenir inappropriées. Alors, comment fait-on pour modéliser les ponts thermiques ou les murs en parpaings ?

2. LES PONTS THERMIQUES ET LES PAROIS « HETEROGENES 2D OU 3D »

La figure 1 (Pajani et al. 2012) montre bien l'intérêt de la question posée. Les codes de STD étant basés, sauf « brique » particulière, sur une représentation 1D des transferts de chaleur par conduction dans les parois de l'enveloppe, comment fait-on dans le cas ci-dessous ? L'idée d'une paroi équivalente 1D est a priori très intéressante dans la mesure où celle-ci pourra être intégrée dans tous les codes existants.

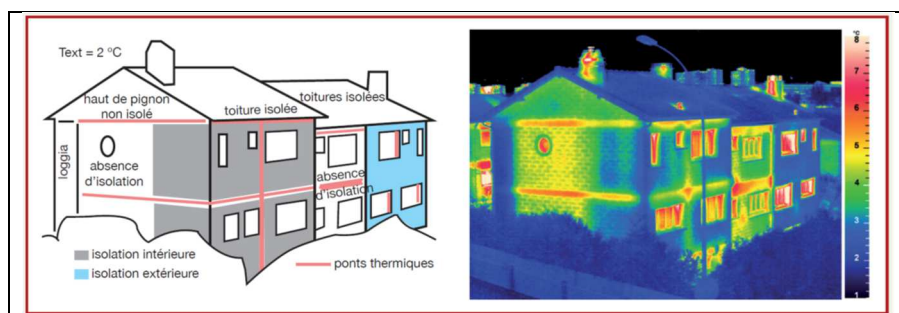


Fig. 1 : Le thermogramme dit « des trois pavillons » du Guide pratique de Thermographie du bâtiment (Pajani et al. 2012)

Nous allons tenter de décrire, dans les pages suivantes, les différentes approches proposées par de nombreux chercheurs et faire une analyse critique des grandes familles rencontrées.

Mais cette question de la modélisation de ces

« parois particulières » en engendre d'autres de la part des étudiants que nous abordons dans une partie liminaire.

2.1. EST-CE BIEN UTILE ? LA PART DES « PONTS THERMIQUES » EST-ELLE SI IMPORTANTE ?

“Studies have shown that in some buildings up to 50% of the elevation area consists of three-dimensional envelope structural details and up to 30% of heating energy can be lost through thermal

bridges for well-insulated residential buildings adopting high performance windows and highly insulated walls and roof» : cette citation est extraite de (Hua Ge et al. 2015) et reprend les résultats de (Kosny et al. 1994) et (Theodosiou et al. 2008).

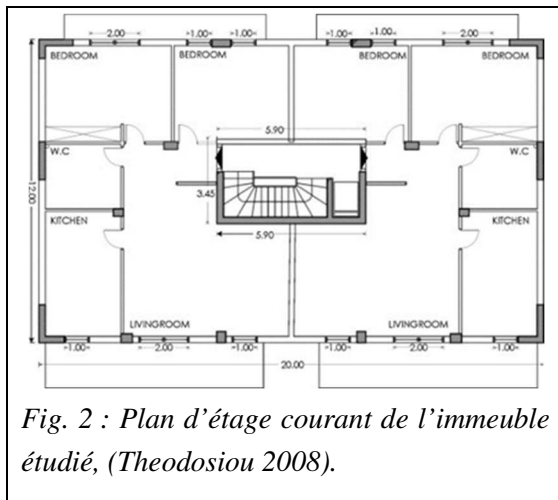
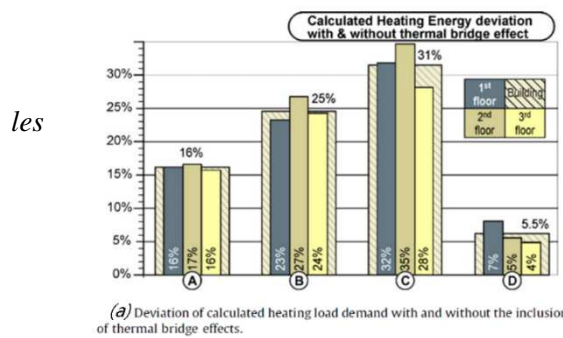


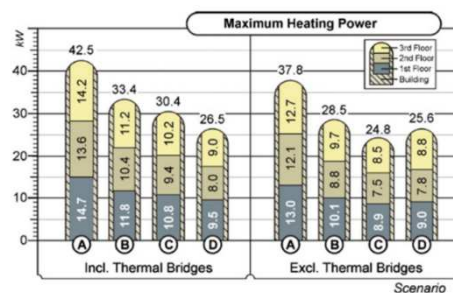
Fig. 2 : Plan d'étage courant de l'immeuble étudié, (Theodosiou 2008).

(Theodosiou et al. 2008) montre un exemple de calcul sur un immeuble de 3 étages (figure 2) de l'écart de consommation de chauffage avec et sans ponts thermiques (figure 3a) ainsi que du maximum d'appel de puissance de chauffage (figure 3b) avec et sans ponts thermiques. Les scenarios A, B, C et D décrivent sur l'exemple du même immeuble des pratiques constructives et d'isolation fréquemment rencontrées en Grèce. Les résultats concernant la prise en compte ou non des ponts thermiques sont probants, que ce soit sur des écarts concernant le calcul de la consommation, aussi bien que sur l'évaluation de la

puissance maximale appelée pour le chauffage. D'autres auteurs (Gao et al. 2008) montrent la même tendance. La prise en compte des ponts thermiques est donc bien une problématique à ne pas sous-estimer.



(a) Deviation of calculated heating load demand with and without the inclusion of thermal bridge effects.



(b) Maximum heating power requirement during the heating season.

Fig. 3 : Ecart sur

consommations et sur les appels de puissance maximale (Theodosiou et al. 2008)

2.2. LE MODELE DE « PONTS THERMIQUES » EN REGIME PERMANENT N'EST-IL PAS SUFFISANT POUR LA STD ?

L'article (Déqué et al. 2001a) aborde ce sujet sur l'exemple de la maison Matisse et à l'aide du code de calcul Clim2000. Les modèles de ponts thermiques (obtenus sur la base de modèle d'état réduits) sont générés grâce au code Sysley (maillage structuré par bloc, permettant une économie de mailles) et intégrés dans Clim2000 par le biais de « Types » spécifiques, selon la terminologie utilisée dans le code.

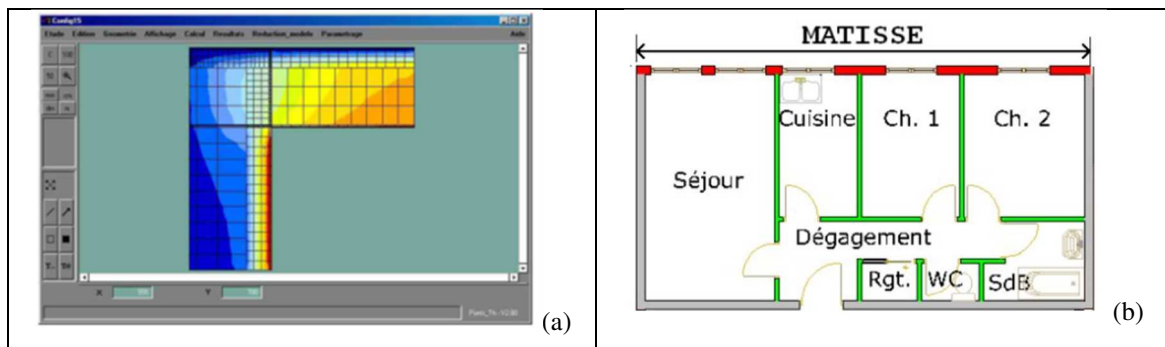
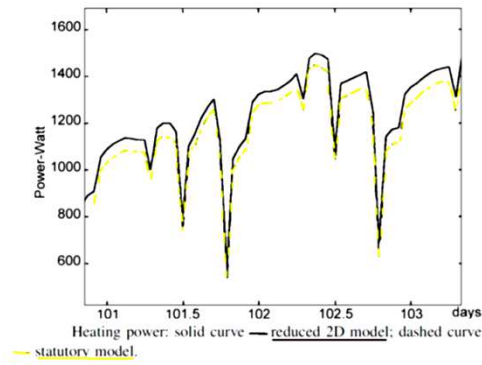


Fig. 4 : Ecran principale du code Sysley (Déqué et al. 2001b) et plan de la maison Matisse (CSTB)



La figure 5 présente les résultats obtenus soit en utilisant les Modèles Réduits Dynamiques (MRD), soit les Modèles en Régime Permanent (MRP) et qui sont ceux de la réglementation thermique.

Les écarts en appel de puissance de chauffage sont compris entre 5 et 7% sur la séquence hivernale traitée, l'approche en régime permanent sous-estimant systématiquement les évaluations de cette puissance.

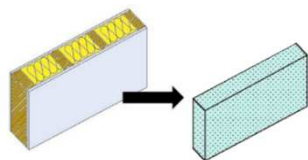
(Ge, 2015) va dans le même sens sur une étude paramétrique incluant les consommations en chauffage et en froid.

Fig. 5 : Comparaison des résultats obtenus avec MRD et MRP (Déqué et al. 2001a)

Des modèles « dynamiques » de ponts thermiques ou de parois hétérogènes semblent donc préférables aussi bien pour l'évaluation des consommations dans des situations « réalistes » que pour les dimensionnements des systèmes de chauffage ou de climatisation.

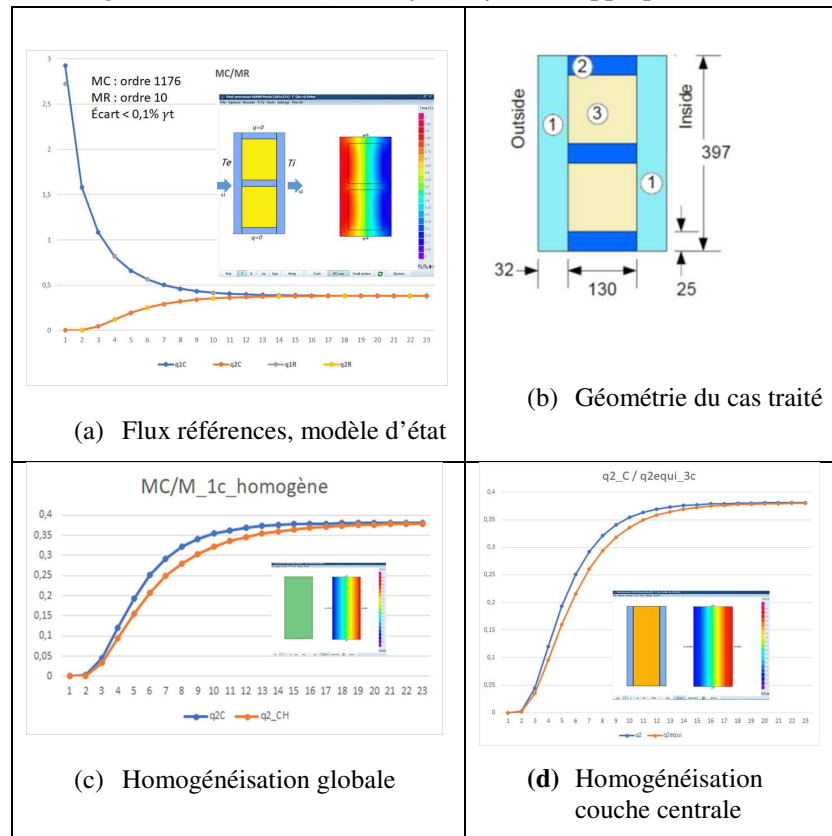
3. LES DIFFERENTES APPROCHES DE MODELISATION DES PONTS THERMIQUES ET PAROIS HETEROGENES RENCONTREES DANS LA LITTERATURE

3.1. LE MODELE DE PAROI HOMOGENE EQUIVALENTE



(Karambakkam et al. 2005) proposent, pour des parois "composites" relativement simples, de chercher un mur équivalent homogène. La figure 6 ci-dessous résume la méthode et donne les résultats obtenus sur l'un des trois exemples (b) traité dans l'article. La méthode

d'homogénéisation ($R=R_{eq}$ et $C=\rho c_{eq}=\sum \rho_i c_i$) est appliquée soit à l'ensemble de la paroi (c) avec des

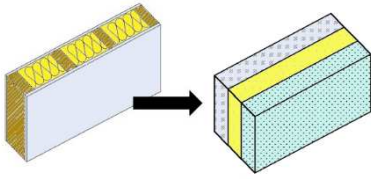


résultats plutôt moyens, soit à la partie centrale 2D (b) avec des résultats un peu meilleurs. La référence utilisée ici (a) est fourni par un modèle d'état à 1176 nœuds (ou le modèle réduit d'ordre 10 obtenu par agrégation linéaire) généré par le biais de HEAT2, qui fait l'objet d'une présentation détaillée au paragraphe 3.3.

Les résultats concernant l'homogénéisation sont très moyennement satisfaisants, mais c'est néanmoins une méthode qui, pour ce type de parois, est très simple à mettre en œuvre pour les étudiants .

Fig. 6 : Equivalent Homogeneous Layer Method / modèle d'état d'ordre élevé

3.2. LE MODELE DE PAROI MULTI-COUCHES EQUIVALENTE



(Kossecka, Kosny 1997), dont les noms sont indissociables sur ce sujet, ont proposé de rechercher un mur équivalent 1D multicouche équivalent à un pont thermique ou une paroi “hétérogène” en s’appuyant sur les “structure factors” ϕ_{ii} , ϕ_{ee} , et ϕ_{ie} du cas traité (tableau 1). Ces facteurs sont obtenus sur des considérations de conservation de l’énergie pour l’ensemble du volume V traité.

Le rapport de master (F. Baba 2015) ainsi que deux articles (J. Quinten et al. 2016) et (J. Quinten et al. 2019) résument et illustrent parfaitement la méthode ainsi que des variantes.

<p>$\phi_{ii} + 2\phi_{ie} + \phi_{ee} = 1$ (a)</p> <p>The structure factors can be calculated from the steady-state heat conduction problem with the following boundary conditions: $T_e = 1$ (unit step) and $T_i = 0$</p> <p>$\phi_{ii} = \frac{1}{C} \int_V \rho c (1 - T(x, y, z))^2 dV$ (b)</p> <p>$\phi_{ie} = \frac{1}{C} \int_V \rho c (T(x, y, z))(1 - T(x, y, z)) dV$ (c)</p> <p>$\phi_{ee} = \frac{1}{C} \int_V \rho c (T(x, y, z))^2 dV$ (d)</p> <p>$C = \int_V \rho c dV$ (e)</p>	<p>$\phi_{ii} = \frac{1}{R^2 C} \left(C_1 \times \left(\frac{R_1^2}{3} + R_1 \times (R_2 + R_3 + R_e) + (R_2 + R_3 + R_e)^2 \right) + C_2 \times \left(\frac{R_2^2}{3} + R_2 \times (R_3 + R_e) + (R_3 + R_e)^2 \right) + C_3 \times \left(\frac{R_3^2}{3} + R_3 \times R_e + R_e^2 \right) \right)$ (a')</p> <p>$\phi_{ee} = \frac{1}{R^2 C} \left(C_1 \times \left(\frac{R_1^2}{3} + R_1 \times R_i + R_i^2 \right) + C_2 \times \left(\frac{R_2^2}{3} + R_2 \times (R_i + R_1) + (R_i + R_1)^2 \right) + C_3 \times \left(\frac{R_3^2}{3} + R_3 \times (R_i + R_1 + R_2) + (R_i + R_1 + R_2)^2 \right) \right)$ (b')</p> <p>$\phi_{ie} = \frac{1}{R^2 C} \times \left(C_1 \times \left(-\frac{R_1^2}{3} + \frac{R_1 \times R}{2} + R_i \times (R_2 + R_3 + R_e) \right) + C_2 \times \left(-\frac{R_2^2}{3} + \frac{R_2 \times R}{2} + (R_i + R_1) \times (R_3 + R_e) \right) + C_3 \times \left(-\frac{R_3^2}{3} + \frac{R_3 \times R}{2} + (R_i + R_1 + R_2) \times R_e \right) \right)$ (c')</p> <p>With:</p> <p>$R = R_i + R_1 + R_2 + R_3 + R_e$ (d')</p> <p>$C = C_1 + C_2 + C_3$ (e')</p> <p>$R_m = \frac{e_m}{k_m}$ (f')</p> <p>$C_m = \rho_m \times e_m \times e_m$ (g')</p>
<p>The diagram shows a thermal circuit for the 3R3C model. It starts with an interior temperature T_i on the left and an exterior temperature T_e on the right. The circuit consists of three resistors in series, labeled $R_1/2$, $R_2/2$, and $R_3/2$. Between each resistor, there is a capacitor C_1, C_2, and C_3 respectively, connected to a common ground m. The total resistance is R and the total capacitance is C.</p>	
<p>Modèle 3R3C de la paroi équivalente</p>	

Tableau 1 : Détermination des « Structure Factors » (a-e) appliquée sur le volume V du pont thermique ou de la paroi hétérogène et application au modèle 3R3C (a' - g')

J. Quinten, V. Feldheim et F. Baba ont proposé dans un premier temps la résolution des 4 équations à 5 inconnues du tableau 1 par le biais d’une procédure itérative. Les résultats sont souvent corrects mais la solution est non-unique. J. Quinten et V. Feldheim ont donc imaginé la “Méthode mixte” en complétant la méthode précédente par la recherche des R_i et des C_i qui par ailleurs minimisent le critère F ci-dessous. A et α représentent les Amplitude et Déphasage des flux intérieur (i) et extérieur (e) du pont thermique, A’ et α' étant ceux obtenus grâce au modèle 3R3C.

$$F = \sqrt{\left(\frac{A_i(24h) - A'_i(24h)}{A_i(24h)} \right)^2 + \left(\frac{A_e(24h) - A'_e(24h)}{A_e(24h)} \right)^2 + \left(\frac{\alpha_i(24h) - \alpha'_i(24h)}{\alpha_i(24h)} \right)^2 + \left(\frac{\alpha_e(24h) - \alpha'_e(24h)}{\alpha_e(24h)} \right)^2}$$

Le R_m et C_m ($m=1,3$) du modèle 3R3C étant connues, les conductivités des 3 couches sont déterminées en faisant l’hypothèse $e_m = e_{total} / 3$ et les masses volumiques ρ_m en posant $c_m = 1 \text{ kJ}/(\text{kg}/\text{K})$.

La figure 7 ci-dessous résume la “Méthode mixte” (structure factors + réponse en flux à une sollicitation sinusoïdale). L’exemple de la figure 8 montre l’efficacité de la méthode sur l’exemple d’un pont thermique. Deux autres exemples dans cet article donnent des résultats tout aussi convaincants.

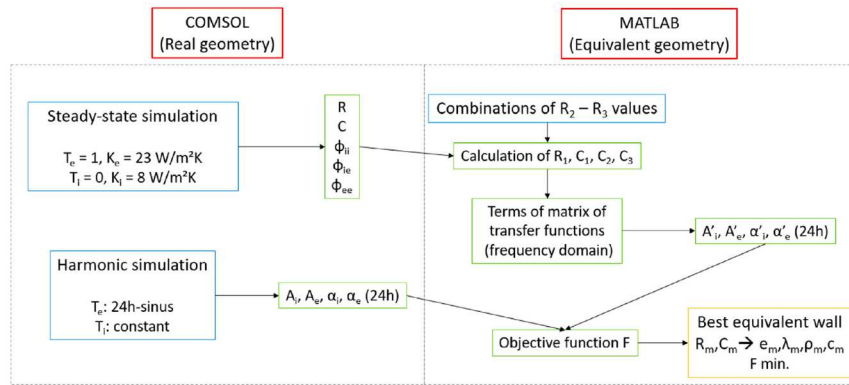


Fig. 7 : Résumé de la « Méthode mixte » (J. Quinten et al. 2019)

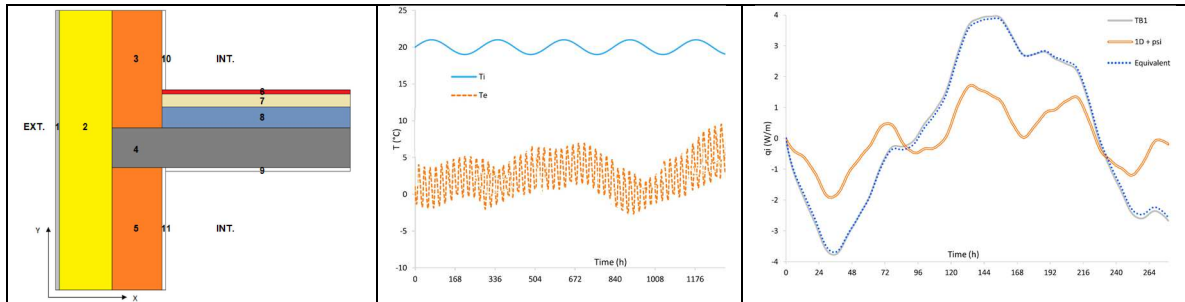


Fig.8 Cas traité (TB1), sollicitations et flux total sur les faces internes du pont thermique

R_1	R_2	R_3	C_1	C_2	C_3
m²K/W			kJ/(m²K)		
0.21	6.29	0.08	631	4.83	17.5
ψ	S_{ref}	ϕ_{ii}	ϕ_{ie}	ϕ_{ee}	F
W/mK	m²/m		-		-
0.004	1.06	0.92	0.02	0.03	0.032

Tableau 3 : Caractéristiques de la paroi équivalente et du modèle R3C3 associé

J. Quinten et V. Feldheim soulignent eux aussi l'intérêt de la prise en compte des ponts thermiques via un modèle « dynamique » : l'écart avec l'approche « 1D+ Ψ » (courbe orange, figure 8) sous-estime fortement les « pertes / gains » sur cette séquence climatique particulière par rapport aux courbes bleues (référence) et pointillée (mur équivalent). La méthode est très satisfaisante. Outre son excellente capacité de reproduction des pertes/gains en dynamique, le fait qu'elle soit basée sur l'identification d'une paroi 1D permet d'utiliser celle-ci facilement dans

quasiment tous les codes de STD. Néanmoins dans l'exemple de la figure 8, les deux zones séparées par le plancher sont nécessairement à la même température ce qui, très souvent, n'est pas le cas, en particulier dès que l'on souhaite des consignes différentes par zone ou en cas de surchauffes dues aux gains solaires par exemple.

3.3 REDUCTION DES MODELES D'ETAT

Une représentation par un modèle d'état à trois entrées $U(t) = [(Te(t), Ti1(t) \text{ et } Ti2(t))]^t$ et trois sorties $Y(t) = [(\Phi_e(t), \Phi i1(t), \Phi i2(t))]^t$ permet de contourner cette difficulté (Déqué et al. 2001a). En effet, après discrétisation spatiale du cas à traiter et définition des CL (Figure 9), il est possible de représenter les transferts de chaleur au travers de la paroi par un modèle d'état, les grandeurs « observées » Y pouvant s'exprimer sous la forme d'une combinaison linéaire de l'état $T(t)$ et des sollicitation $U(t)$: $CT\dot{(t)} = AT(t) + BU(t)$ et $Y(t) = JT(t) + GU(t)$ (dans la suite nous supprimons la référence au temps t). Ces modèles réduits ont également été validés par rapport à l'expérimentation (Gao et al. 2004) dans des configurations 3D. En diagonalisant la matrice $C^{-1}A$ (dim n, n), on obtient la matrice des valeurs propres W (dim n, n) et des vecteurs propres P (dim n, n).

Le changement de base par $T = PX$ permet d'écrire : $\dot{X} = WX + BU$ et $Y = HX + GU$.

De nombreuses méthodes permettent de réduire la dimension du modèle d'état ($r < n$) tout en donnant une bonne estimation des grandeurs observées, la plupart des modes ne contribuant pas ou peu dans leur reconstitution (Gao et al. 2008). La figure 9 ci-dessous résume la procédure que nous avons mis en place avec l'aide de T.Blomberg (<https://buildingphysics.com/heat2-3/>) au travers des versions spéciales de Heat2 et Heat3 afin de générer automatiquement les modèles d'état correspondant à un cas 2D voire 3D. Les fichiers générés sont traités par une procédure Matlab produisant les modèles d'état réduits.

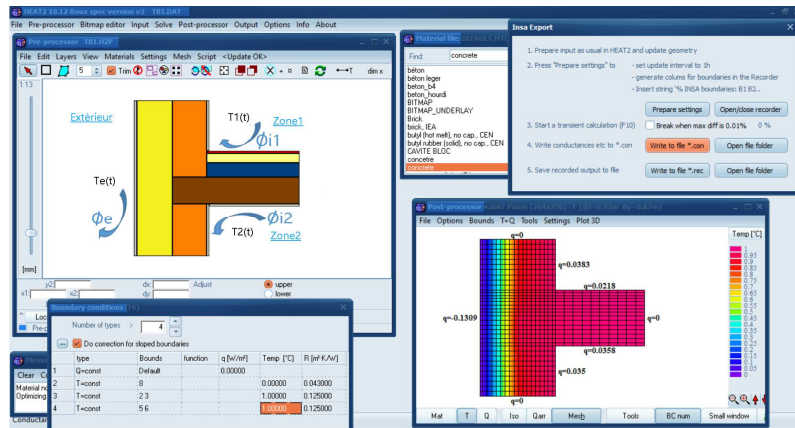


Fig. 9 : Ecrans de saisie de Heat2. Géométrie, conditions aux limites, maillage et génération des fichiers décrivant complètement le cas (voisins/mailles et relation flux aux frontières/sollicitations)

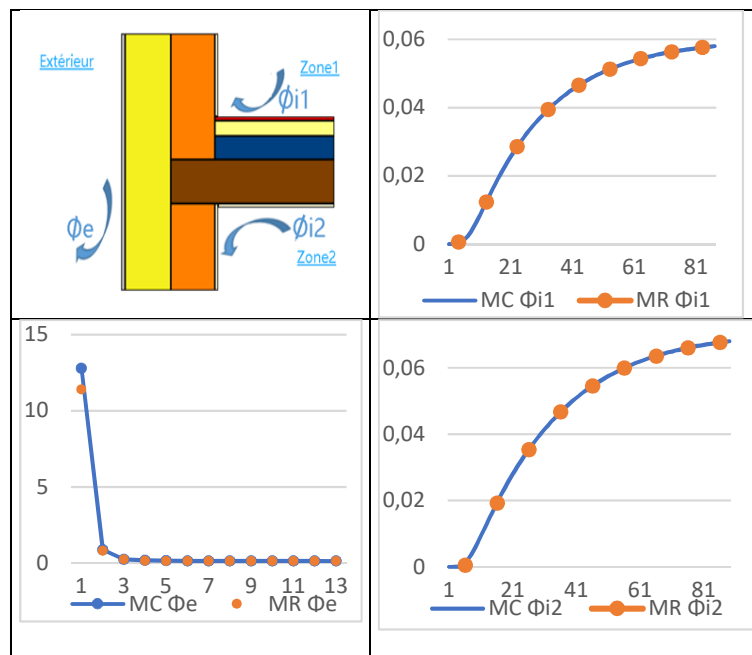


Fig. 10 : TB, comparaison des flux modèles MC/MR

Le modèle d'état complet MC est d'ordre 780 et le modèle d'état réduit obtenu par Agrégation linéaire MR est d'ordre 26. La figure 10 montre la comparaison des flux Φ_e , Φ_{i1} et Φ_{i2} obtenus par MC/MR pour des échelons de température intérieure. L'adéquation est parfaite et le modèle réduit est ici 30 fois moins grand que le modèle d'état d'origine. Cette procédure pourrait impliquer un découpage de l'enveloppe un peu délicate, mais la méthodologie décrite dans (Gao et al. 2008) permet de contourner cette difficulté en construisant un modèle réduit représentant uniquement le surplus de flux par rapport au découpage 1D classique de l'enveloppe. L'introduction de cette dernière approche n'est pas possible dans des codes « non ouverts » (contrairement à la méthode d'identification d'une paroi 1d équivalente).

4. CONCLUSIONS

Des méthodes d'identification de modèle nRnC ($n=1..6$ au plus) sont également proposées dans la littérature, mais la méthode la plus prometteuse semble être la méthode basée sur les modèles d'état réduits permettant de prendre en compte la présence de locaux adjacents à températures différentes. La contrepartie, pour cette dernière, est la nécessité du développement d'un module spécifique au sein du code de STD, contrairement à la méthode de « paroi équivalente » utilisable, avec les contraintes évoquées, dans tous les codes de STD existants. Les formateurs doivent impérativement faire en sorte

que les étudiants aient conscience de l'existence de ces méthodes et de leur disponibilité dans les codes de STD les plus utilisés.

4. BIBLIOGRAPHIE

F. Allard, 1978, *Etude des ponts thermiques des parois de bâtiment en régime variable des températures*, Thèse INSA Lyon

G. Lefebvre, A. Neveu, 1985, Calcul simplifié de la constante de temps principale d'un bâtiment, Atelier d'Evaluation H2E85

D. Pajani, J.-P. Favre, J.-L. Marty, C. Guillermo, 2012. *Guide pratique de thermographie du bâtiment*, Eyrolles

Hua Ge, Fuad Baba, 2015. *Dynamic effect of thermal bridges on the energy performance of a low-rise residential building*, Energy and Buildings 105, 106–118

J. Kosny, A.O. Desjarlais, 1994. *Influence of architectural details on the overall thermal performance of residential walls systems*, J. Therm. Insul. Build. Envelopes 18 (1), 53–69.

T.G. Theodosiou, A.M. Papadopoulous, 2008. *The impact of thermal bridges on the energy demand of buildings with double brick wall constructions*, Energy and Build. 40, 2083–2089.

F. Déqué, F. Ollivier, J.J. Roux, 2001a. *Effect of 2D modelling of thermal bridges on the energy performance of buildings: numerical application on the Matisse apartment*, Energy and Build. 33, 583-587.

F. Déqué, J. Noel, J.-J. Roux, 2001b. *SISLEY: An open tool for transient-state two-dimensional heat transfer*, 7th International IBPSA Conference, Rio de Janeiro, Brazil

Y. Gao, J.J. Roux, L.H. Zhao, Y. Jiang, 2008. *Dynamical building simulation: A low order model for thermal bridges losses*, Energy and Buildings 40(12), 2236–2243

B.K. Karambakkam, B. Nigusse, J. D. Spitler, 2005. *A One-dimensional Approximation for Transient Multi-dimensional Conduction Heat Transfer in Building Envelopes*. Proceedings of the 7th Symposium on Building Physics in the Nordic Countries, Vol. 1, pp. 340-347.

E. Kossecka, J. Kosny, 1997. *Equivalent wall as a dynamic model of a complex thermal structure*, J. Therm. Insul. Build. Envelopes 20, 249–268.

J. Quinten, V. Feldheim, 2016. *Dynamic modelling of multidimensional thermal bridges in building envelopes: Review of existing methods, application and new mixed method*, Energy and Buildings, Volume 110, 1, Pages 284-293

J. Quinten, V. Feldheim, 2019. *Mixed equivalent wall method for dynamic modelling of thermal bridges: Application to 2-D details of building envelope*, Energy & Buildings 183, 697–712

F. Baba, 2015. *Dynamic Effect of Thermal Bridges on the Energy Performance of Residential Buildings*, Master of Applied Science, Concordia University Montréal, Québec, Canada,

Y.Gao, J.J.Roux, C. Teodosiu, L.H.Zhao, 2004. *Reduced linear state model of hollow blocks walls, validation using hot box measurements*, Energy and Building, 36(11):1107~1115

Intégration du comportement hygrothermique des parois dans un modèle de climat urbain : cas du centre-ville historique de Cahors

Margot Ruiz*^{1,2}, Valéry Masson², Marion Bonhomme¹, Marina Malagoli³, Stéphane Ginestet¹

¹ LMDC, Université de Toulouse, INSA, UPS, Toulouse, France

² CNRM, Université de Toulouse, Météo-France, CNRS, Toulouse, France

³ Instituto Federal de Goiás, Goiás, Brasil

*mruiz@insa-toulouse.fr

RESUME. Les transferts d'humidité sont un phénomène clé à considérer pour étudier la rénovation des parois des bâtiments anciens, puisqu'ils impactent le confort intérieur et extérieur, les consommations énergétiques et la durabilité des parois. Ce travail propose donc d'intégrer les transferts d'humidité à travers les parois, dans le modèle de climat urbain TEB (Town Energy Balance), en s'appuyant sur une méthode de résolution numérique des transferts hygrothermiques, spécialement adaptée à l'échelle urbaine. La fiabilité de TEB pour représenter les bâtiments anciens est évaluée par comparaison avec des mesures in-situ. L'impact des transferts d'humidité à travers les parois est également discuté à différentes échelles. L'intégration des transferts hygrothermiques permet d'améliorer significativement la simulation de l'humidité relative intérieure et d'estimer le risque de croissance de moisissures. L'outil TEB pourra être utilisé pour évaluer la rénovation des parois anciennes, en considérant les enjeux énergétiques et microclimatiques, mais aussi la durabilité de la paroi.

MOTS-CLÉS : transferts hygrothermiques, centre-ville historique, modèle de climat urbain

ABSTRACT. Moisture transfer is a key phenomenon to consider when studying the retrofit of walls in old buildings, since it has an impact on indoor and outdoor comfort, energy consumption and the durability of the walls. This work therefore proposes to integrate moisture transfers through walls into the TEB (Town Energy Balance) urban climate model, using a method for numerically solving hygrothermal transfers that is specially adapted to the urban scale. The reliability of TEB in representing old buildings is assessed by comparison with in-situ measurements. The impact of moisture transfer through walls is also discussed at different scales. The integration of hygrothermal transfers makes it possible to significantly improve the simulation of indoor relative humidity and to estimate the risk of mould growth. The TEB tool can be used to assess the retrofit of old walls, taking into account energy and microclimate issues, as well as the wall durability.

KEYWORDS : hygrothermal transfer, historical city centre, urban climate model

1. INTRODUCTION

Face à l'urgence climatique, il devient indispensable d'améliorer l'efficacité énergétique des bâtiments, souvent peu isolés, des centres-villes historiques. La méthode permettant de comparer rapidement et sur de larges périodes spatio-temporelles plusieurs scénarios de rénovation est la simulation énergétique des bâtiments. Cependant, les outils existants sont plutôt conçus pour simuler les bâtiments modernes et ne considèrent pas les spécificités des bâtiments anciens, plus particulièrement le comportement hygrothermique de leurs murs. En effet, les parois anciennes sont fortement perméables à l'eau sous forme liquide et vapeur. Or, les transferts hydriques à travers les parois impactent fortement la durabilité des murs anciens, notamment le risque de croissance de

moisissures après isolation (Claude 2018). De plus, la pluie et la capacité de tampon hydrique des matériaux peuvent avoir un effet considérable sur la consommation d'énergie, ainsi que le confort intérieur et extérieur dans certaines configurations (Saneinejad et al. 2012; Maalouf et al. 2014).

Les centres-villes historiques se caractérisent aussi par leurs rues étroites. Leur forme urbaine dense impacte le microclimat local et modifie fortement les conditions aux limites au niveau de l'enveloppe des bâtiments. Il est donc indispensable de prendre en compte les caractéristiques du milieu urbain, pour évaluer correctement les consommations énergétiques et la durabilité des parois (Claude 2018).

Actuellement aucun modèle de climat urbain, permettant d'effectuer des simulations à l'échelle urbaine et sur plusieurs années (période nécessaire pour estimer le risque de croissance de moisissures), ne considère les transferts d'humidité à travers les parois. L'enjeu de ce travail est donc de proposer un outil complet et adapté pour évaluer la rénovation des parois anciennes à l'échelle des centres-villes historiques, en considérant les multiples enjeux. Les transferts hydriques à travers les parois vont donc être intégrés dans le modèle de climat urbain TEB (Town Energy Balance) (Masson 2000), développé par Météo France. La section 2 décrit la méthode utilisée et les modifications effectuées dans TEB. La section 3 propose un cas d'étude sur le centre-ville médiéval de Cahors. Les résultats permettront d'évaluer la fiabilité du modèle et d'évaluer l'impact des transferts hydriques à différentes échelles.

2. INTEGRATION DES TRANSFERTS HYGROTHERMIQUES DANS TEB

Cette section présente les étapes de l'intégration des transferts hydriques à travers les parois, dans le modèle TEB, incluant le choix du modèle et de la méthode de résolution numérique, ainsi que les modifications apportées à TEB.

2.1. MODELE DE TRANSFERTS COUPLES DE CHALEUR ET DE MASSE

Le modèle choisi décrit les transferts hygrothermiques à travers une paroi multicouche, en 1D. Il s'appuie en partie sur les travaux de (Grunewald 1997) et comporte deux équations : les bilans de conservation d'énergie (1) et de masse (2). La partie gauche des équations correspond aux termes de stockage, tandis que les éléments de droite sont les termes de transport. Plusieurs types de transfert sont considérés : les transferts de chaleur par conduction, les transferts de vapeur d'eau et les transferts d'eau sous forme liquide. En revanche, la dépendance du stockage de chaleur à la variation de stockage d'humidité et l'effet des transferts d'eau liquide sur l'équation de la chaleur sont négligés. Les hypothèses effectuées sont détaillées dans les travaux de Ruiz et al. (2023). Les deux équations sont exprimées en fonction de deux inconnues : la température et la pression capillaire.

$$(c_{mat} \rho_{mat} + c_l w) \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\left(\lambda + L_v K_v \left[\frac{\partial p_{v,sat}}{\partial T} \varphi + \frac{p_c \rho_v}{T \rho_l} \right] \right) \frac{\partial T}{\partial x} + \left[L_v K_v \frac{\rho_v}{\rho_l} \right] \frac{\partial p_c}{\partial x} \right) \quad (1)$$

$$\frac{\partial w}{\partial p_c} \frac{\partial p_c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_v \left[\frac{\partial p_{v,sat}}{\partial T} \varphi + \frac{p_c \rho_v}{T \rho_l} \right] \frac{\partial T}{\partial x} + \left[K_l + K_v \frac{\rho_v}{\rho_l} \right] \frac{\partial p_c}{\partial x} \right) \quad (2)$$

Avec T la température (K), p_c la pression capillaire (Pa), p_v la pression de vapeur (Pa), K_v la perméabilité à la vapeur ($kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1} \cdot Pa^{-1}$), K_l la conductivité liquide (s), c la capacité calorifique ($J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$), ρ la masse volumique ($kg \cdot m^{-3}$), w la teneur en eau ($kg \cdot m^{-3}$) et L_v la chaleur latente de vaporisation ($J \cdot kg^{-1}$).

Concernant les conditions aux limites, les flux thermiques et les flux massiques au niveau des surfaces sont notés respectivement q_{surf} et j_{surf} . Ils comprennent la convection thermique et massique entre la surface de la paroi et l'air ambiant, les échanges radiatifs à courte et grande longueur d'onde. La méthode pour évaluer la pluie absorbée par la façade (j_{pluie}) est présentée dans la section 2.3.

$$q_{surf} = h_{conv,th} (T_{amb} - T_{surf}) + q_{CLO} + q_{GLO} + L_v h_{conv,m} \left[p_{v,amb} - p_{sat}(T_{surf}) \exp\left(\frac{p_{c,surf}}{\rho_l R_v T_{surf}}\right) \right] + c_l (T_{amb} - T_{can}) j_{pluie} \quad (3)$$

$$j_{surf} = h_{conv,m} \left[p_{v,amb} - p_{sat}(T_{surf}) \exp\left(\frac{p_{c,surf}}{\rho_l R_v T_{surf}}\right) \right] + j_{pluie} \quad (4)$$

Avec $h_{conv,th}$ coefficient de convection thermique ($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$) et $h_{conv,m}$ coefficient de convection massique ($s \cdot m^{-1}$).

2.2. METHODE DE RESOLUTION NUMERIQUE

Les méthodes numériques, communément utilisées pour résoudre les transferts hygrothermiques, ne sont pas adaptées à l'échelle urbaine. En effet, les outils à l'échelle des parois recherchent des solutions toujours plus précises pour la résolution des transferts, tandis que les modèles à l'échelle urbaine sont déjà basés sur de nombreuses hypothèses simplificatrices. Les travaux de Ruiz et al. (2023) proposent un schéma numérique spécialement adapté à l'échelle urbaine. Il s'appuie sur des compromis entre le niveau de précision et la facilité d'intégration dans TEB, et fonctionne à de larges échelles spatio-temporelles. Ses caractéristiques principales sont les suivantes :

- Un **schéma de discrétisation IMEX** (Implicite-Explicite), permettant l'utilisation d'une méthode de résolution numérique non itérative (Gasparin, Berger, et Mendes 2019);
- Une **approche de résolution découplée** (résolution séparée des équations de conservation de l'énergie et de la masse), permettant de conserver la structure du code de TEB ;
- L'utilisation de **seulement deux pas de temps** différents (pas de temps fixé à cinq minutes et abaissé à dix secondes dans les moments critiques pour la convergence, qui sont identifiés à l'aide de cinq tests), évitant l'implémentation d'un pas de temps totalement variable ;
- Une **technique de maillage optimisée** (une première maille de 1 mm, un facteur d'accroissement de 1,5, une taille maximale de maille de 10 cm et aucun affinement du maillage à l'interface entre deux couches de matériaux), suffisante pour simuler les échanges entre la paroi et son environnement, tout en limitant le nombre de nœuds.

2.3. DESCRIPTION DE TEB ET DES MODIFICATIONS APPORTEES

TEB (Town Energy Balance) est un modèle initialement conçu pour paramétrer les échanges thermiques, radiatifs, turbulents et hydriques entre les surfaces et l'atmosphère (Masson 2000). Un quartier est représenté par une rue typique, ce qui signifie que les bâtiments ne sont pas modélisés pas individuellement. Le module BEM (Building Energy Model) représente le comportement énergétique des bâtiments (Bueno et al. 2012), incluant notamment les effets des fenêtres, des équipements de CVC (Chauffage Ventilation Climatisation), des infiltrations d'air et les gains internes. Ainsi, le modèle TEB peut donc être utilisé pour évaluer les consommations énergétiques aussi bien que le confort thermique intérieur et extérieur. De plus, le modèle TEB permet déjà d'évaluer l'humidité spécifique dans le canyon et à l'intérieur des bâtiments, en considérant les principaux phénomènes. Cependant, il néglige actuellement les transferts d'humidité à travers les parois.

Actuellement, TEB comprend seulement une équation résolvant les transferts thermiques par conduction. Pour implémenter les transferts hydriques dans TEB, il est donc nécessaire d'ajouter une seconde équation pour résoudre le bilan massique (1). L'équation de la chaleur doit également être complétée en ajoutant les processus hydriques, ce qui équivaut à intégrer le stockage de chaleur dans la phase liquide, l'évolution de la conductivité thermique en fonction de la teneur en eau et les transferts de chaleur avec la phase vapeur (2). Ainsi, l'unique équation de TEB est remplacée par un système d'équations plus complexe à résoudre. La méthode de résolution a donc également dû être modifiée pour correspondre à celle suggérée dans la section 2.2. D'autres modifications ont dû être effectuées.

En effet, jusqu'à présent, les données d'entrée pour définir les matériaux étaient restreintes à l'épaisseur de la couche de chaque matériau, la conductivité thermique, la masse volumique et la capacité calorifique. Pour décrire le comportement hydrique des matériaux, il est nécessaire de fournir en entrée du modèle des indications sur la capacité de stockage d'humidité, la conductivité d'eau liquide et le coefficient de diffusion de vapeur d'eau, qui varient en fonction du niveau d'humidité. L'évolution de ces caractéristiques peut être décrite à partir d'une liste de points ou d'une fonction.

TEB tient donc compte de manière très détaillée des conditions aux limites thermiques et radiatives. En revanche, il est nécessaire d'implémenter deux conditions aux limites supplémentaires : la convection massique et la pluie battante (Figure 1). Les échanges convectifs sont calculés en fonction de la pression de vapeur de l'air ambiant et du coefficient de convection massique, qui est déterminé à partir du coefficient de convection thermique, en utilisant la relation de Lewis. La pluie battante incidente à la paroi est estimée à partir des travaux de Straube et Burnett (2000), car cette formule s'appuie sur la vitesse du vent local. L'ajout de la pluie absorbée par les parois dans TEB, implique une modification de la répartition de la pluie entrant dans le canyon urbain. En effet, le sol perçoit désormais la différence entre la pluie totale entrant dans le canyon et la pluie absorbée par la paroi.

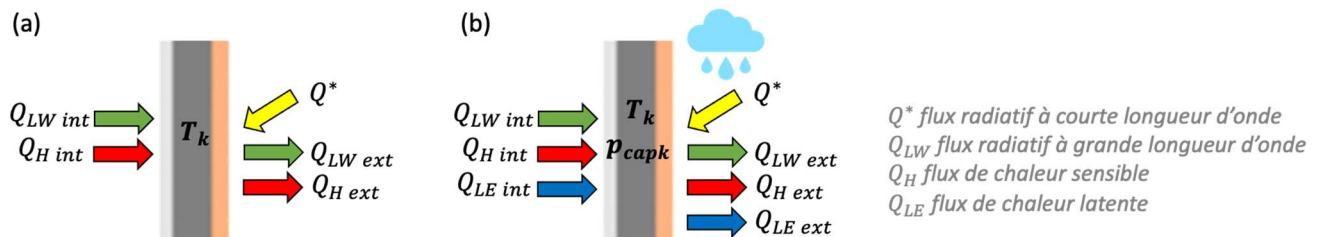


Figure 1 : Simulation des parois dans TEB avant (a) et après (b) intégration des transferts hydriques

Enfin, le modèle VTT (Vereecken, Vanoirbeek, et Roels 2015) est intégré dans l'outil TEB pour évaluer le risque de croissance de moisissures. L'outil TEB donnera alors en sortie l'évolution temporelle de l'indice de moisissures M , pour chaque orientation de paroi.

3. SIMULATION HYGROTHERMIQUE DU CENTRE-VILLE HISTORIQUE DE CAHORS

Une simulation hygrothermique du centre-ville médiéval de Cahors est effectuée en utilisant le modèle de climat urbain TEB. L'objectif de cette simulation est double : vérifier la fiabilité du modèle pour représenter les centres historiques et évaluer l'impact de la version modifiée de TEB.

3.1. CAS D'ETUDE

Cette étude se concentre sur le centre-ville médiéval de Cahors, qui se caractérise par une forme urbaine complexe et dense. De plus, ce quartier est soumis à des contraintes de conservation du patrimoine lors de la rénovation. Notons également qu'une grande partie des logements de ce quartier sont vacants. Face à ces constats, le projet ENERPAT est né, dans le but de promouvoir une rénovation durable des parois anciennes, ainsi que de revitaliser le centre-ville (Claude 2018). Au cours de ce projet, une paroi en briques anciennes a été rénovée à partir d'un isolant biosourcé à base de chaux-chanvre (Figure 2). Pour évaluer l'impact de cette rénovation, une instrumentation de longue durée a été mise en place. Elle consiste à enregistrer les conditions hygrothermiques en plusieurs points de la paroi, ainsi que dans la pièce adjacente (Figure 2). Une station météorologique a aussi été installée sur un toit, proche du bâtiment instrumenté, dans le but d'enregistrer les conditions climatiques locales.

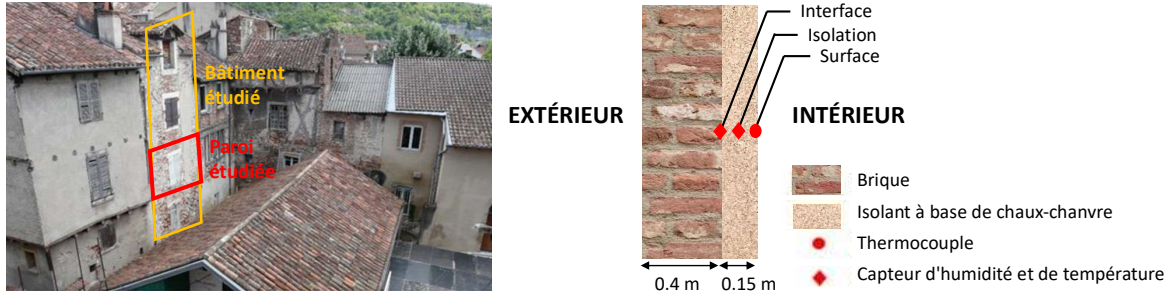


Figure 2 : Localisation du bâtiment étudié (à gauche) et composition de la paroi instrumentée (à droite)

3.2. CONFIGURATION DE TEB

La prochaine étape consiste à configurer le centre-ville ancien de Cahors dans TEB. Les paramètres pour décrire la forme urbaine de Cahors sont définis à partir des indicateurs calculés par Claude (2018) et les deux orientations principales de rue du quartier (nord-sud et est-ouest) sont simulés séparément. Le coefficient RAF, qui traduit l'exposition des parois à la pluie, est fixé à 0,2. Le forçage météorologique appliqué au-dessus du canyon est défini à partir des données mesurées par la station localisée sur un toit dans le quartier. La configuration des bâtiments dans TEB est effectuée à partir des caractéristiques du bâtiment instrumenté. Les bâtiments ont déjà subi une première rénovation, incluant l'isolation du toit, l'installation de double vitrage et une réduction de la perméabilité à l'air. La paroi se compose de briques massives isolées par l'intérieur à partir d'un mélange de chaux/chanvre. Les propriétés hygrothermiques de ces matériaux sont définies à partir de la caractérisation effectuée par Claude (2018). Les bâtiments sont supposés inoccupés : les volets toujours fermés, aucun gain interne, pas de système de climatisation, ni de ventilation. Le chauffage est configuré pour être allumé durant les mêmes périodes dans la simulation et dans le bâtiment réel, avec une consigne à 19°C. Un débit d'infiltration d'air à travers l'enveloppe est fixé à 4 vol/h à 50 Pa.

3.3. CRITERES DE VALIDATION

Le modèle TEB est évalué par comparaison des mesures, en suivant les recommandations de Huerto-Cardenas et al. (2020). L'étape de comparaison s'étend du 17 juin 2021 au 1^{er} janvier 2022 (soit plus de six mois). Les températures et humidités relatives simulées sont comparées aux données mesurées, au niveau des points instrumentés (Figure 2). Une interpolation linéaire est effectuée si nécessaire. Les indices utilisés sont l'Erreur Absolue Moyenne (*EAM*) qui permet de quantifier l'écart et le coefficient de Pearson (*r*) qui traduit la corrélation entre les données simulées et mesurées :

$$EAM = \frac{\sum_{i=1}^n |m_i - s_i|}{n} \quad (5)$$

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (m_i - \bar{m}) \times (s_i - \bar{s})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (m_i - \bar{m})^2} \times \sqrt{\sum_{i=1}^n (s_i - \bar{s})^2}} \quad (6)$$

Avec m_i la valeur mesurée à l'instant i , s_i la valeur simulée à l'instant i et n le nombre de pas de temps étudié.

Deux niveaux de validation sont distingués, en fonction de la précision obtenue. Les valeurs seuils fixées sont extraites de recommandations (Huerto-Cardenas et al. 2020) et détaillées dans le Tableau 1.

	Niveau 1	Niveau 2
<i>EAM</i> (Erreur Absolue Moyenne)	≤ 1 °C	≤ 2 °C
	≤ 5 %HR	≤ 10 %HR
<i>r</i> (Coefficient de Pearson)	> 0,8	> 0,8

Tableau 1 : Valeurs seuils pour les deux niveaux de validation (Huerto-Cardenas et al. 2020)

3.4. COMPORTEMENT HYGROTHERMIQUE DU BATIMENT ANCIEN

Les indicateurs d'erreur (EAM et coefficient de Pearson) sont calculés pour les trois points de la paroi étudiés et dans la pièce adjacente (Tableau 2). Les deux versions de TEB fournissent des résultats satisfaisants dans tous les cas, puisque les critères de validation sont toujours respectés. Le modèle semble donc capable de représenter le comportement des bâtiments anciens et de leurs parois.

Les deux versions de TEB conduisent à des indicateurs similaires concernant l'erreur effectuée sur la température en un même point, ce qui montre que les transferts hydriques à travers les parois ont peu d'impact sur la température (au sein de la paroi et de la pièce), dans la configuration étudiée.

Seule la version enrichie de TEB permet d'évaluer l'évolution de l'humidité relative dans la paroi. Les résultats obtenus à l'interface brique/isolant et au milieu de l'isolant conduisent à une validation de niveau 1 (le plus précis). Leur comportement est donc bien représenté et le modèle TEB pourra être utilisé pour estimer le risque de croissance de moisissures. Concernant l'humidité relative intérieure, la validation est de niveau 1 pour la version considérant les transferts d'humidité à travers les parois, tandis qu'elle est seulement de niveau 2 pour la version de TEB les négligeant (Tableau 2).

			Température	Humidité relative
INTERFACE	EAM	TEB avant modification	1,24 °C	non applicable
		TEB après modification	1,18 °C	2,92 %
	Coefficient de Pearson (r)	TEB avant modification	0,992	non applicable
		TEB après modification	0,992	0,823
ISOLANT	EAM	TEB avant modification	1,07 °C	non applicable
		TEB après modification	0,82 °C	1,22 %
	Coefficient de Pearson (r)	TEB avant modification	0,989	non applicable
		TEB après modification	0,987	0,923
SURFACE	EAM	TEB avant modification	0,41 °C	non applicable
		TEB après modification	0,53 °C	non applicable
	Coefficient de Pearson (r)	TEB avant modification	0,992	non applicable
		TEB après modification	0,989	non applicable
INTERIEUR	EAM	TEB avant modification	0,54 °C	6,74 %
		TEB après modification	0,73 °C	4,43 %
	Coefficient de Pearson (r)	TEB avant modification	0,992	0,878
		TEB après modification	0,990	0,967

Tableau 2 : Récapitulatif des indicateurs d'erreur calculés pour tous les points de comparaison

La Figure 3 présente l'évolution temporelle des résultats simulés et des mesures dans la pièce étudiée. Un accord satisfaisant entre la température intérieure simulée et mesurée est observé. Notons qu'une évolution différente des températures simulées et mesurées est observée lorsque le chauffage est activé. Ceci s'explique facilement par le fait que TEB simule une régulation parfaite du chauffage, tandis qu'en conditions réelles, la température intérieure fluctue autour de la température de consigne.

Concernant l'humidité relative, les deux versions de TEB fournissent des résultats très différents (Figure 3). Négliger les transferts d'humidité à travers les parois mène à des valeurs incohérentes d'humidité relative, puisqu'elle dépasse parfois 100%. Dans ce type de cas, de la condensation devrait avoir lieu, mais TEB ne modélise pas la condensation à l'intérieur du bâtiment. La version de TEB considérant les transferts hydriques à travers les parois fournit des résultats qui sont plus proches des valeurs mesurées sur site. En effet, les variations sont plus faibles et les pics d'humidité relative sont réduits, ce qui s'explique par la prise en compte de la capacité de tampon hydrique du chaux-chanvre.

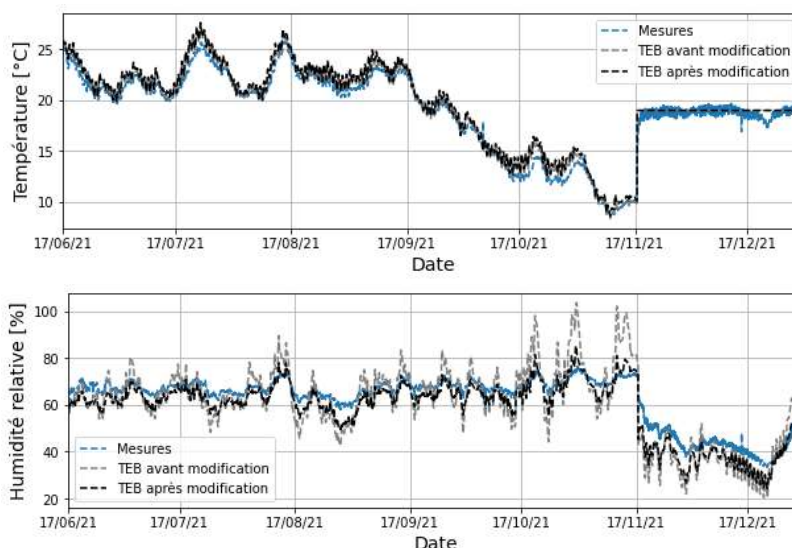


Figure 3 : Évolution temporelle de la température (en haut) et de l'humidité relative (en bas) simulées et mesurées dans la pièce étudiée du 17 juin 2021 au 1^{er} janvier 2022

3.5. IMPACT A L'ECHELLE URBAINE

Une étude a également été effectuée pour évaluer le potentiel de rafraîchissement par évaporation à la suite d'un évènement de pluie, en prenant l'exemple de l'été 2021. La comparaison des deux versions de TEB, avec et sans transfert d'humidité à travers les parois, permet d'estimer l'impact de ce phénomène sur les conditions dans le canyon urbain. Une diminution de la température de surface de la paroi face au vent, allant jusqu'à 2°C, a été observée. Néanmoins, les écarts constatés sont inférieurs à 0,05 °C pour la température du canyon, 0,1 °C pour l'UTCI et 0,25 °C pour la température radiative moyenne. La conclusion est donc que le rafraîchissement par évaporation a un impact négligeable sur le confort des piétons, dans le contexte du centre-ville étudié, qui se compose de rues très étroites.

L'impact des transferts d'humidité à travers les parois a également été évalué sur les flux échangés entre le canyon urbain et l'atmosphère. De faibles écarts ont été observés concernant les flux sensibles et radiatifs. En revanche, lorsque la pluie absorbée par les parois s'évapore, le flux latent simulé à partir de la version modifiée de TEB est plus élevé que celui simulé par la version non modifiée (jusqu'à 80 W/m² supplémentaires). Sur l'ensemble de la période simulée, le flux latent au niveau de la paroi correspond en moyenne à 18,5% du flux latent total échangé entre les surfaces urbaines et l'atmosphère, alors que les flux latents au niveau du toit et du sol représentent respectivement 49% et 32,5%. Les parois constituent donc une part non négligeable du bilan hydrique du canyon, qu'il est important de considérer pour simuler correctement les mécanismes de la répartition de l'humidité en milieu urbain.

4. CONCLUSION

Les transferts hygrothermiques ont été implémentés dans le modèle de climat urbain TEB. Pour cela, des modifications ont dû être effectuées au niveau des équations, des données d'entrée pour la définition des matériaux, du calcul des conditions aux limites et de la répartition de la pluie dans le canyon. Un modèle évaluant le risque de croissance de moisissures a également été intégré dans TEB.

Le centre-ville médiéval de Cahors a été simulé avec TEB, dans un double objectif : la validation par comparaison avec des données expérimentales et l'évaluation de l'impact des transferts hydriques à travers les parois. La comparaison des résultats simulés avec les données mesurées à Cahors a permis

de valider la méthode, les hypothèses, la définition des matériaux, des bâtiments et du quartier. Quasi aucun impact, des transferts hydriques à travers les parois, n'a été constaté sur les températures que ce soit dans la paroi, à l'intérieur du bâtiment ou dans le canyon urbain. De même, aucune modification significative n'a été notée sur le confort thermique extérieur. En revanche, l'intégration des transferts d'humidité à travers les parois améliore considérablement l'estimation de l'humidité relative intérieure, en considérant la capacité de tampon hydrique des matériaux. Néanmoins, ces résultats sont uniquement valables dans le contexte spécifique de cette étude : des bâtiments inoccupés dans des rues très étroites.

La version de TEB enrichie est un outil adapté pour étudier la rénovation des bâtiments du centre-ville médiéval de Cahors, au travers d'une évaluation multicritère, incluant les consommations énergétiques, le confort intérieur et extérieur, ainsi que la durabilité des parois.

5. BIBLIOGRAPHIE

- Bueno, B., G. Pigeon, L. K. Norford, K. Zibouche, et C. Marchadier. 2012. « Development and Evaluation of a Building Energy Model Integrated in the TEB Scheme ». *Geoscientific Model Development* 5 (2): 433-48. <https://doi.org/10.5194/gmd-5-433-2012>.
- Claude, Sophie. 2018. « Étude expérimentale et numérique de solutions basées sur les éco-matériaux pour la rénovation thermique du patrimoine bâti urbain ». PhD Thesis, INSA de Toulouse.
- Gasparin, Suelen, Julien Berger, et Nathan Mendes. 2019. « An innovative method to determine optimum insulation thickness based on non-uniform adaptive moving grid ». *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering* 41 (mars). <https://doi.org/10.1007/s40430-019-1670-6>.
- Grunewald, John. 1997. « Diffusiver und konvektiver Stoff- und Energietransport in kapillarporösen Baustoffen ».
- Huerto-Cardenas, H. E., F. Leonforte, N. Aste, C. Del Pero, G. Evola, V. Costanzo, et E. Lucchi. 2020. « Validation of Dynamic Hygrothermal Simulation Models for Historical Buildings: State of the Art, Research Challenges and Recommendations ». *Building and Environment* 180 (août): 107081. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107081>.
- Maalouf, C., A. D. Tran Le, S. B. Umurigirwa, M. Lachi, et O. Douzane. 2014. « Study of Hygrothermal Behaviour of a Hemp Concrete Building Envelope under Summer Conditions in France ». *Energy and Buildings* 77 (juillet): 48-57. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.03.040>.
- Masson, Valéry. 2000. « A Physically-Based Scheme For The Urban Energy Budget In Atmospheric Models ». *Boundary-Layer Meteorology* 94 (3): 357-97. <https://doi.org/10.1023/A:1002463829265>.
- Ruiz, Margot, Valéry Masson, Marion Bonhomme, et Stéphane Ginestet. 2023. « Numerical Method for Solving Coupled Heat and Mass Transfer through Walls for Future Integration into an Urban Climate Model ». *Building and Environment* 231 (mars): 110028. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110028>.
- Saneinejad, Saba, Peter Moonen, Thijs Defraeye, Dominique Derome, et Jan Carmeliet. 2012. « Coupled CFD, Radiation and Porous Media Transport Model for Evaluating Evaporative Cooling in an Urban Environment ». *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 104-106 (mai): 455-63. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2012.02.006>.
- Straube, John, et E. Burnett. 2000. « Simplified prediction of driving rain deposition ».
- Vereecken, Evy, Kristof Vanoirbeek, et Staf Roels. 2015. « Towards a More Thoughtful Use of Mould Prediction Models: A Critical View on Experimental Mould Growth Research ». *Journal of Building Physics* 39 (2): 102-23. <https://doi.org/10.1177/1744259115588718>.

Facing Wind-Driven Rain : Forecasting Fare System Resilience through Épône Train Station's Example

Alexis Sauvageon^{1,*}

¹AREP

16 Avenue d'Ivry - 75013 Paris

*alexis.sauvageon@arep.fr

RÉSUMÉ. Cet article présente une méthode innovante pour évaluer l'exposition des environnements urbains à la pluie battante, illustrée par le cas de la gare d'Épône et de son système de billetterie automatique de nouvelle génération. Ces systèmes, essentiels à l'opérationnalité de la gare, sont susceptibles de subir des défaillances dues à l'action conjointe de la pluie et du vent. Des abris sont spécifiquement conçus pour les protéger de ces aléas climatiques. En exploitant près de deux décennies de données météorologiques, obtenues grâce au modèle WRF-ARW, notre démarche intègre des solutions numériques avancées pour réduire le besoin en simulations CFD lors de l'analyse du transport de gouttelettes. Par le biais de techniques de réduction de modèle et d'interpolation, nous évaluons la performance des abris actuels et formulons des recommandations visant à améliorer leur protection. Ce travail démontre comment notre indicateur contribue à la conception de systèmes plus résilients, renforçant ainsi la durabilité des infrastructures urbaines face à la pluie battante.

MOTS-CLÉS. pluie entraînée par le vent, réduction de modèles, adaptation climatique

ABSTRACT. This paper introduces a new method for assessing the impact of wind-driven rain on urban environments, with a focus on the Épône Train Station and its next-generation automatic fare collection system. These critical systems face potential operational failures from the combined effects of wind and rain. To mitigate these risks, specific shelters have been designed for their protection. Using almost two decades of meteorological data from the WRF-ARW model, our approach employs advanced numerical techniques to reduce the dependence on the resource-intensive CFD simulations typically used for droplet transport analysis. By applying model reduction and interpolation methods, we evaluate the shelters' performance and suggest improvements to their protective features. This study showcases how our innovative indicator can assist in designing more robust systems, thereby enhancing the resilience of urban infrastructure to wind-driven rain.

KEYWORDS. wind-driven rain, model reduction, climate resilience

1. INTRODUCTION

Wind-driven rain (WDR) refers to the phenomenon where wind modifies the trajectory of raindrops, giving them a horizontal component. This alteration in path due to complex airflow patterns around buildings often leads to uneven wetting of facades and can expose areas that were previously sheltered, as highlighted by Blocken (Blocken and Carmeliet, 2004).

The effects of WDR are not limited to the immediate wetting of surfaces; they extend to causing a spectrum of water-related damages. These include dampness, leaks, and, in more severe cases, flooding, all of which play a significant role in the degradation of walls and roofing structures (de Abreu et al., 2020; Pérez-Bella et al., 2013). Additionally, WDR poses a risk to the preservation of historical monuments, as it accelerates stone corrosion. This deterioration is further exacerbated by the combined presence of atmospheric pollutants and rainwater (Winkler, 1966; Camuffo et al., 1999; Traversetti et al., 2018). With climate change on the rise, there is

an expected increase in freeze-thaw damage and wood decay, especially in the colder climates of northern Europe (Vandemeulebroucke et al., 2023). Rainfall-induced thermal and moisture gradients can also lead to structural cracking (Ślusarek and Łupieżowiec, 2020). Furthermore, the leaching of dissolved salts can discolor building materials (Granneman et al., 2019), while the physical impact and subsequent runoff of rainwater can dirty facades, thereby increasing the need for maintenance (Blocken et al., 2013).

Addressing the challenges posed by wind-driven rain is critical for infrastructure exposed to the elements, such as train stations. Effective protective measures, encompassing strategic architectural designs like canopies, are imperative to ensure the safety of occupants, maintain equipment functionality, and minimize disruptions. These strategies serve not only to prevent immediate damage but also to reduce the costs associated with repairs and maintenance (Blocken and Carmeliet, 2004). This highlights the significance of evaluating the performance of sheltering solutions in relation to the specific conditions of the site.

Against the backdrop of these considerations, the French National Railway Company (SNCF) is currently undertaking a significant modernization program of its ticketing system. As part of this initiative, SNCF is deploying next-generation automatic fare collection systems (MT Cabs) throughout the Île-de-France region's train stations. These systems feature enclosures rated IP54, indicating resistance to water splashes, while the slots for reading magnetic tickets carry an IP53 rating, making them susceptible to failure when exposed to raindrops falling at angles exceeding 60° relative to the vertical axis.

The Épône-Mezières station is a representative case within the Île-de-France modernization program, featuring four access points designated for upgrades, including shelter installations assessed by an innovative, validated methodology (Sauvageon, 2024). The presentation will begin with a detailed description of the station, emphasizing its environmental context and prevailing weather conditions. This will be followed by a concise overview of the modeling assumptions and the employed methodology. The discussion will then focus on analyzing the results obtained from the numerical tools, concluding with an exploration of potential enhancements for the shelters, based on the findings.

2. ENVIRONMENTAL CONTEXT

2.1. ÉPÔNE-MEZIÈRES STATION OVERVIEW

The Épône-Mézières station, situated at 48°57'48" North latitude and 1°48'31" East longitude in the Île-de-France region, serves the towns of Épône and Mézières-sur-Seine. Located amidst predominantly rural landscapes dedicated to agricultural activities, the station is an essential node on both Line J and N of the Transilien network and the future RER E extension establishing itself as a crucial interchange in the Yvelines department. The station's infrastructure comprises four tracks and three platforms.

To enhance accessibility, the station integrates facilities aimed at assisting individuals with reduced mobility. Additionally, it is equipped with four access points, labeled as E1 through E4 as depicted in figure 1. Access points E1 and E4 are positioned on the southern side of the railway lines, while E3 is located on the northern side. Access to E2 is facilitated uniquely via a footbridge spanning the railway lines to the station's west. As part of the SNCF ticket modernization program, the station has deployed the new MT cabs system at each access point, accompanied by the construction of shelters intended to protect the equipment from rain. The shelters, standing approximately 3.72 meters in height, vary in their in-plane dimensions based

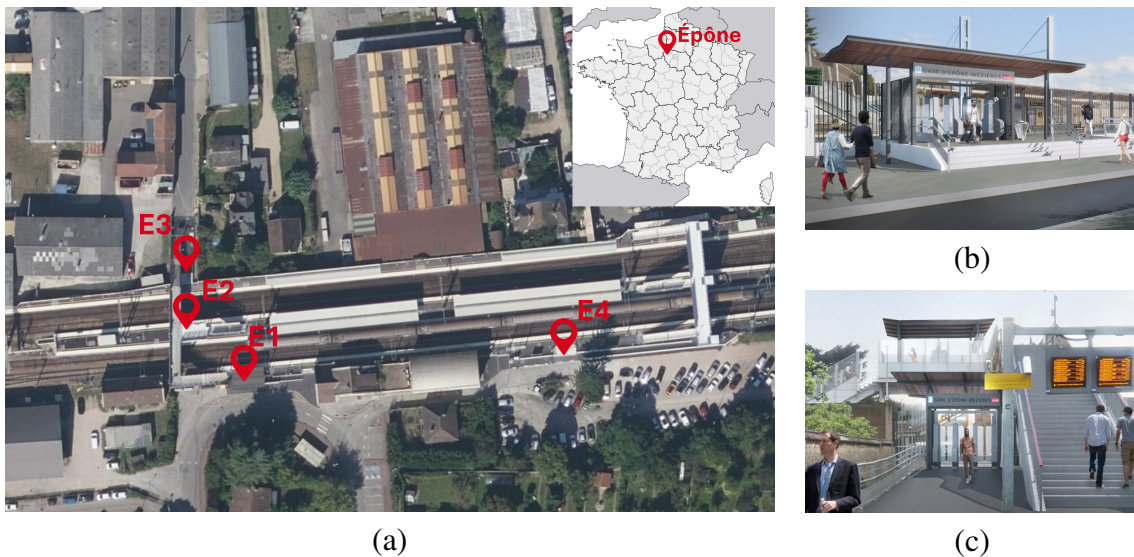


Figure 1 : Épône station bird's eye view (a) and future access points E1 (b), E2 et E3 (c)

on the number of MT cabs they encompass, aiming for a clearance of about 2 meters from the cabs. An exception is noted at access E2, where the shelter extends only 0.6 meters due to the proximity of overhead catenary systems, which restrict further expansion.

2.2. WEATHER CONDITIONS

The Épône site experiences weather influenced by the oceanic climate. A dataset spanning 18 years of hourly data was generated using WRF (Skamarock et al., 2019), based on Copernicus 6-hour ERA 5 data (Hersbach et al., 2020) for boundary conditions. Temporal downscaling was then implemented using stochastic algorithms as described in (Paschalis et al., 2014; Arenas-López and Badaoui, 2020) to capture short-duration phenomena such as 5-minute gusts for winds and 5-minute showers for rain. Figure 2 illustrates the resulting weather data. Specifi-

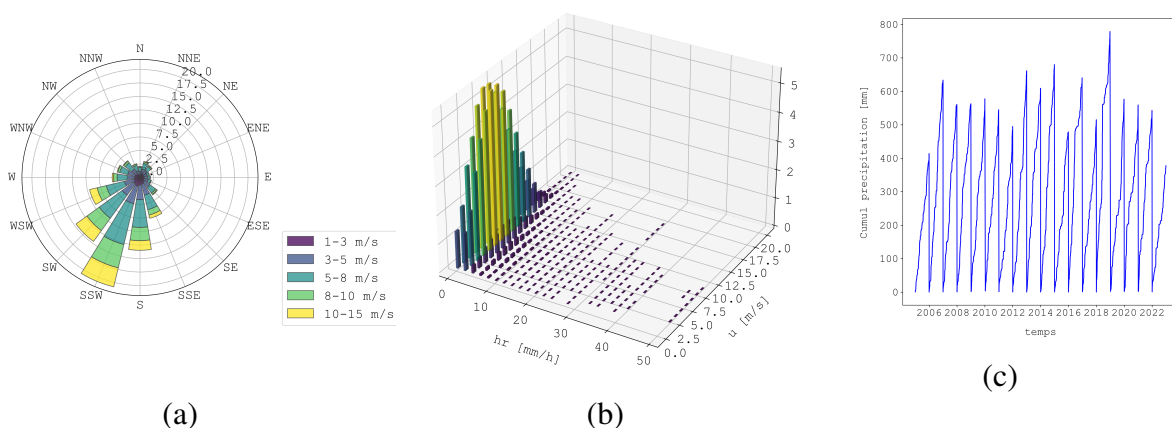


Figure 2 : Épône station wclimatic data : wind-driven rain rose (a) wind-driven rain occurrences (b) and cumulated rainfall (c)

cally, figure 2a depicts the wind rose during rain events (rainfall rate > 1 mm/h). The diagram highlights prevailing winds originating from directions ranging from South to West, with rain

primarily coming from the Atlantic coast. Notably, the majority of wind-driven rain occurs at lower wind speeds, with the most significant segments of the rose corresponding to wind speeds in the range of 1-3 m/s and 3-5 m/s. This observation is further supported by the occurrence probability of coupled wind & rain scenarios depicted in figure 2b, indicating that scenarios with light rain (< 3 mm/h) and low to moderate wind are the most frequent. However, it's worth noting the existence of extreme weather scenarios with winds exceeding 15 m/s and/or rainfall rates exceeding 20 mm/h, albeit for brief periods.

Figure 2c illustrate that annual cumulative rainfall generally ranges around 600 mm, with drier years receiving approximately 400 mm and wetter years experiencing up to 800 mm annually. In typical years, rainfall tends to be more significant during spring and fall, while summers are relatively drier. Extreme rainfall events, as observed previously, are brief and infrequent but occur regularly throughout the period under consideration.

3. ANALYTICAL FRAMEWORK

3.1. ASSUMPTIONS FOR SIMULATION

For the simulation of the site, several components are modeled to ensure an accurate representation (see figure 3). This includes the station building itself, along with the platforms, platform shelters, footbridges, and the surrounding urban environment within a radius of 450 meters from the station. However, certain elements are intentionally omitted from the model, such as the interior volumes of the station and minor objects like trash bins and benches, whose impact on airflow near access points E1 to E4 is deemed insignificant according to established best practices (Blocken et al., 2012). The mesh resolution employed in the simulation is finely tuned to capture small details, with an average spacing of 30 cm in the air, 10 cm for buildings, and as low as 2 cm for features like cabs and fences.

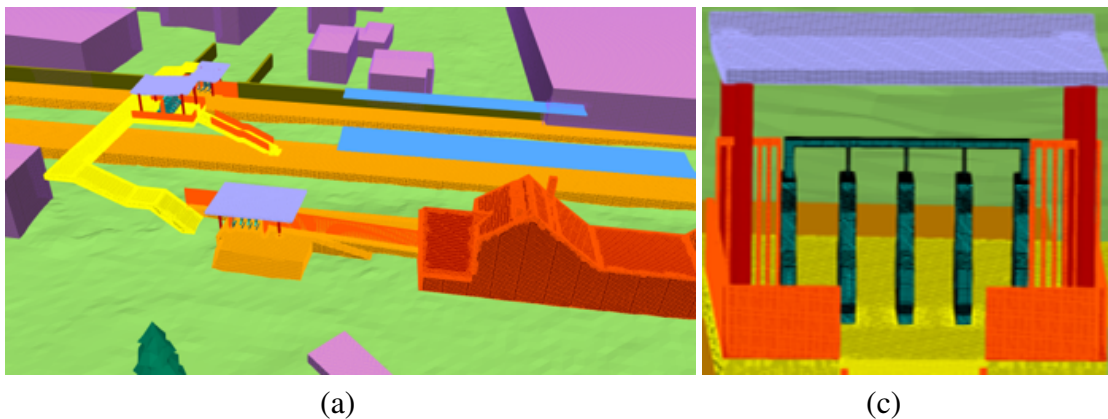


Figure 3 : Mesh details : Station vicinity (a), Access point E2 detail (b)

The CFD simulations lie on the Reynolds-Averaged Navier-Stokes approach with the realizable k-epsilon turbulence model. Atmospheric boundary layer conditions are set at the inlet, and transport simulations are conducted using a slightly modified (Sauvageon, 2024) version of windDrivenRainFoam. Originally developed and validated by (Kubilay et al., 2014), this Eulerian multiphase solver is also tailored to incorporate the dispersion of raindrops within turbulent flows (Kubilay et al., 2015).

3.2. EVALUATING WDR IMPACT

To construct the long-term rainfall exposure indicator, several methodological steps are undertaken as described in (Sauvageon, 2023; Sauvageon, 2024). Firstly, the modeled scenarios are identified. This involves selecting at least 12 wind directions with median wind velocities for aerologic simulation and 35 wind speed and rain intensity scenarios for the transport model. These scenarios are chosen randomly using Latin Hypercube Sampling mixed with clustering to ensure comprehensive coverage of possible scenarios for each wind direction. Once the scenarios are identified, wind-driven rain intensities are computed for the simulated scenarios.

Next, Principal Orthogonal Decomposition (POD) is used to reduce all the data to a set of coefficients and modes, denoted as a_k and ϕ_k respectively. The relationship between wind-driven intensities r_{wdr} and these quantities is given by Equation (1).

$$r_{\text{wdr}}(X, r_h, U) = \sum_{k=1}^{\infty} a_k(r_h, U) \phi_k(X) \quad (1)$$

These coefficients a_k are determined as functions of meteorological rain intensity r_h and wind speed U , offering an advantage in interpolation over regular wind-driven rain intensity maps due to their regularity (Sauvageon, 2024).

For scenarios that are not directly modeled, interpolation is performed using a Bezier polynomial algorithm on the POD coefficients. These interpolated maps are then aggregated into a single indicator using equation (2), which takes into account the occurrence probability of each wind-driven rain scenario P_{U, r_h}^i , considering the direction of the wind origin with probability P_{θ}^i .

$$P(r_{\text{wdr}} > r_s) = \sum_i P_{\theta}^i \cdot \sum_U \sum_{r_h} P_{U, r_h}^i \cdot \mathcal{J}_{U, r_h}^i(\Omega, r_s) \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \mathcal{J}_{U, r_h}^i(\Omega, r_s) : \Omega \times \mathbb{R} &\longrightarrow \{0, 1\} \\ (x, y, r_s) &\longmapsto \mathcal{J}_{U, r_h}^i(x, y, r_s) = \begin{cases} 1 & \text{if } r_{\text{wdr}}(x, y) \geq r_s \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \end{aligned} \quad (3)$$

Where $\mathcal{J}_{U, r_h}^i(\Omega, r_s)$ represents the characteristic function for a WDR scenario associated with wind direction θ_i , as defined by equation (3), and r_s denotes a rain intensity threshold above which precipitation is considered to occur. For the Épône case, a threshold value of $r_s = 1$, mm/h is used.

4. ASSESSING WDR IMPACT ON MT CABS

4.1. SHELTER EFFICACY ANALYSIS

The indicator expressed in equation (2) offers a comprehensive understanding of the rainfall exposure at the Épône site. At its extremes, it signifies 0% as a zone protected under all circumstances and 100% as an area wet whenever it rains. For any value in between, it indicates the proportion of time the zone remains wet during rainy periods over a representative year.

For access points E1, E3, and E4, sharing a similar configuration, their behavior aligns closely as depicted in figure 4. These points demonstrate exposure to rain between 5% and 10% of the total rainy time annually, approximately translating to 24 hours of exposure per year, considering about 240 annual cumulated rainy hours with intensities exceeding 1 mm/h. Consequently, the shelters provide protection during 90% of rain episodes, suggesting effective design

and fulfillment of their protective role. The annual water quantity received can be derived from the exposure indicator (Sauvageon, 2024), revealing a cumulative annual precipitation of around 50 mm.

In contrast, access point E2, situated on the footbridge, exhibits significantly higher exposure to rainfall, approximately 48% of the time (see Figure 4). These access points accumulate an average of 160 mm of cumulative precipitation annually, with MT cabs shielded only 52% of the time. This heightened exposure underscores the necessity for shelter improvements to enhance protection, as initial designs appear insufficient in mitigating rainfall impact effectively.

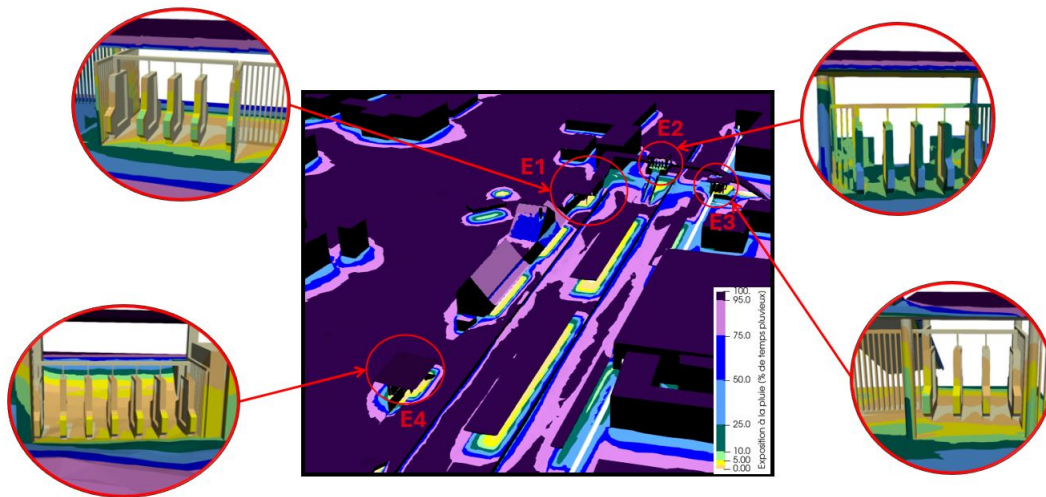


Figure 4 : Quantitative analysis of rainfall exposure at Épône site highlighting key access points

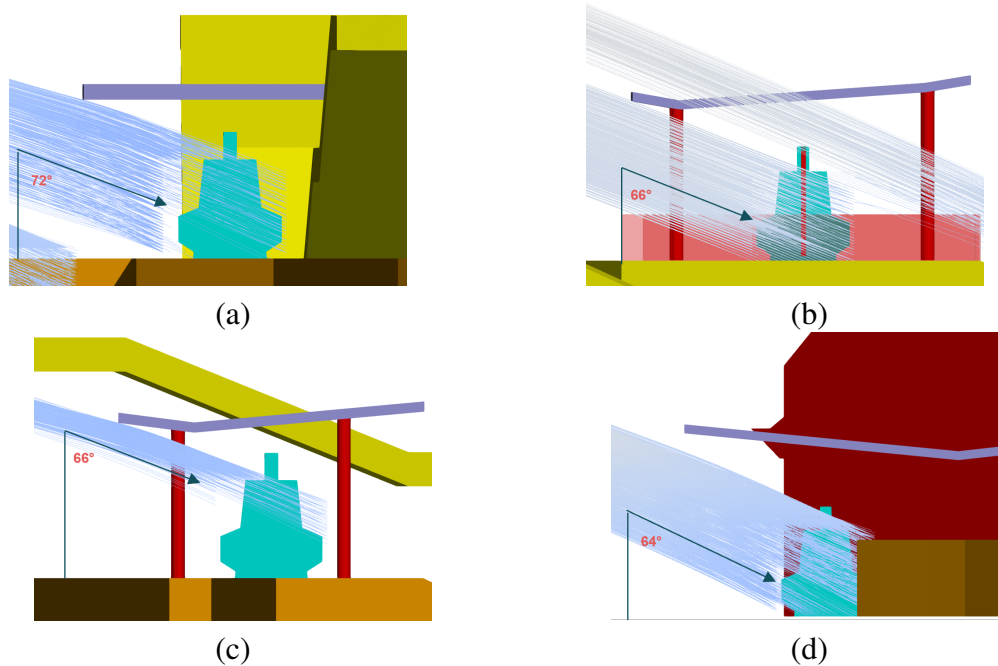


Figure 5 : Raindrop trajectories under varying conditions : E1, E3, E4 with south wind, $U = 20.8 \text{ m/s}$, $r_h = 1 \text{ mm/h}$ and E2 with south wind, $U = 13.8 \text{ m/s}$, $r_h = 14 \text{ mm/h}$.

4.2. ANALYZING RAINDROP TRAJECTORIES

From 3D results computed by CFD or built using interpolation methods, it is possible to map out the trajectories of raindrops using streamlines. This process facilitates the assessment of the angular deviation of raindrop trajectories from the vertical. Figure 5 demonstrates that for each access point analyzed, there exist extreme weather scenarios where the trajectory angles can exceed 60° to the vertical. These steep angles threaten the functional integrity of MT Cabs due to the sensitivity of the magnetic ticket reader slots to water ingress.

The site-specific velocity effects are quantified as $\psi = \frac{U_{CFD}}{U}$, where U_{CFD} is the wind speed at the vicinity of the MT Cabs and U is the meteorological wind speed. Additionally, when considering rainfall intensities, an idealized trajectory angle θ can be deduced from the relationship $\tan(\theta) = \psi \times \frac{U}{u_s}$. Here, u_s refers to the terminal velocity of the raindrops, which is intrinsically linked to their diameter (Dingle and Lee, 1972). For the purposes of this analysis, the terminal velocity is computed based on the median droplet diameter, which itself is a function of the meteorological rainfall intensity r_h (Best, 1950).

Through this analytical framework, it is estimated that for entry points E1, E3, and E4, approximately 0.6% of annual rain events could engender such trajectories, while for E2, the probability increases to 1.8%. For E1, E3, and E4, MT Cabs are at risk of moisture when meteorological wind speeds U exceed about 5.6 m/s (20 km/h) and are at risk of failure at wind speeds exceeding approximately 13.8 m/s (50 km/h). For E2, the wind speed thresholds for increased vigilance and alert are approximately 3.3 m/s (12 km/h) and 8.9 m/s (32 km/h), respectively.

5. CONCLUSIONS

In this case study of the Epone fare collection system's shelter, we have demonstrated how our theoretical framework can aid engineers and architects in designing structures that are resilient against wind-driven rain (WDR). Specifically, we have shown that shelters E1, E3, and E4 at Epone provide effective protection from the elements 90% of the time. However, the efficacy of the E2 access point shelter is significantly lower, providing adequate shelter only 52% of the time.

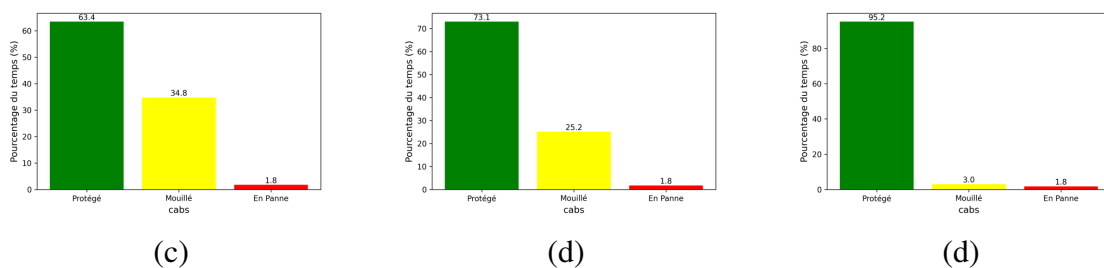


Figure 6 : Impact on E2 rain protection : SOL1 (a), SOL2 (b), combined SOL1 & SOL2 (c)

Given that expanding the E2 shelter's coverage is not feasible due to existing site constraints—such as the presence of catenaries and passageways—two measures may be proposed to enhance its performance : firstly, by filling in the passageway's fencing to partially enclose the MT Cabs, and secondly, by lowering the height of the covering by 70 cm. Figure 6 shows that implementing the first solution (SOL1) could increase protection by 10%, while the second solution (SOL2) alone could lead to a 20% improvement. When combined, SOL1 and SOL2

have the potential to augment the shelter's efficacy to 95%, thereby ensuring highly efficient protection at a minimal cost.

Furthermore, our analysis has identified rare but extreme weather scenarios that could lead to the failure of the MT Cabs due to the trajectories of raindrops. For shelters E1, E3, and E4, such risks occur when winds exceed 50 km/h, which represents only 0.6% of rainy events. In these instances, we recommend the deployment of temporary protective measures, such as tarps, while ensuring free access for customers. Shelter E2, being more vulnerable, should adopt more stringent measures, such as closing access with a metallic curtain when wind speeds exceed 30 km/h, especially during significant rainfall events. Customers could then be redirected to the more secure access points E1, E3, and E4.

The incorporation of these strategies ensures that the station can be operated with confidence, maintaining the reliability and resilience of the new fare collection system against severe weather conditions.

ACKNOWLEDGMENTS

The author extends sincere gratitude to colleagues at AREP and the project manager of Épône Station for their invaluable support and contributions throughout this study.

BIBLIOGRAPHY

- Arenas-López, J. P. and Badaoui, M. (2020). Stochastic modelling of wind speeds based on turbulence intensity. *Renewable Energy*, 155 :10–22.
- Best, A. C. (1950). The size distribution of raindrops. *Quarterly journal of the royal meteorological society*, 76 :16–36.
- Blocken, B. and Carmeliet, J. (2004). A review of wind-driven rain research in building science. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 92 :1079–1130.
- Blocken, B., Derome, D., and Carmeliet, J. (2013). Rainwater runoff from building facades : A review. *Building and Environment*, 60 :339–361.
- Blocken, B., Janssen, W., and van Hooff, T. (2012). Cfd simulation for pedestrian wind comfort and wind safety in urban areas : General decision framework and case study for the eindhoven university campus. *Environmental Modelling & Software*, 30 :15–34.
- Camuffo, D., Sturaro, G., and Valentino, A. (1999). Urban climatology applied to the deterioration of the pisa leaning tower, italy. *Theoretical and applied climatology*, 63 :223–231.
- de Abreu, R. V. S., Pinelli, J.-P., Raji, F., and Zisis, I. (2020). Testing and modeling of hurricane wind-driven rain water ingress, propagation, and subsequent interior damage in residential buildings. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 207 :104427.
- Dingle, A. N. and Lee, Y. (1972). Terminal fallspeeds of raindrops. *Journal of Applied Meteorology (1962-1982)*, pages 877–879.
- Granneman, S. J., Lubelli, B., and van Hees, R. P. (2019). Mitigating salt damage in building materials by the use of crystallization modifiers – a review and outlook. *Journal of Cultural Heritage*, 40 :183–194.
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Abdalla, S., Abellan, X., Balsamo, G., Bechtold, P., Biavati, G., Bidlot, J., Bonavita, M., De Chiara, G., Dahlgren, P., Dee, D., Diamantakis, M., Dragani, R., Flemming, J., Forbes, R., Fuentes, M., Geer, A., Haimberger, L., Healy, S., Hogan, R. J., Hólm, E., Janisková, M., Keeley, S., Laloyaux, P., Lopez, P.,

- Lupu, C., Radnoti, G., de Rosnay, P., Rozum, I., Vamborg, F., Villaume, S., and Thépaut, J.-N. (2020). The era5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146(730) :1999–2049.
- Kubilay, A., Derome, D., Blocken, B., and Carmeliet, J. (2014). Numerical simulations of wind-driven rain on an array of low-rise cubic buildings and validation by field measurements. *Building and environment*, 81 :283–295.
- Kubilay, A., Derome, D., Blocken, B., and Carmeliet, J. (2015). Numerical modeling of turbulent dispersion for wind-driven rain on building facades. *Environmental Fluid Mechanics*, 15 :109–133.
- Paschalis, A., Molnar, P., Fatichi, S., and Burlando, P. (2014). On temporal stochastic modeling of precipitation, nesting models across scales. *Advances in Water Resources*, 63 :152–166.
- Pérez-Bella, J. M., Domínguez-Hernández, J., Rodríguez-Soria, B., del Coz-Díaz, J. J., and Cano-Suñén, E. (2013). Combined use of wind-driven rain and wind pressure to define water penetration risk into building façades : The spanish case. *Building and Environment*, 64 :46–56.
- Sauvageon, A. (2023). Un nouvel indicateur pour évaluer l'exposition d'un bâtiment à la pluie battante. *Academic Journal of Civil Engineering*, 41(1) :127–133.
- Sauvageon, A. (2024). Assessing long-term exposure to wind-driven rain in urban environments : A computational method. *Urban Climate*, 53 :101831.
- Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. O., Liu, Z., Berner, J., and et al. (2019). A description of the advanced research wrf version 4. Ncar technical note, National Center for Atmospheric Research.
- Ślusarek, J. and Łupieżowiec, M. (2020). Analysis of the influence of soil moisture on the stability of a building based on a slope. *Engineering Failure Analysis*, 113.
- Traversetti, L., Bartoli, F., and Caneva, G. (2018). Wind-driven rain as a bioclimatic factor affecting the biological colonization at the archaeological site of pompeii, italy. *International biodeterioration & biodegradation*, 134 :31–38.
- Vandemeulebroucke, I., Kotova, L., Caluwaerts, S., and Van Den Bossche, N. (2023). Degradation of brick masonry walls in europe and the mediterranean : Advantages of a response-based analysis to study climate change. *Building and Environment*, 230 :109963.
- Winkler, E. M. (1966). Important agents of weathering for building and monumental stone. *Engineering Geology*, 1(5) :381–400.

Ventilation naturelle par ouverture de fenêtre : analyse d'incertitude et de sensibilité dynamique du taux de renouvellement d'air dans le cas d'un bâtiment résidentiel.

Cédric Schreck*^{1,2}, Aurélie Foucquier², Simon Rouchier¹, Etienne Wurtz²

¹ Univ Savoie Mont-Blanc, campus Bourget, 73375 Le Bourget du Lac, France

² Univ. Grenoble Alpes, CEA, Liten, campus INES, 73375 Le Bourget du Lac, France

*cedric.schreck@univ-smb.fr

RESUME. La capacité d'un bâtiment ventilé naturellement à maintenir le confort thermique de l'occupant dépend du taux de renouvellement d'air atteignable à travers les ouvrants. Le modéleur peut alors se demander quel est l'impact de l'incertitude des paramètres tels que les coefficients de décharge (Cd) et coefficients de pression (Cp) sur le résultat en renouvellement d'air. Dans cet article, nous simulons la réponse thermo-aérodynamique d'une maison individuelle : deux configurations traversantes et une configuration mono façade sont testées. L'originalité de cet article réside en l'exploration du potentiel de la méthode d'analyse de sensibilité RBD-FAST sur l'étude de la sortie dynamique en renouvellement d'air. Dans notre cas d'étude, les incertitudes de +/-50% dans les coefficients de décharge et dans le choix des coefficients de pression engendrent des incertitudes du même ordre de grandeur sur le taux de renouvellement d'air (jusqu'à +/- 5,6 h⁻¹, soit +/- 46% de la valeur). L'analyse des indices de Sobol et variances partielles mettent en évidence le lien entre sensibilité aux paramètres, et vitesses et directions du vent.

MOTS-CLÉS : Ventilation Naturelle, Analyse de Sensibilité, Sobol

ABSTRACT. The ability of a naturally ventilated building to maintain occupant thermal comfort depends on the achievable air change rate through the openings. Designers may therefore question the impact of parameter uncertainty, such as discharge coefficients (Cd) or pressure coefficients (Cp) on air change rate results. In this article, we simulate the thermo-aerodynamic response of a single-family house: two cross-ventilation configurations and a single facade configuration are tested. The originality of this article lies in exploring the potential of the RBD-FAST sensitivity analysis method for studying dynamic air change rate output. In our case study, uncertainties of +/-50% in discharge coefficients and in the selection of pressure coefficients result in uncertainties of the same magnitude on the air exchange rate (up to +/- 5.6 h⁻¹, or +/- 46% of the value). The analysis of Sobol indices and partial variances highlights the link between parameter sensitivity, wind speeds, and directions.

KEYWORDS : Natural Ventilation, Sensitivity Analysis, Sobol

Ce travail fait partie du projet MODERNAT financé par la région Auvergne Rhône Alpes dans le cadre du Pack Ambition Recherche 2020.

1. INTRODUCTION

Le taux de renouvellement d'air est un paramètre influent sur la qualité de l'air intérieur (Nazaroff 2021) et le confort thermique de l'occupant (Kolokotroni et Heiselberg 2015). Dans le contexte de réduction de la consommation énergétique, la ventilation naturelle par ouverture de fenêtre est une solution passive, permettant par exemple de réduire le besoin de rafraîchissement en été. Or, l'efficacité d'un tel système sur un bâtiment donné dépend des valeurs de renouvellement d'air atteignables à travers les ouvrants. La littérature montre qu'il y a une forte variabilité des renouvellements d'air par ouverture

de fenêtre. Elle est fonction des conditions météo (écarts de températures entre intérieur et extérieur, vitesse et direction du vent), et des paramètres liés au bâtiment : la configuration (traversante ou mono façade), les coefficients de décharge (C_d) qui représentent la résistance à l'air des fenêtres et les coefficients de pression (C_p) qui représentent l'impact du vent sur les façades (Kolokotroni et Heiselberg 2015).

Le modéleur qui cherche à estimer les renouvellements d'air via la simulation thermique dynamique (STD) peut souhaiter quantifier l'incertitude sur le résultat (analyse d'incertitude) et la contribution de tel ou tel paramètre sur cette incertitude (analyse de sensibilité). La littérature présente des résultats variables en fonction du cas étudié, du choix des paramètres d'entrée, de leur plage de variation, et des sorties analysées. Dans le cas d'un bâtiment résidentiel, (Monari et Strachan 2017) ont observé que ce sont les variations des C_p qui permettent la meilleure adéquation entre les résultats du réseau aéraulique et les mesures expérimentales. Au contraire, l'analyse d'incertitude réalisée dans (Hyun, Park, et Augenbroe 2008) a montré un impact négligeable de l'incertitude des C_p par rapport aux autres paramètres tels que les C_d et profils de vent. (Belleri et al. 2013) précisent que les C_p deviennent prévalant sur les C_d pour des vitesses de vent élevées.

Dans cet article, nous proposons de contribuer à la littérature existante par la réalisation d'une analyse numérique d'incertitude et de sensibilité de la sortie dynamique de renouvellement d'air en STD en fonction des C_d et C_p . Comme nous souhaitons quantifier l'impact des paramètres, il convient d'utiliser une méthode globale et quantitative. La méthode de décomposition de la variance RBD-FAST (Goffart et Woloszyn 2021) a démontré sa capacité à estimer les indices de sensibilités de Sobol de premier ordre S_1 , pour un nombre de simulation et un temps de calcul raisonnable. Par exemple, en énergétique du bâtiment, elle a été principalement appliquée à l'analyse de la sensibilité des température dynamique (Gondian et al. 2018). A notre connaissance, aucune étude ne propose l'analyse des indices de Sobol pour la sortie en renouvellement d'air dynamique.

L'originalité de cet article réside en l'exploration du potentiel de la méthode d'analyse de sensibilité RBD-FAST sur l'étude de la sortie dynamique de renouvellement d'air. Des dépouillements spécifiques sont présentés afin de mettre en évidence l'impact du vent.

2. METHODOLOGIE

2.1. MODELE STD DE LA MAISON INCAS

La maison INCAS (Figure 1) est un bâtiment résidentiel en R+1 construit en 2010 selon des standards passifs. Elle est située sur la plateforme expérimentale de l'INES au Bourget du Lac, France. Elle a été modélisée sur le logiciel EnergyPlus (Crawley et al. 2001). Le réseau aéraulique comporte un nœud par pièce. Les nœuds étant connectés entre eux et avec l'extérieur via diverses interfaces (Figure 1). Le bilan de flux thermique et l'équilibre en débit/pression sont calculés à chaque pas de temps de simulation, fixé à 5 minutes. Aux interfaces fenêtres « grandes ouvertures », l'équilibre dépend du C_d : $Q_v = C_d A \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}}$, avec Q_v le débit [m^3/h], ΔP [Pa] le différentiel de pression, A [m^2] la section de passage et ρ [kg/m^3] la densité de l'air. L'augmentation de pression liée au vent sur un nœud dépend du C_p : $P = \frac{1}{2} \rho C_p V^2$, avec V [m/s] la vitesse du vent (Kolokotroni et Heiselberg 2015). La valeur de C_p est déterminée par une loi empirique, en fonction de la direction d'incidence du vent.

Des valeurs nominales sont renseignées pour les paramètres du bâtiment (propriété thermiques des matériaux, des vitrages, des volets, ponts thermiques, étanchéité à l'air), et de son environnement (albédo et températures du sol, faible densité urbaine).

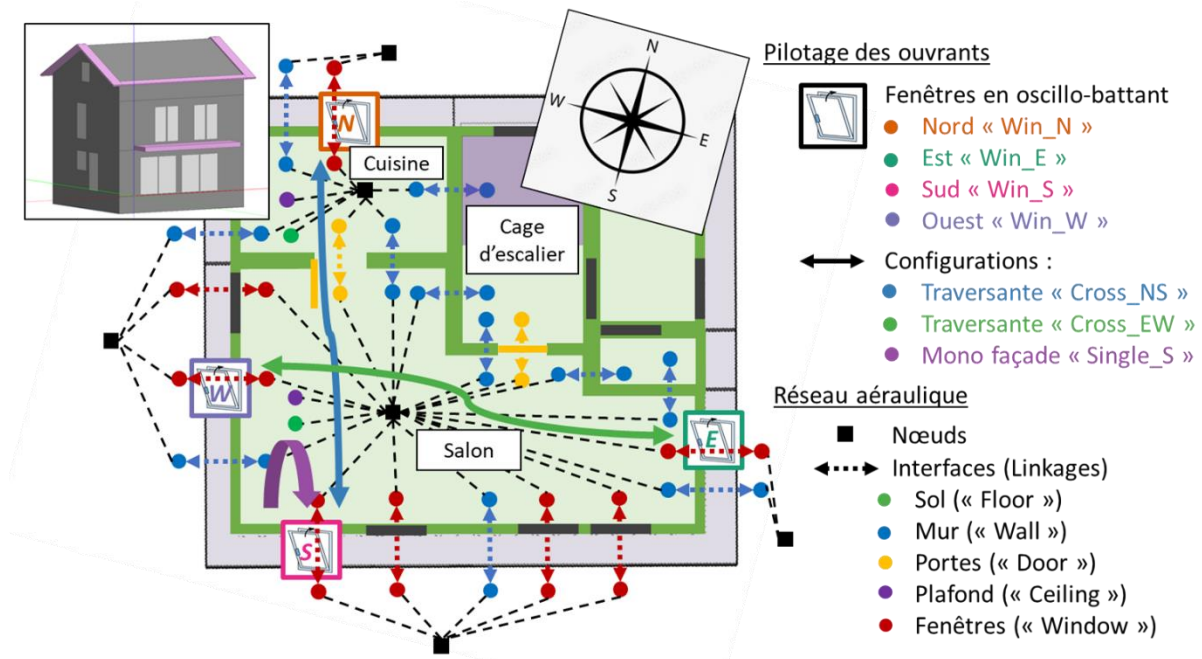


Figure 1 : STD : Configurations d'ouvrant et modèle aéraulique

2.2. CONDITIONS LIMITES DE LA STD

Les conditions limites de la STD reprennent les scénarios réalisés dans une campagne expérimentale avec résultats en accès libre (Schreck et al. 2024), sur la semaine estivale du 22/06/2023 au 29/06/2023. Les conditions limites météorologiques (températures, humidités, irradiances solaires, vitesses et directions) sont mesurées localement à environ 50 m de la maison et à 10 m de hauteur. L'étude se concentre sur les pièces du salon (25 m^2 , 68 m^3) et de la cuisine (7 m^2 , 20 m^3) situées au RDC. Quatre fenêtres, une sur chaque façade (Win_N [170 cm × h100 cm], Win_S [1100 cm × h210 cm], Win_E [170 cm × h100 cm], Win_W [1100 cm × h210 cm]) sont ouvrables en mode oscillo-battant (débattement 15 cm). Trois configurations d'ouvertures sont simulées : deux configurations traversantes dans les axes nord-sud (Cross_NS) et est-ouest (Cross_EW), la troisième configuration est mono façade avec uniquement ouverture de la fenêtre sud (Single_S). Le scénario d'ouverture des fenêtres est choisi de manière à être représentatif d'une stratégie de surventilation nocturne appliquée au confort estival. Les positions des portes sont constantes : seule la porte entre le salon et la cuisine est ouverte. La VMC double flux de la maison est simulée avec un débit constant. La valeur du débit est imposée et n'intervient pas dans le bilan de masse du réseau aéraulique.

2.3. PARAMETRES DE L'ANALYSE DE SENSIBILITE

Cinq paramètres continus ont été retenus (Tableau 1). Les distributions représentent l'incertitude qu'aurait le modelleur au moment de paramétrer le modèle. Elles suivent donc une loi normale centrée sur une valeur nominale μ et d'écart type σ de manière à ce que 95% des tirages soient compris dans la plage d'incertitude désirée. Les valeurs nominales des Cd aux ouvertures en oscillo-battant ont été

estimées à partir de lois empiriques de pertes de charge. Leurs incertitudes de +/- 50% sont conformes à celles relevées dans la littérature (Belleri et al. 2013). La valeur nominale du renouvellement d'air lié à la VMC (ACR_MV_in) est fixée à $0,25 \text{ h}^{-1}$ (Nazaroff 2021). L'incertitude de +/- 20% est en cohérence avec la littérature (Bouvier, Bontemps, et Mora 2019).

L'espace des paramètres d'entrées est échantillonné en 1000 éléments avec l'algorithme Latin Hypercube Sampling. Par rapport à l'algorithme Monte Carlo, il produit une meilleure couverture de l'espace des paramètres pour un nombre d'échantillons donnés. La convergence du calcul des indices de Sobol sur les 1000 tirages a été vérifiée.

Pour analyser l'incertitude sur les valeurs de C_p , considérer un paramètre continu par direction du vent et par ouvrant (Monari et Strachan 2017) est réducteur en nombre de paramètres pour une analyse globale. Nous comparons, via un paramètre catégoriel (C_p), deux corrélations parmi les plus répandues : celles de Swami Chandra (Swami et Chandra 1988) et Liddament (Liddament 1986). Cependant, les paramètres catégoriels n'étant pas supportés par la méthode RBD-FAST, leur impact sera quantifié via la réalisation de deux versions de calculs de sensibilité différentes, une pour chaque catégorie (« Cp_SC » ou « Cp_L ») (Tableau 1).

Type de paramètres	Nomenclature	Valeur nominale	Unité	Incertitude	Distribution $N(\mu, \sigma)$
Continu	Cd_Win_S	0,16	[/]	+/- 50%	$N(0,16 ; 0,04)$
	Cd_Win_N	0,23	[/]	+/- 50%	$N(0,23 ; 0,0575)$
	Cd_Win_E	0,23	[/]	+/- 50%	$N(0,23 ; 0,0575)$
	Cd_Win_W	0,16	[/]	+/- 50%	$N(0,16 ; 0,04)$
	ACR_MV_in	0,25	$[\text{h}^{-1}]$	+/- 20%	$N(0,25 ; 0,025)$
Catégoriel	C_p	« Cp_SC »	[/]	/	[« Cp_SC » ; « Cp_L »]

Tableau 1 : Paramètres de l'étude de sensibilité et lois de distribution associées

Enfin, la variable de sortie (ACR_Total [h^{-1}]) est le renouvellement d'air total entrant dans le volume délimité par le salon et la cuisine ($V [\text{m}^3]$). Il est recalculé à partir de la somme des débits entrants ($Qm_{in} [\text{kg/s}]$) à travers toutes les interfaces du réseau aéralique entre les nœuds [salon, cuisine] et les nœuds adjacents ou extérieurs (Figure 1). Les débits massiques sont adimensionnés en utilisant la densité de l'air $\rho [\text{kg/m}^3]$. A noter que le renouvellement d'air de la VMC (ACR_MV_in) est additionné. Le calcul est résumé dans la formule : $ACR_{Total} = \frac{3600}{\rho V} \sum_v Qm_{in} + ACR_{MV_{in}}$.

3. RESULTATS

3.1. ANALYSE D'INCERTITUDE ET DE SENSIBILITE

La Figure 2 illustre les séries temporelles des conditions en vent, de la sortie ACR_Total sur les 1000 simulations, ainsi que les indices de Sobol (S1) et variances partielles (V1) associées aux paramètres continus. L'incertitude sur le ACR_Total propagée à travers les 1000 simulations est non négligeable par rapport aux valeurs moyennes. L'incertitude maximale (+/- $5,6 \text{ h}^{-1}$, soit +/- 46% de la valeur moyenne) est atteinte en configuration traversante. On vérifie que l'incertitude en configuration fermée est quasi constante autour de +/- $0,05 \text{ h}^{-1}$, en cohérence avec la valeur d'incertitude attribuée au paramètre d'entrée ACR_MV_in.

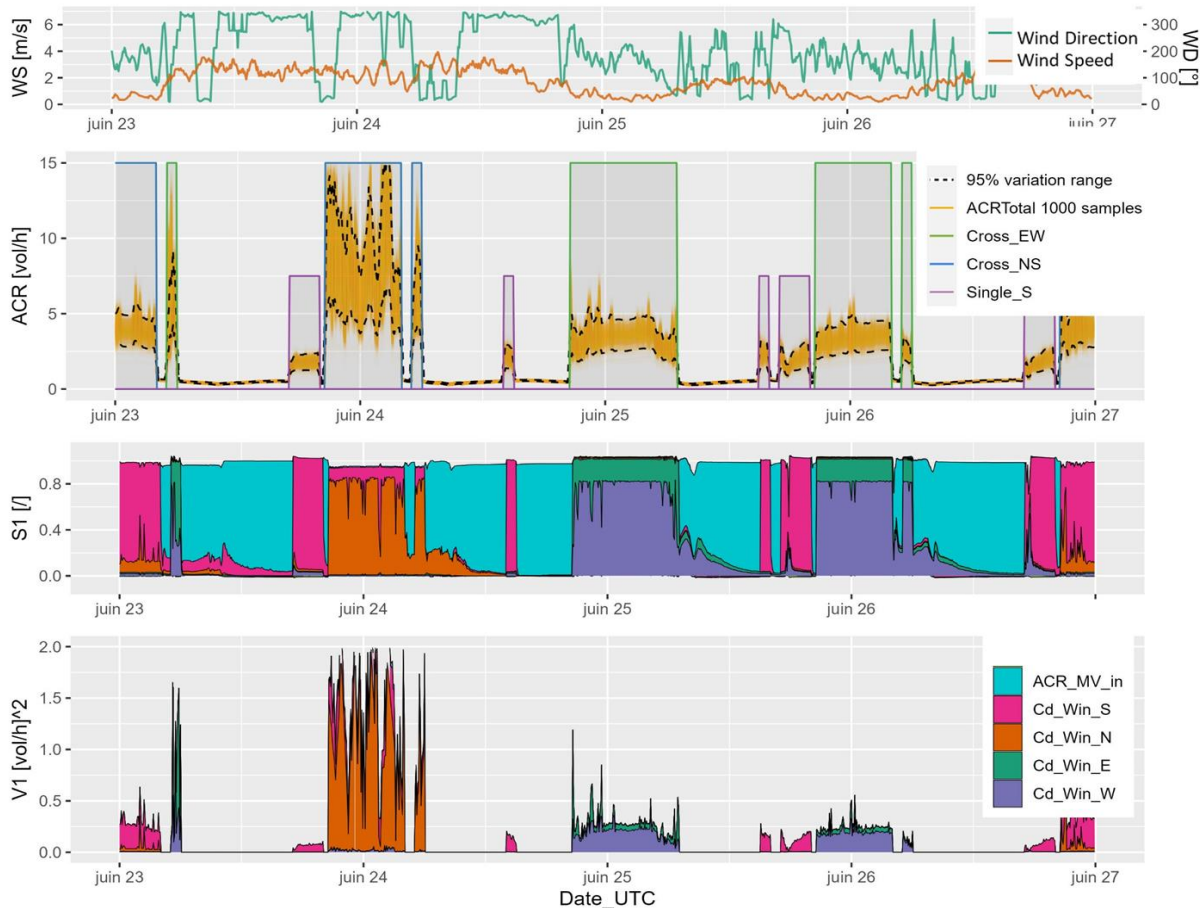


Figure 2 : Conditions de vent, distribution du renouvellement d'air ACR_{Total} sur les 1000 simulations, indices de Sobol ($S1$), et variances partielles ($V1$). Version de calcul avec « Cp_{SC} ». La période 23/06/2023 – 27/06/2023 comprend la réalisation des deux configurations traversantes et la configuration mono façade.

L'étude des indices de Sobol permet d'aller plus loin afin de pouvoir identifier et quantifier quels paramètres continus sont responsables de l'incertitude en sortie. La somme $S1$ est proche de 1, indiquant qu'il n'y a pas d'interaction entre les paramètres. En configurations ouvertes, ce sont principalement les incertitudes sur les Cd des fenêtres ouvertes qui sont responsables de la variabilité du renouvellement d'air. En configuration traversante, la répartition de la responsabilité entre les deux ouvrants est variable : pendant l'ouverture « $Cross_{NS}$ » du 24/06, le Cd de la fenêtre Win_N explique plus de 80% de la variabilité de sortie ($S1_{Cd_{Win_N}} > 0,8$), alors que pour la même configuration les 23/06 et 27/06, c'est le Cd de la fenêtre Win_S qui représente plus de 80% de la variabilité ($S1_{Cd_{Win_S}} > 0,8$). De plus, les valeurs et fluctuations des variances partielles varient au sein d'une même configuration. Toutes ces observations suggèrent l'impact de la vitesse et de la direction du vent.

Enfin, il est intéressant de remarquer qu'il peut y avoir une persistance des contributions des paramètres lors des changement d'état des fenêtres. Par exemple, après la fermeture du 25/06, jusqu'à 40% de la variabilité de l' ACR_{Total} peut être attribuée au Cd_{Win_W} . Nous faisons l'hypothèse que ceci est lié à l'inertie thermique de l'air et des murs (Gondian et al. 2018) (Goffart and Woloszyn, 2021). En configuration fermée, les infiltrations dépendent de la température intérieure, qui elle-même dépend de l' ACR_{Total} réalisé à un instant précédent, lorsque la fenêtre était ouverte, et donc de la valeur du Cd associée.

3.2. IMPACT DE LA VITESSE ET DIRECTION DU VENT

La Figure 3 propose une illustration originale de la distribution des indices de Sobol en fonction de la direction du vent. La représentation s'inspire d'une rose des vents, la différence étant que les vitesses de vent sont remplacées par les indices de Sobol du paramètre choisi. Cela permet par exemple d'observer que, dans la configuration « Cross_NS », l'indice de Sobol du paramètre Cd_Win_N est supérieur à 0,8 uniquement lorsque le vent est du nord. Néanmoins, dans la configuration, « Cross_EW », cette polarisation s'observe de manière moins nette : l'indice de Sobol du paramètre Cd_Win_E ne dépasse que rarement 0.6. Nous faisons l'hypothèse que cela s'explique par le fait que la section de passage de la fenêtre Win_E est plus petite que la fenêtre Win_W . L'impact de l'incertitude sur son Cd a donc un impact plus faible sur la résistance aéraulique totale de la fenêtre.

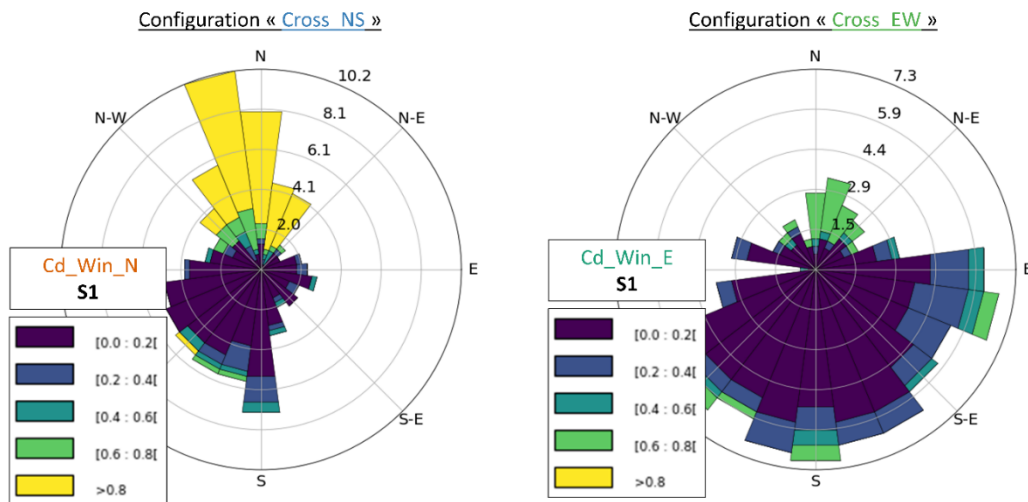


Figure 3 : Indices de Sobol en fonction de la direction du vent

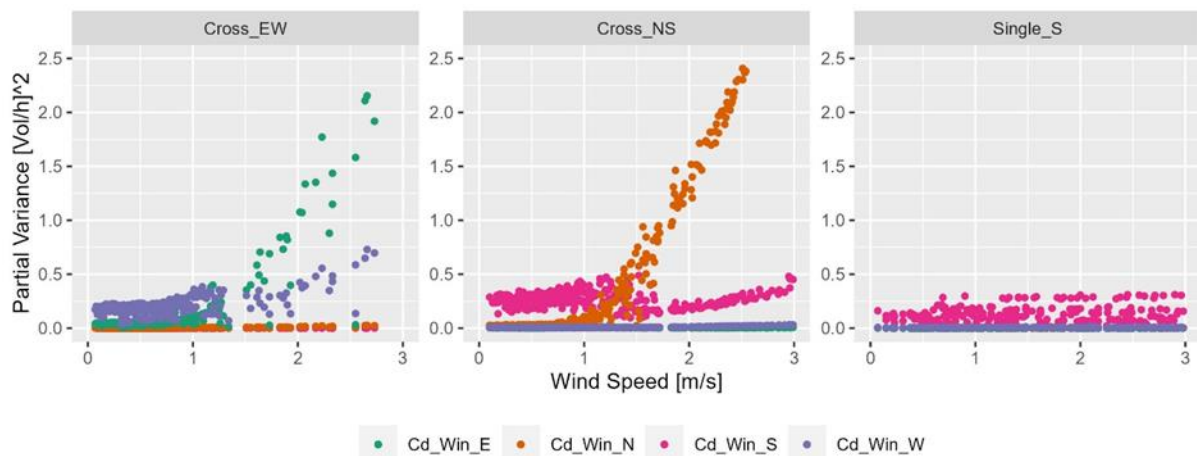


Figure 4 : Variations partielles associées aux Cd aux quatre fenêtres, pour chaque configuration, en fonction du vent

Si l'on souhaite maintenant étudier l'effet de la vitesse du vent, plutôt que d'observer les indices de Sobol, il est plus pertinent d'observer la variabilité du ACR_Total à travers ses variances partielles. La Figure 4 présente les valeurs de variances partielles associées aux Cd des quatre fenêtres, en fonction de

la configuration d'ouvrant et de la vitesse du vent. Dans les deux configurations traversantes, on observe une relation en loi puissance : plus la vitesse du vent est importante, plus la variabilité de l'ACR_Total lié à l'incertitude de paramétrisation d'un Cd sera forte. Au contraire, dans la configuration mono façade, la variance partielle du ACR_Total ne semble pas dépendre de la vitesse du vent, suggérant une prévalence des effets de températures par rapport aux effets de vent. Ces observations sont cohérentes avec les relations analytiques en ventilation traversante et mono façade résumées dans (Kolokotroni et Heiselberg 2015).

3.3. IMPACT DU CHOIX DE LA CORRELATION DE Cp

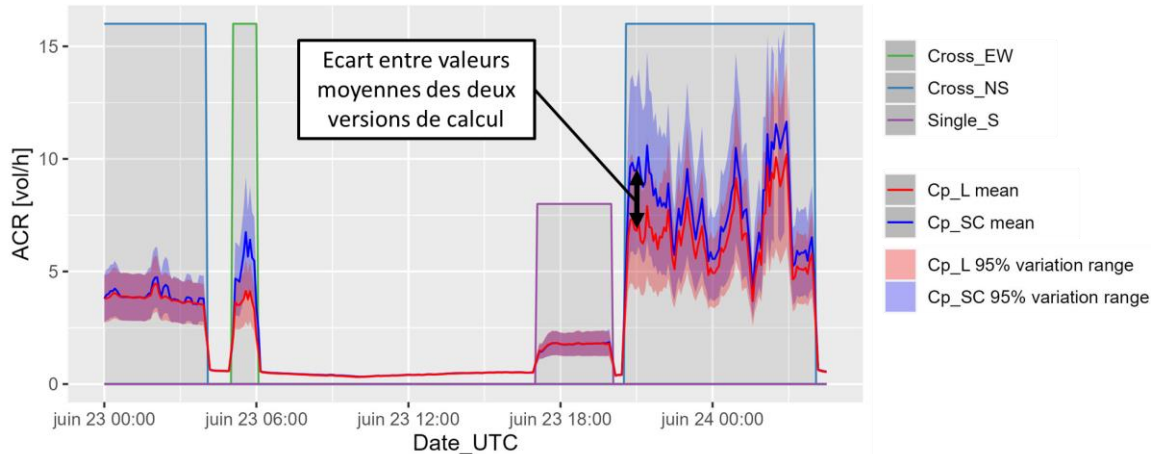


Figure 5 : Distributions du renouvellement d'air ACR_Total sur les 1000 simulations, pour les deux versions de calcul « Cp_SC » et « Cp_L »

La Figure 5 compare les résultats en ACR_Total entre les deux versions de calcul utilisant respectivement les corrélations de Swami Chandra et de Liddament. L'impact du choix de la corrélation peut être non négligeable pour les configurations dominées par les effets de vent : l'écart maximal entre les valeurs moyennes des 1000 échantillons sur les deux versions de calcul est de $4,2 h^{-1}$.

4. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

L'originalité de ce travail a été d'explorer le potentiel de la méthode d'analyse de sensibilité RBD-FAST appliqué à l'étude dynamique du taux de renouvellement d'air en ventilation naturelle. Les résultats de 1000 simulations STD ont montré que, dans notre cas d'étude, les incertitudes sur les coefficients de décharge aux ouvrants (Cd) engendrent jusqu'à $\pm 5,6 h^{-1}$ ($\pm 46\%$) d'incertitudes sur le renouvellement d'air. L'incertitude liée au choix d'une corrélation de coefficients de pressions (Cp) (écart maximal de $4,2 h^{-1}$ en configuration traversante) s'est avérée être du même ordre de grandeur.

Les indicateurs quantitatifs (Sobol et variances partielles) fournissent de riches informations à condition d'être judicieusement exploités. En complément de l'analyse des séries temporelles, nous avons proposé des dépouillements spécifiques mettant en évidence le rôle des directions et vitesses du vent sur la variance du renouvellement d'air, en fonction de type de configuration. Les tendances observées dans les résultats sont cohérentes avec les relations analytiques en ventilation traversante et mono façade résumées dans (Kolokotroni et Heiselberg 2015).

Il faut préciser que les résultats chiffrés sont propres à notre cas d'étude (géométrie et environnement du bâtiment, conditions météo, configurations d'ouvrants, degrés d'ouverture des fenêtres). Néanmoins, pour le dimensionnement d'ouvrants en ventilation naturelle avec effets du vent, nous suggérons au modéleur utilisant l'approche déterministe d'appliquer une incertitude de +/- 50% sur le résultat. S'il a besoin de résultats d'incertitudes consolidés, la méthode présentée (analyse de sensibilité sur les Cd et test de différentes corrélations de Cp) pourra être adaptée au cas d'étude en question.

Enfin, de futurs travaux pourraient explorer l'analyse de nouvelles sorties dynamiques. Par exemple, dans le domaine de la qualité de l'air intérieur, à travers l'analyse de la sortie dynamique en concentration de CO₂ (Breesch et Janssens 2005).

5. BIBLIOGRAPHIE

- Belleri, Annamaria, Spencer Dutton, Ulrich Filippi Oberegger, et Roberto Lollini. 2013. « A Sensitivity Analysis Of Natural Ventilation Design Parameters For Non Residential Buildings ». In *Proceedings of BS 2013: 13th Conference of the International Building Performance Simulation Association*. <https://doi.org/10.26868/25222708.2013.1418>.
- Bouvier, Jean-Louis, Stéphanie Bontemps, et Laurent Mora. 2019. « Uncertainty and sensitivity analyses applied to a dynamic simulation of the carbon dioxide concentration in a detached house ». *International Journal of Energy and Environmental Engineering* 10 (mars): 47-65. <https://doi.org/10.1007/s40095-018-0291-7>.
- Breesch, Hilde, et Arnold Janssens. 2005. « Building simulation to predict the performances of natural night ventilation: Uncertainty and sensitivity analysis ». In *IBPSA 2005 - International Building Performance Simulation Association 2005*.
- Crawley, Drury B., Linda K. Lawrie, Frederick C. Winkelmann, W. F. Buhl, Y. Joe Huang, Curtis O. Pedersen, Richard K. Strand, et al. 2001. « EnergyPlus: creating a new-generation building energy simulation program ». *Energy and Buildings*, Special Issue: BUILDING SIMULATION'99, 33 (4): 319-31. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(00\)00114-6](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(00)00114-6).
- Goffart, Jeanne, et Monika Woloszyn. 2021. « EASI RBD-FAST: An Efficient Method of Global Sensitivity Analysis for Present and Future Challenges in Building Performance Simulation ». *Journal of Building Engineering* 43 (novembre): 103129. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103129>.
- Gondian, Léa, Jeanne Goffart, Monika Woloszyn, Etienne Wurtz, Catherine Buhé, et Philippe Maréchal. 2018. « Évaluation de l'influence des occupants sur le confort estival: utilisation des analyses d'incertitude et de sensibilité ». In , 9.
- Hyun, SH, CS Park, et GLM Augenbroe. 2008. « Analysis of Uncertainty in Natural Ventilation Predictions of High-Rise Apartment Buildings ». *Building Services Engineering Research and Technology* 29 (4): 311-26. <https://doi.org/10.1177/0143624408092424>.
- Kolokotroni, Maria, et Per Heiselberg. 2015. « Ventilative Cooling - State Of The Art Review ». Energy in Buildings and Communities Programme.
- Liddament, Martin W. 1986. *Air Infiltration and Ventilation Centre Air Infiltration Calculation Techniques: An Applications Guide / Martin W. Liddament*. Document AIC-AG 86-1. Bracknell, Berkshire: Air Infiltration and Ventilation Centre.
- Monari, F., et P. Strachan. 2017. « Characterization of an Airflow Network Model by Sensitivity Analysis: Parameter Screening, Fixing, Prioritizing and Mapping ». *Journal of Building Performance Simulation* 10 (1): 17-36. <https://doi.org/10.1080/19401493.2015.1110621>.
- Nazaroff, William W. 2021. « Residential air-change rates: A critical review ». *Indoor Air*. <https://doi.org/10.1111/ina.12785>.
- Schreck, Cédric, Simon Rouchier, Aurélie Fouquier, François Machefert, et Etienne Wurtz. 2024. « IOB_TestHouse_Ventilation_WindowOpenings_MetabolicCO2 ». Mendeley Data. 8 février 2024. <https://data.mendeley.com/datasets/7bv6wyvzjg/1>.
- Swami, M V, et S Chandra. 1988. « Correlations for Pressure Distribution on Buildings and Calculation of Natural-Ventilation Airflow ».

Simulation thermo-hydrigue dynamique de bâtiment et modèle thermo-physiologique : Adaptation et paramétrage pour l'étude des effets des surchauffes urbaines sur la santé

Célia SONDAZ*¹, Lucie MERLIER², Claire HARPET³, Frédéric KUZNIK⁴

¹ CNRS, INSA Lyon, CETHIL, UMR50, 69621 Villeurbanne 69621, France

² Université Claude Bernard Lyon 1, CETHIL, UMR5008, CNRS, INSA Lyon, Villeurbanne, F-69100, France

³ EVS UMR 5600 - Chaire "Valeurs du soin" - Université Jean Moulin Lyon 3

⁴ INSA Lyon, CNRS, CETHIL, UMR50, 69621 Villeurbanne 69621, France

*celia.sondaz@insa-lyon.fr

RESUME. Les périodes de fortes chaleurs impactent la santé physique à travers des contraintes thermiques, cardiovasculaires et d'hydratation. En complément des modèles thermo-hydrigues de bâtiment, les modèles thermo-physiologiques permettent d'étudier ces contraintes à l'échelle individuelle et à l'intérieur des bâtiments. Cela permet de prendre en considération les variations individuelles et les dynamiques d'exposition à la chaleur. Cette contribution discute du paramétrage de l'adaptation du modèle thermo-physiologique JOS3 qui requiert des données sur les caractéristiques individuelles, sur le comportement et sur l'exposition. En ce qui concerne l'estimation des données d'exposition à partir de Simulation Thermique Dynamique (STD) de bâtiment, cette contribution examine le niveau de couplage et le pas de temps pour la STD appropriés. Pour des individus moyens, l'utilisation d'un chaînage simple avec un pas de temps de 15 minutes est suffisante.

MOTS-CLÉS : Surchauffe urbaine, stress thermique, modèle thermo-physiologique

ABSTRACT Extreme heat have an impact on physical health through thermal, cardiovascular and hydric strain. In addition to a Building Energy Model (BEM), thermo-physiological dynamic model enables the investigation of these strains at the individual level, inside buildings. This approach allows individual variations and heat exposure dynamics to be taken into account. This contribution discusses the implementation of the adapted JOS3 thermo-physiological model, which requires data about individual characteristics, behaviour and exposure. To estimate exposure data from BEM, this work study the coupling level and the BEM step time required. For average individuals, a simple chaining with a BEM time step of 15 min is adequate.

KEYWORDS: urban overheating, heat stress, thermophysiological model

1. INTRODUCTION

Les conséquences de la chaleur sur la santé sont à la fois physiques, mentales et sociales. Les effets physiques se manifestent de manière diversifiée tant par leur nature que par leur gravité et leur fréquence. Les causes des décès et d'hospitalisation liées à la chaleur sont relativement bien étudiées d'un point de vue épidémiologique (Ramos et al. 2019; Aghamohammadi et Santamouris 2022) : maladies respiratoires ou cardiaques ou dégradation de pathologies existantes (cancer, Parkinson, problème de santé mentale, etc.). Cependant, la chaleur induit également un continuum de symptômes moins graves dégradant la qualité de vie des personnes (Cheshire 2016; Robert et al. 2019).

Ainsi, il est pertinent d'explorer les manifestations du stress thermique à l'échelle individuelle afin de mieux comprendre ses impacts sur la santé – restreint dans ce travail à l'absence de symptômes

physiques et de pathologies. Il est également intéressant d'identifier les expositions thermiques présentant le plus grand risque, ainsi que les facteurs qui amplifient ou réduisent ce risque.

Les recherches en thermique du bâtiment et de la ville, jusqu'alors focalisées sur des applications à la consommation d'énergie et au confort thermique, s'élargissent à présent à la problématique sanitaire. Les modèles thermo-hydriques du bâtiment fournissent des variables d'ambiance thermo-hydrique, qui, associées à des données sur l'occupant telles que les activités et les vêtements, permettent le calcul d'indicateurs de stress thermique, c'est-à-dire de la charge thermique imposée au corps. Il existe de nombreux indices biométéorologiques basés sur des variables d'expositions thermiques (Ioannou et al. 2022). Cependant, ces indicateurs ne prennent que peu en compte les différences individuelles et les effets dynamiques de l'exposition à la chaleur. De plus, ils visent à quantifier le stress thermique ou la potentielle astreinte thermique, c'est-à-dire les réactions physiologiques au stress thermique, mais pas à comprendre les manifestations physiques associées.

Cette contribution propose alors de compléter un modèle thermo-hydrique de bâtiment par un modèle thermo-physiologique afin d'étudier les réponses physiologiques au stress thermique. Cette contribution discutera du paramétrage du modèle thermo-physiologique pour l'étude des expositions intérieures lors des périodes de fortes chaleurs en milieu urbain. Une première partie présentera une adaptation du modèle thermo-physiologique et les variables à étudier. Puis, les paramètres nécessaires en entrée du modèle thermo-physiologique seront détaillés. Finalement, un zoom sera réalisé sur la liaison entre la Simulation Thermique Dynamique (STD) de bâtiment et le modèle thermo-physiologique : le niveau de couplage requis et le pas de temps nécessaires en sorties de STD seront questionnés.

2. ADAPTATION D'UN MODELE THERMO-PHYSIOLOGIQUE POUR L'ETUDE DE L'ASTREINTE THERMIQUE

Les modèles thermo-physiologiques visent à simuler le transfert de chaleur à l'intérieur du corps humain et ses réponses thermorégulatrices. Ces modèles calculent, entre autres, les températures corporelles centrales et cutanées et les flux thermiques échangés avec l'ambiance. Il existe de nombreux modèles thermo-physiologiques variant en termes de nombre de nœuds de calcul, d'adaptation à des ambiances non uniformes, d'individualisation possible, d'adaptation à des populations vulnérables, et de sorties (Katić, Li, et Zeiler 2016). Parmi ces différents modèles, le modèle JOS 3 (Jointed Circulation System) (Takahashi et al. 2021) a été choisi dans ce travail, notamment pour son adaptation aux ambiances modérément chaudes et sa prise en compte des effets de l'âge. Ce modèle simule les réponses thermo-physiologiques d'un individu placé dans des environnements transitoires et non uniformes, en divisant le corps en 17 segments : tête, poitrine, dos, pelvis, bras, jambes, etc. Chacun de ces segments est composé de 2 ou 4 nœuds de tissus (noyau, muscle, graisse et peau), d'une artère et d'une veine (*Figure 1*). La thermorégulation est modélisée à partir de températures seuils définies comme les températures d'équilibre sans thermorégulation dans une ambiance neutre. Les réponses thermorégulatrices modélisées sont la vasomotricité, la sudation, le frissonnement, mais aussi la thermogénèse non frissonnante et l'anastomose artérioveineuse, deux mécanismes qui se manifestent en ambiance modérée.

Toutefois, pour étudier les manifestations physiques du stress thermique, il est essentiel de simuler des variables représentatives des trois types d'astreintes associées au stress thermique : l'astreinte thermique (coup de chaleur, troubles du sommeil (Buguet et al. 2023), etc.), l'astreinte cardiovasculaire

(syncope (Cymes et al. 2021), œdèmes, etc.) et l'astreinte hydrique (déshydratation, épuisement par la chaleur, crampes (Eichner 2007), etc.). Ces astreintes peuvent en particulier être étudiées via la température centrale, le taux de déshydratation, le gradient de température entre le noyau du corps et la peau et la fréquence cardiaque. Toutes ces variables n'étant pas calculées par le modèle JOS 3, celui-ci a été adapté. Le modèle cardiovasculaire de (Kraning et Gonzalez 1997) permettant de calculer la fréquence cardiaque et les limites de vasodilatation ainsi qu'un bilan hydrique, et le modèle de (Deng et al. 2018) permettant de calculer les effets de la déshydratation sur la thermorégulation ont donc été inclus à JOS 3 dans le cadre de ce travail.

Il est à noter que les modèles thermo-physiologiques ne prennent cependant pas en compte certains effets d'une exposition longue à la chaleur comme l'acclimatation, et qu'ils ne sont pas validés pour des expositions de plusieurs jours ni en condition de vie réelle.

3. PARAMETRES REQUIS POUR LE MODELE THERMO-PHYSIOLOGIQUE

Le paramétrage de modèles thermo-physiologiques peut être une source d'erreurs importantes. La *Figure 1* présente les données nécessaires comme paramètres du modèle JOS 3 adapté. Cette liste est plus longue que ce qui est généralement requis dans les modèles thermo-physiologiques à cause de la volonté d'évaluation des astreintes thermiques, cardiaques et hydriques, et concerne les caractéristiques de l'individu, son comportement et son exposition.

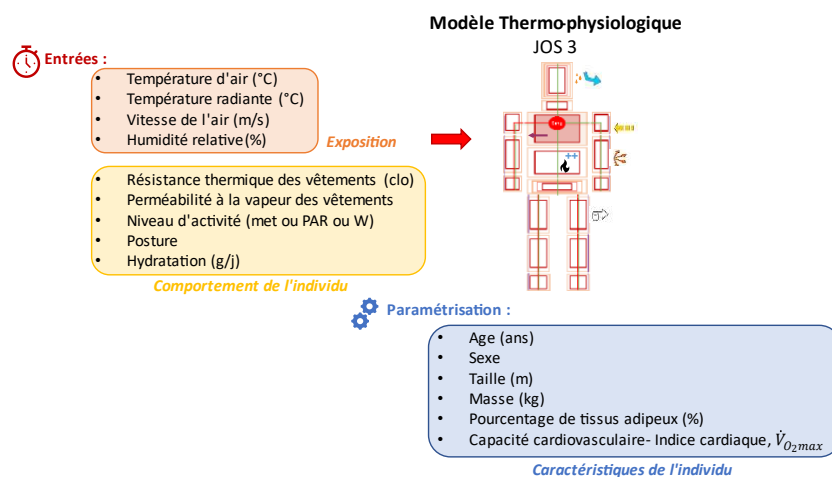


Figure 1 : Les paramètres d'un modèle thermo-physiologique – l'exemple de JOS 3.

3.1. CARACTERISTIQUES DE L'INDIVIDU

Pour créer le mannequin numérique, les propriétés du modèle JOS 3 sont adaptées à l'individu considéré. La masse, le pourcentage de tissus adipeux vont affecter la composition et la propriété des tissus tandis que la taille, la masse et le sexe vont permettre de calculer la surface corporelle disponible pour les échanges thermiques avec l'environnement et le métabolisme de base. La thermorégulation est elle aussi adaptée en fonction des caractéristiques individuelles – âge et sexe – et des capacités cardiovasculaires – la consommation maximale d'oxygène¹ et l'index cardiaque².

¹ La consommation maximale d'oxygène $\dot{V}_{O_2,max}$ correspond au volume maximal de dioxygène que l'individu peut consommer par unité de temps lors d'un exercice dynamique aérobie maximal. Ce paramètre a été ajouté à JOS 3 pour le calcul de la fréquence cardiaque par le modèle de (Kraning et Gonzalez 1997).

² L'indice cardiaque est le débit cardiaque au repos normalisé par la surface corporelle (Patel, Durland, et Makaryus 2024). Dans JOS 3, ce paramètre permet d'évaluer le débit cardiaque et les débits sanguins initiaux.

Ces paramètres permettent d'adapter la simulation à un individu particulier, mais certains, comme les paramètres cardiovasculaires, sont difficiles à connaître, notamment chez les personnes les plus vulnérables à la chaleur, sans mettre en place des expérimentations spécifiques. Toutefois, la sensibilité à la consommation maximale d'oxygène des températures corporelles et de la déshydratation calculées par JOS 3 s'est avérée significative uniquement en cas d'efforts physiques importants (supérieur à 3 fois le métabolisme de base). Il apparaît donc que la paramétrisation cardiovasculaire de JOS 3 pour l'étude d'un stress thermique passif en intérieur peut être faite à partir de données statistiques issues de bases de données comme celle de (Loe et al. 2013) pour les paramètres cardiovasculaires ou de Santé Publique France (InVS 2011) pour les paramètres anthropométriques.

3.2. COMPORTEMENT DE L'INDIVIDU

Dans les modèles thermo-physiologiques, la connaissance du niveau d'activités et de la résistance thermique des vêtements est nécessaire à chaque pas de temps. Le niveau d'activités, également requis pour les modélisations thermo-hydriques de bâtiment, permet d'estimer la production métabolique à partir du métabolisme de base. Il est possible d'évaluer la production métabolique expérimentalement à partir de la fréquence cardiaque ou de la consommation d'oxygène (AFNOR 2021), mais plus communément des tableaux d'équivalence entre activités et niveau de métabolisme sont utilisés (AFNOR 2006; FAO 2005). Les vêtements vont quant à eux affecter les transferts convectifs, radiatifs et évaporatifs. Dans JOS3 comme dans beaucoup de modèles thermo-physiologiques, ils sont simplement représentés par l'ajout d'une résistance thermique et d'une résistance évaporative qui peuvent être estimées grâce des tableaux de valeurs standards (AFNOR 2006).

À ces entrées habituelles de comportements, il a été rajouté dans JOS 3 une entrée concernant l'hydratation. La quantité d'eau ingérée correspond à la quantité de boisson bue à laquelle s'ajoute le contenu en eau des aliments ingérés. Pour estimer précisément cette quantité, pour un individu et une journée particulière, il est donc nécessaire de réaliser un suivi de son alimentation. De manière plus générale, les données statistiques de l'étude INCA 3 réalisée en France en 2014-2015 sur plus de 3000 adultes (ANSES 2017), renseignent sur les valeurs moyennes par sexe, tranche d'âge et saison.

3.3. EXPOSITION

L'exposition thermique est modélisée dans JOS 3 par une température d'air, une température radiante, une humidité relative, une vitesse de l'air et éventuellement un apport par rayonnement solaire supplémentaire. Ces données peuvent être précisées globalement ou pour chacun des segments du corps afin de modéliser une ambiance thermique non uniforme. Ce paramétrage de l'ambiance thermique nécessite donc de préciser indirectement la localisation de l'individu et éventuellement ses déplacements.

4. INTEGRATION D'UN MODELE THERMO-PHYSIOLOGIQUE EN AVAL D'UNE MODELISATION THERMO-HYDRIQUE DE BATIMENT

Pour l'étude de l'astreinte thermique en ambiance thermique intérieure, il est donc possible de compléter une STD, ici réalisé avec le logiciel EnergyPlus, avec une modélisation avec JOS 3. L'outil EnergyPlus a été choisi dans ce travail, car il dispose des modèles thermiques, hydriques et radiatifs, divise les apports de l'occupant en part convective, radiative et latente, et possède un pas de temps flexible. Les conditions de liaisons des deux modèles vont être discutées dans cette partie.

4.1. TRAITEMENT DES APPORTS THERMIQUES LIES A L'OCCUPANT : CHAINAGE OU COUPLAGE ?

Comme présenté sur la *Figure 2*, si la STD fournit les températures et humidités au modèle thermo-physiologique, celle-ci est dépendante des apports internes, notamment ceux liés à l'occupant. En première approche, il est possible de supposer que ces apports sont égaux à la production de chaleur métabolique, sensible et latente, et donc d'utiliser le métabolisme de base multiplié par le niveau d'activités en entrée de la STD. Cette supposition est vraie à condition qu'il n'y ait pas de stockage de chaleur dans le corps. Or les températures corporelles évoluent en réalité et c'est d'ailleurs ce qu'on cherche à évaluer en utilisant un modèle thermo-physiologique. Afin de prendre en compte ces variations de températures corporelles, il convient donc de réaliser un couplage entre les 2 modèles avec les flux thermiques et hydriques échangés entre le corps et l'ambiance qui est calculée par le modèle thermo-physiologique comme apport interne lié à l'occupant dans la STD.

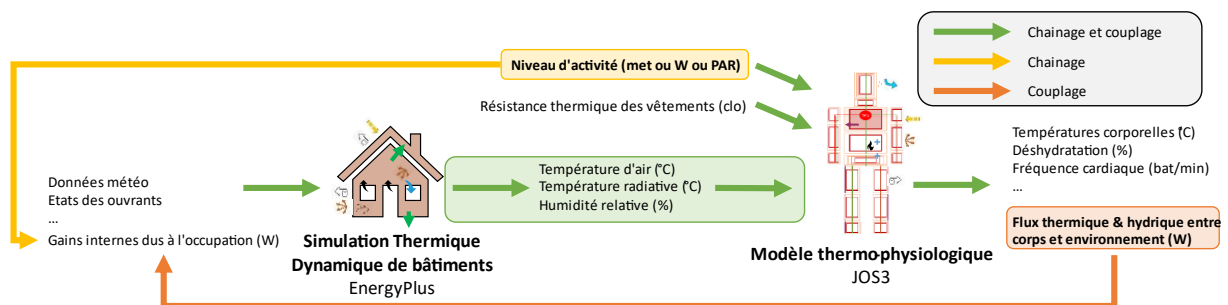


Figure 2 : Liaisons possibles entre les modèles EnergyPlus et JOS 3

Pour évaluer l'erreur commise lors de la réalisation d'un chainage simple par rapport à un couplage, les deux types de simulations ont été réalisés en considérant un appartement T2 en R+3 (orientation EST) situé dans un bâtiment d'habitat collectif RT2012 dans lequel se situe un "individu standard" (homme, 20 ans, 1,72m, 74kg) qui dort dans la chambre pendant la nuit ($PAR^3 = 1$ de 20 h à 8 h), qui nettoie et range son logement ($PAR = 2,8$ dans le séjour de 10 à 11 h et de 17 à 18 h) et qui se repose dans le séjour le reste de la journée ($PAR = 1,2$). Les simulations ont été réalisées avec les données météo de Lyon-Bron de 2023 et les résultats ont été étudiés pour la vague de chaleur d'août 2023.

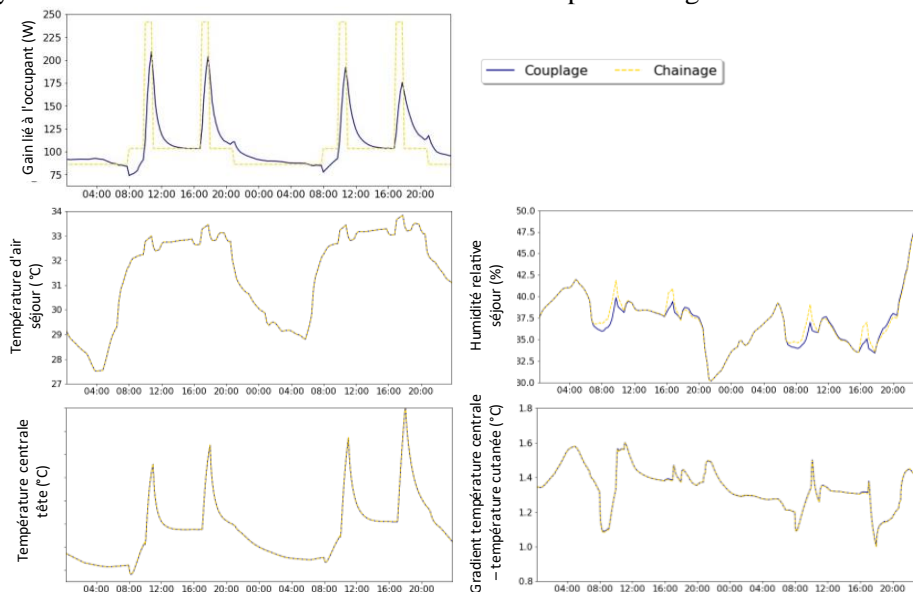


Figure 3 : Résultats de la comparaison entre chainage et couplage pour le cas d'un individu standard dans un logement RT2012 en R+3 orienté à l'Est

³ Physical Activity Ratio : Coût énergétique d'une activité par rapport au métabolisme de base (FAO 2005)

Un extrait des résultats est présenté sur la *Figure 3*. Il apparaît que malgré des différences d'apports internes pouvant atteindre par moment 157 W, les écarts de température d'air dans le logement restent inférieurs à 0,1 °C et ceux de l'humidité spécifiques inférieurs à 2 g_E/kg_{AS}. Les écarts sur les sorties thermo-physiologiques sont par conséquent négligeables : maximum 0,04 °C pour la température centrale, 0,1 °C pour le gradient entre température centrale et température cutanée, 2 bat/min pour la fréquence cardiaque et 0,01% pour la déshydratation.

Par conséquent, un chainage d'EnergyPlus et du modèle JOS3 est suffisant pour l'étude des manifestations physiologiques des fortes chaleurs dans la configuration étudiée. Cette conclusion a été retrouvée pour des cas où l'individu est au repos pendant 24 h et pour un autre bâtiment RT2012.

4.2. PAS DE TEMPS NECESSAIRES EN ENTREE DU MODELE THERMO-PHYSIOLOGIQUE

Afin de réaliser pertinemment ce chainage, il est également nécessaire de questionner le pas de temps nécessaire pour la STD vis-à-vis des constantes de temps de JOS 3. Des simulations ont donc été réalisées avec différents pas de temps en entrée de JOS 3.

Un individu standard nu et au repos a été modélisé, d'abord pendant une heure dans une ambiance neutre (température opérative permettant la thermoneutralité – 50% - 0,1 m/s) pour initialiser la simulation, puis pendant 12h avec une température opérative variant aléatoirement de plus ou moins 0,5 °C toutes les minutes, et enfin pendant de nouveau une heure en ambiance neutre pour éviter les erreurs de coupure lors du calcul de la moyenne. Pour garantir des variations cohérentes avec ce qui peut être rencontré lors de stress thermique en intérieur, la température opérative était comprise entre 23 et 35 °C. La même simulation a ensuite été répétée avec une température opérative moyenne sur 5, 15, 30 puis 60 minutes. Le pas de temps de calcul de JOS 3 est resté réglé à 1 minute.

La *Figure 4* montre un exemple d'étude du pas de temps de la température. La température centrale apparaît très peu sensible aux pas de temps en entrée : l'écart est toujours inférieur à 0,07 °C (pour comparaison une augmentation de température centrale de 1 °C est considérée comme la limite à ne pas dépasser pour éviter une astreinte à la chaleur d'après la norme ISO 9886 (Robert et al. 2019)), mais la dynamique de variation de la température centrale est différente avec un pas de temps en entrée supérieure à 30 min. La déshydratation et la fréquence apparaissent aussi très peu sensibles au pas de temps en entrée. En revanche, le gradient entre température centrale et température cutanée est très sensible aux variations de température opérative. Les écarts peuvent être très importants pour des entrées toutes les 30 ou 60 min, respectivement jusqu'à 0,4 °C (soit 18% d'écart relatif) et 0,8 °C (soit 61% d'écart relatif) alors qu'une réduction du gradient de 2 °C peut être à l'origine d'une réduction des capacités physiques et de fatigue (Cuddy, Hailes, et Ruby 2014).

Pour confirmer ces observations, la distribution des erreurs a été étudiée sur 100 cas similaires, c'est-à-dire sur 100 évolutions aléatoires pendant 12 heures de la température opérative (entre 23 et 35°C) pour un individu nu au repos (50% - 0,1 m/s). Les résultats obtenus confirment que le gradient entre température centrale et température cutanée impose le choix du pas de temps en entrée. Une moyenne de la température opérative toutes les 15 minutes garantit une erreur inférieure à 0,3°C sur ce gradient. Un pas de temps de 15 min apparaît donc être un bon compromis pour étudier l'astreinte thermique tout en limitant le temps de calcul. Cette conclusion a été confirmée par la réalisation d'études similaires considérant la température d'air, la température radiante et l'humidité relative.

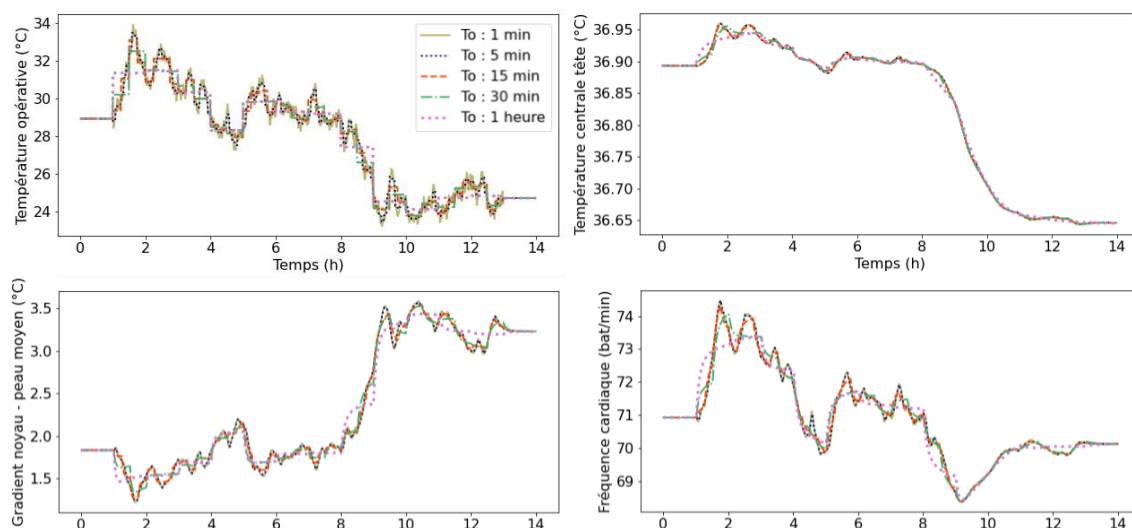


Figure 4 : Pas de temps en entrée de JOS 3 – Simulations pour l'étude de la température opérative

5. CONCLUSIONS

Afin de mieux appréhender les effets de l'astreinte thermique en ambiance intérieure pendant les périodes de fortes chaleurs en milieu urbain, cette contribution propose l'emploi, en complément d'une STD, d'un modèle thermo-physiologique dynamique adapté à l'étude des trois types d'astreintes liés à la chaleur et discute de l'un des enjeux de l'utilisation d'un tel modèle : son paramétrage.

Un modèle thermo-physiologique nécessite en entrée des données sur l'individu - âge, sexe, taille, masse, indice cardiaque par exemple -, sur son comportement - activités, vêtements et hydratation - et surtout sur son exposition. Pour les données d'exposition lorsque celle-ci sont estimées à partir d'une STD, cette contribution a montré la pertinence d'un chainage simple entre un modèle thermo-hydrigue de bâtiment avec un pas de temps de 15 minutes et un modèle thermo-physiologique, à condition d'harmoniser les consignes d'activités dans les deux modèles. Ces conclusions doivent toutefois être vérifiées sur d'autres bâtiments et d'autres niveaux d'activités.

Pour les paramètres liés à l'individu, des données d'individus moyens ont été utilisées dans cette contribution, mais il est également possible de simuler un individu spécifique. Cette option requiert la collecte de nombreuses données, parfois difficiles à obtenir, ainsi que le suivi du comportement de l'individu. Pour cela, une démarche d'enquête de terrain *in situ* avec suivi d'individu est actuellement expérimentée dans un projet qui allie les sciences de l'ingénieur aux sciences humaines et sociales. La mise en perspective de la modélisation et du terrain permet alors d'interroger les apports et les limites de la modélisation pour des conditions de vie réelle et par rapport à la problématique des conséquences sanitaires des surchauffes urbaines et des facteurs de vulnérabilité qui les affectent.

6. REMERCIEMENTS

Ce projet a obtenu le soutien financier du CNRS à travers les programmes interdisciplinaires de la MITI.

7. BIBLIOGRAPHIE

- AFNOR. 2006. Ergonomie des ambiances thermiques - Détermination analytique et interprétation du confort thermique par le calcul des indices PMV et PPD et par des critères de confort thermique local. NF EN ISO 7730.
- . 2021. Ergonomie de l'environnement thermique - Détermination du métabolisme énergétique. NF EN ISO 8996.

- Aghamohammadi, Nasrin, et Mat Santamouris, éd. 2022. *Urban Overheating: Heat Mitigation and the Impact on Health*. *Advances in Sustainability Science and Technology*. Singapore: Springer Nature Singapore. <https://doi.org/10.1007/978-981-19-4707-0>.
- ANSES. 2017. « Troisième étude individuelle nationale des consommations alimentaires (Etude INCA3) ». Rapport d'expertise collective n°2014-SA-0234 – Etude INCA3.
- Buguet, Alain, Manny W. Radomski, Jacques Reis, et Peter S. Spencer. 2023. « Heatwaves and Human Sleep: Stress Response versus Adaptation ». *Journal of the Neurological Sciences* 454 (novembre): 120862. <https://doi.org/10.1016/j.jns.2023.120862>.
- Cheshire, W. P. 2016. « Thermoregulatory Disorders and Illness Related to Heat and Cold Stress ». *Autonomic Neuroscience* 196 (avril): 91-104. <https://doi.org/10.1016/j.autneu.2016.01.001>.
- Cuddy, John S., Walter S. Hailes, et Brent C. Ruby. 2014. « A Reduced Core to Skin Temperature Gradient, Not a Critical Core Temperature, Affects Aerobic Capacity in the Heat ». *Journal of Thermal Biology* 43 (juillet): 7-12. <https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2014.04.002>.
- Cymes, Iwona, Rakesh Jalali, Katarzyna Glińska-Lewczuk, Ewa Dragańska, Beata Giergielewicz-Januszko, et Jerzy Romaszko. 2021. « The Association between the Biometeorological Indicators and Emergency Interventions Due to Fainting: A Retrospective Cohort Study ». *Science of The Total Environment* 770 (mai): 145376. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145376>.
- Deng, Q., J. Zhao, W. Liu, et Y. Li. 2018. « Heatstroke at Home: Prediction by Thermoregulation Modeling ». *Building and Environment* 137 (juin): 147-56. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.04.017>.
- Eichner, E Randy. 2007. « The Role of Sodium in “Heat Cramping” ». *Sports Medicine* 37 (4): 368-70. <https://doi.org/10.2165/00007256-200737040-00024>.
- FAO. 2005. « Human Energy Requirements: Report of a Joint FAO/ WHO/UNU Expert Consultation ». *Food and Nutrition Bulletin* 26 (1): 166.
- InVS. 2011. « Anthropométrie, Adultes : Tableaux de distribution ENNS ». *Santé Publique France*. 7 juillet 2011. <https://www.santepubliquefrance.fr/determinants-de-sante/nutrition-et-activite-physique/articles/enns-etude-nationale-nutrition-sante/anthropometrie-adultes-tableaux-de-distribution-enns>.
- Ioannou, Leonidas G., Konstantinos Mantzios, Lydia Tsoutsoubi, Sean R. Notley, Petros C. Dinas, Matt Brearley, Yoram Epstein, et al. 2022. « Indicators to Assess Physiological Heat Strain – Part 1: Systematic Review ». *Temperature* 9 (3): 227-62. <https://doi.org/10.1080/23328940.2022.2037376>.
- Katić, K., R. Li, et W. Zeiler. 2016. « Thermophysiological Models and Their Applications: A Review ». *Building and Environment* 106 (septembre): 286-300. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.06.031>.
- Kraning, K., et R. Gonzalez. 1997. « A Mechanistic Computer Simulation of Human Work in Heat That Accounts for Physical and Physiological Effects of Clothing, Aerobic Fitness, and Progressive Dehydration ». *Journal of Thermal Biology* 22 (4-5): 331-42. [https://doi.org/10.1016/S0306-4565\(97\)00031-4](https://doi.org/10.1016/S0306-4565(97)00031-4).
- Loe, Henrik, Øivind Rognmo, Bengt Saltin, et Ulrik Wisløff. 2013. « Aerobic Capacity Reference Data in 3816 Healthy Men and Women 20–90 Years ». Édité par Alejandro Lucia. *PLoS ONE* 8 (5): e64319. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0064319>.
- Patel, Nishil, Justin Durland, et Amgad N. Makaryus. 2024. « Physiology, Cardiac Index ». In *StatPearls*. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK539905/>.
- Ramos, Yuddy, Jean-Pierre Trépanier, Alexandre St-Denis, Stéphanie Susser, Cong Dung Tran, Centre intégré de santé et de services sociaux de Laval, et Direction de santé publique. 2019. *Vague de chaleur de l'été 2018: rapport d'enquête épidémiologique*. <http://collections.banq.qc.ca/ark:/52327/4006591>.
- Robert, L, E Turpin-Legendre, J Shettle, C Tissot, C Aubry, et B Siano. 2019. « Travailler dans une ambiance thermique chaude ». INRS, 25.
- Takahashi, Yoshito, Akihisa Nomoto, Shu Yoda, Ryo Hisayama, Masayuki Ogata, Yoshiichi Ozeki, et Shin-ichi Tanabe. 2021. « Thermoregulation Model JOS-3 with New Open Source Code ». *Energy and Buildings* 231 (janvier): 110575. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110575>.

Numerical study of a geothermal rainwater tank for buildings passive cooling

Lucas Striegel^{1,3,*}, Edouard Walther^{1,3}, Jean-Baptiste Bouvenot^{1,3}, Hossein Nowamooz^{2,3}

¹Institut National des Sciences Appliquées, Génie Thermique Énergétique & Environnement

24 Boulevard de la Victoire - 67000 Strasbourg

¹Institut National des Sciences Appliquées, Génie Civil

24 Boulevard de la Victoire - 67000 Strasbourg

³Université de Strasbourg, INSA Strasbourg, CNRS, ICube Laboratory UMR 7357, Strasbourg, France

300 Boulevard Sébastien Brant - CS 10413 - F-67412 Illkirch Cedex

*striegel.lucas@insa-strasbourg.fr

RÉSUMÉ. L'objet de cet article est la présentation de l'étude numérique d'un nouveau système hybride de récupérateur d'eau de pluie géothermique. Cette solution, qui se veut low-tech, est peu étudiée dans la littérature (stockage d'eau à volume variable et à surface libre) et permet de rafraîchir passivement les bâtiments tout en réduisant les consommations d'eau non potable. Après la présentation du modèle numérique, celui-ci est validé grâce aux données expérimentales d'un prototype échelle 1. En s'appuyant sur ce modèle, une analyse de sensibilité puis un ajustement sur les paramètres influents est réalisé.

MOTS-CLÉS. récupérateur d'eau de pluie, rafraîchissement passif, géocooling, modélisation, analyse de sensibilité, optimisation

ABSTRACT. This communication presents the study of a new hybrid system composed of a buried rainwater tank thermally activated through a water-to-water heat exchanger. This low-tech solution, scarcely studied in the literature (variable level of atmospheric water volume), performs the passive cooling of buildings and reduces domestic water network consumption (for non-potable uses). A numerical model is built and validated thanks to experimental results retrieved from a at-scale prototypes. Sensitivity analysis used for model improvement and parameters fitting will also be discussed.

KEYWORDS. rainwater harvesting, passive cooling, geocooling, modelling, sensitivity analysis, parameters fitting

1. INTRODUCTION

In the well-known context of climate change, with more frequent and severe heatwaves (Masson-Delmotte et al., 2021), the building sector (residential and service sector) is in great need of resilience in terms of summer thermal comfort and reduction of CO₂ emissions. The electricity consumption for air conditioning in France amounts for almost 15.5 TWh (ADEME, 2021). Using surface geothermal energy - a renewable energy - as heat sink instead of the outside air is a good alternative as the COP of geothermal heat pump is higher and do not contribute directly to urban heat island effect (Bayer et al., 2019)

However shallow geothermal energy can also be deployed as passive heat source, meaning without using refrigerant fluid and a compressor, resulting in even lower CO₂ emissions and electricity consumption. According to a French professional association/the AFPG (Association française des professionnels de la géothermie), in France, geothermal systems in general and

ground-coupled heat exchangers for passive cooling of buildings in particular are promising solutions that need to be developed (AFPG, 2023).

In this context, this project aims at developing a new passive system using buried rainwater tanks as geothermal probes by immersing a water-to-water heat exchanger (HX). Indeed, water management is also becoming a major issue, with both intense rainfall events and droughts on the increase (Masson-Delmotte et al., 2021). This hybrid system could therefore address both water management issues as well as providing cooling for buildings in summer.

The literature review shows a lack of detailed studies of such systems. The exploitation of experimental data from cold and hot water tanks connected to a thermo-active building system has been addressed by (Kalz et al., 2010). They demonstrate that a 11 m³ cistern could provide about 1000 kWh of cooling energy over a whole year. Simulation studies have been carried out by (Upshaw et al., 2017) with the study of a non-buried rainwater storage tank. The approach considered the rainwater tank as a means of shifting the electrical peak load of an air conditioning unit. (Gan et al., 2007) and (Marco Marigo et al., 2021) exposed experimental and numerical studies of a buried water tank coupled to a heat pump, respectively with a plate HX and a coiled HX, which differs from the present work. Regarding (Marco Marigo et al., 2021) the ground heat exchanger consists of a helical polyethylene pipe immersed in a concrete water tank. The tank and pipe sizes are very similar to our prototypes; however the water surface remains static (no in or outflow of rainwater). To the best of our knowledge, the modelling of variable free-surface water storage and the associated mass and heat transfer appears to be poorly documented.

This paper aims at bringing a more complete study of a variable free surface water tank with a numerical model and an experimental validation. It is also expected to validate the concept of this type of system as geothermal probe in a passive installation (without the use of a heat pump). To set up the model, the physical equations from both usual domestic water tanks and atmospheric reservoirs were combined, taking into account heat transfer between air and water. More broadly, this research project aims at establishing and validating an equation-based physical model, using the data of two full-scale prototypes in operation since July 2021.

This article proposes a brief description of the full-scale experimental prototype and the corresponding governing equations or hypotheses. Prior to the validation of the model, a sensitivity analysis is lead in order to identify influential parameters and subsequently a fit of these parameters is made, such that the discrepancy with experimental data is minimized.

2. MAIN CONCEPT OF GEOTHERMAL RAINWATER TANK

The basis of our solution consists in a new or existing buried rainwater tank (see Figure 1), initially used for rainwater collection as non-potable domestic water and the relief of sewage networks. These tanks are generally sized according to the amount of water that can be recovered (from the roof and rainfall) and typically have a capacity of about 10 m³. In France, the water resources management legislation locally enforces the water management at parcel level which could democratize the use of such rainwater tank (Communauté d'Agglomération de Haguenau, 2017). The collected rainwater is mostly used for gardening but also for toilet flushing.

A helical water-to-water heat exchanger in copper or polyethylene is placed in the tank in order to take advantage of the heat storage capacity of water as a by-product. Using an air-to-water heat exchanger connected to the ventilation supply duct, the tank provides cooling energy to the building during summer (Fig. 2).

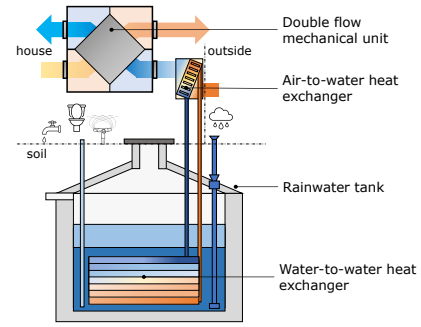
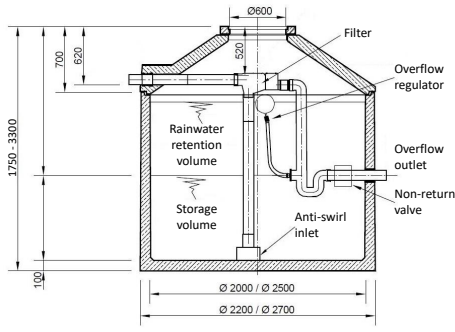


Figure 1 : Datasheet of the rainwater retention and storage tank - PLUVIAU (translated).

Figure 2 : Schematic diagram of a geothermal rainwater tank.

The principle is to use the same installation for three purposes (rainwater harvesting, water management, cooling the building), which in principle allows savings in terms of costs and materials (to be quantified), for example by avoiding the ground boreholes for geothermal probes or the construction of a Canadian well.

3. PHYSICAL MODEL

In this section, the underlying physical models are described.

3.1. TANK AND SYSTEMS

In the first approach the tank is modelled with two temperature nodes, the ambient air temperature T_a and the water temperature T_w . The two heat balances are presented with the detailed heat fluxes and schematize below (Figure 3).

$$\rho_w c_{p_w} \frac{dV_w T_w}{dt} = -Q_{loss,w} - \dot{Q}_{cv} - \dot{Q}_{rad} - \dot{Q}_{evap} + \dot{Q}_{HX} + \dot{Q}_{rain} + \dot{Q}_{dcw} + \dot{Q}_{toil} + \dot{Q}_{gard} + \dot{Q}_{ov} \quad (1)$$

$$\rho_a c_{p_a} \frac{dV_a T_a}{dt} = -Q_{loss,a} + \dot{Q}_{cv} - \dot{Q}_{out} - \dot{Q}_{in} \quad (2)$$

Concerning the water node T_w , the different heat fluxes are detailed below.

The conduction and convection loss to the ground are calculated with a heat transfer coefficient $U_{w,gr}$ adapted to the surface (horizontal or vertical).

$$Q_{loss,w} = U_{w,gr} S_w (\overline{T_{w,gr}} - T_w) \quad (3)$$

The radiative heat flux between the water and the walls above it is computed with a linearized radiative coefficient.

$$\dot{Q}_{rad} = h_{r,w} S_w (\overline{T_{wall,a}} - T_w) \quad (4)$$

The convection loss to the air inside the tank is computed with a convection coefficient correlation from (Auer, 1996) dependant of the wind speed at the water surface.

$$\dot{Q}_{cv} = h_{cv,a-w} S_{w-a} (\overline{T_a} - T_w) \quad (5)$$

$$h_{cv,a-w} = 3.1 + 4.1 u_a^{0.5} \quad (6)$$

The evaporative latent heat flux is calculated with (Hens, 2009) correlation that involve the vapour pressure difference between the saturated air at the water surface and the air inside the tank for the mass flow rate estimation. The evaporation heat flux which is extracted from water is not transferred to the air because this flux is turned into steam.

$$\dot{Q}_{evap} = -q_{m,evap}L_v \quad (7)$$

$$q_{m,evap} = 4.09e^{-5}S_{w-a}(p_{sat}(T_w) - p_{vap}(T_a)) \quad (8)$$

The heat flux from the heat exchanger is computed with the inlet and outlet temperature. Both are computed with the efficiency equations of the two HXs.

$$\dot{Q}_{HX} = q_{m,HX}c_{p,gw}(T_{HX,out} - T_{HX,in}) \quad (9)$$

Incomming advection fluxes are of the following form, with X beeing the different input of water, namely the rain and the district cold water when the level falls under its minimum level :

$$\dot{Q}_X = q_{m,X}c_{p,w}T_X \quad (10)$$

Outgoing fluxes are of the form, with X beeing the different output of water, namely the use of rainwater for toilet flushing, gardening or the overflow (when the level hit its maximum) :

$$\dot{Q}_X = -q_{m,X}c_{p,w}T_w \quad (11)$$

Concerning the heat flux balance on the air node T_a , the convective heat transfer is described with Eq. (5). The conducto-convective losses are computed in the same manner as Eq. (3) with adapted heat transfer coefficient $U_{a,gr}$ and temperature T_a and $T_{gr,a}$. The leakage due to volume variation and leakage through the cover are also treated as advection fluxes.

$$\dot{Q}_{out} = -(q_{m,out} + q_{m,leak})T_a \quad (12)$$

$$\dot{Q}_{in} = (q_{m,in} + q_{m,leak})T_{ext} \quad (13)$$

3.2. GROUND

The ground is simply modeled thanks to a finite element discretization of the heat equation (2D cylindrical with an axial symmetry at the centre of the tank). The following boundaries conditions are applied : imposed temperature at the bottom of the domain, adiabatic on the left and right side due to symmetry and vertical heat flux far from the perturbation respectively, convective heat flux and solar radiation at the top (Figure 4).

4. NUMERICAL MODEL AND VALIDATION

4.1. DESCRIPTION

The chosen numerical method is Crank-Nicolson's semi-implicit scheme, which has the advantage of unconditional stability and being of second order in time. It may be argued that explicit schemes, such as DuFort-Frankel's, are less computationally intensive, especially for the ground part. Considering the variation of heat transfer coefficients or of the ground properties as well as the severe advection fluxes in the tank originating from the collection of rainfall, the choice of an implicit scheme appeared to be sound. Future developments of the model, including a coupled soil moisture model and the future integration of temperature stratification in the water tank also promote the choice of such a scheme.

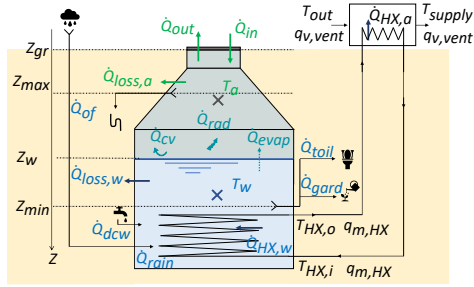


Figure 3 : Schematic diagram of the heat and mass flow in and around the model.

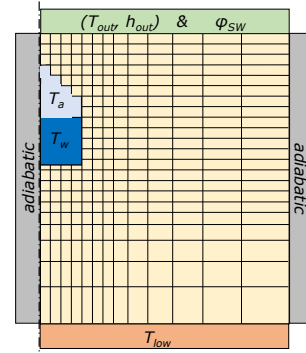


Figure 4 : Illustration of the mesh and boundary conditions for the discretized ground model.

4.2. REDUCING THE COMPUTATIONAL EXPENSE

Before taking further steps into the modelling process involving multiple simulations, a particular effort was made in order to reduce the computational burden. The steps taken were the following and are explicated for potentially interested readers :

- The finite volume two-dimensional conduction problem in the ground exhibits a very sparse matrix. For an equal number of nodes in both directions, non-zero values are in the order of $\simeq \frac{5n}{n^2} = \frac{5}{n}$. Avoiding multiplying zeros by using the dedicated sparse linear algebra methods in `scipy` is an efficient means for the reduction of computation time.
- Another remarkable gain was however obtained simply with the banded matrix algebra tool of the same package. It relies in putting together the non-zero diagonal terms in order to reduce matrix operations. The computational burden for a (n, m) matrix boils down from $(n \times m)^2$ to $2n \times nm$ and yielded a twofold speed-up, with a minor increase in complexity for the programmer (*i.e.* a remarkable ratio between the gain and the time spent debugging).
- A blunt use of "just-in-time" compilation for recurrent functions of the script also provided another 20% time gain with the `numba` package.

Alternately proceeding to a Gaussian elimination of such an outrigger matrix would potentially save some computational expense, however at the cost of a more complex preconditioning of the matrix. The technique explained is described in the very clear (Yano et al., 2012). It will be explored in future developments.

4.3. EXPERIMENTAL DATA COLLECTION AS VALIDATION DATASET

With state-of-art parameter values, such as convective coefficients, ground thermal properties *etc* a first simulation has been undertaken and numerical results are compared to an experimental data set collected on at-scale prototypes (Striegel et al., 2023). The results obtained show that the dynamics and amplitude of the phenomenon are respected, with a root mean square error between 1.1 and 1.8 [K], as summarised in Table 1. This first result is acceptable, however one can observe on Figure 5 that large differences do exist between the model and the experimental results, especially as far as the tank's air and water temperature are concerned. Aiming at a reduction of this discrepancy, a sensitivity analysis of the model parameters is presented in the following section, followed by a parameter fit. Figure 6 shows the ground temperature distribution and the perturbation induced by the tank until about 6 m distance. The reduction of the ground domain is a potential means of reducing the computational expense.

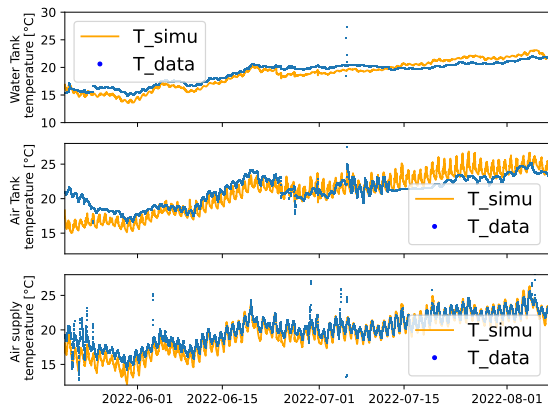


Figure 5 : 1st simulation results (summer period).

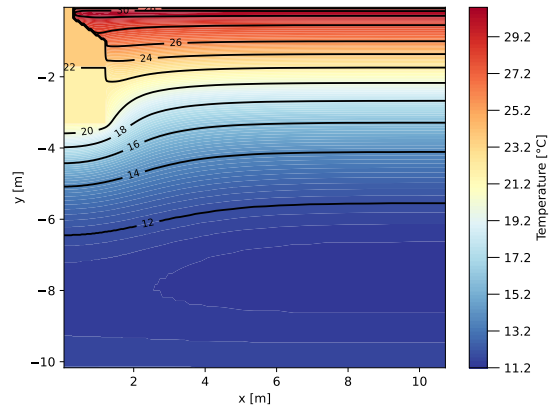


Figure 6 : Ground temperature distribution.

	Air temperature (Tank)	Water temperature (tank)	Supply air temperature
RMSE (°C)	1.8	1.2	1.1

Tableau 1 : RMSE with modelled temperatures using state-of-the-art parameter values

5. SENSITIVITY ANALYSIS & PARAMETER FITTING

In this section the results of a sensitivity analysis are presented and a subsequent parameter fit is lead.

5.1. SENSITIVITY ANALYSIS

Sensitivity analysis is used as a means of discriminating the influential parameters of the model. A "one at-a-time" experiment was lead after Morris' method. In brief, changing one parameter of the model at a time for different values of the model parameters set allows to isolate the mean parameter effect, named "elementary effect" and its standard deviation, which provides an insight on possible parameter interactions or non-linearities – see (Morris, 1991). The sensitivity analysis was led on the water and air temperature inside the tank and on the air to water heat exchanger's inlet and outlet, with the parameters and their range of variation described on Table 2. The parameters were chosen based on the literature, their importance in the equation and their variability.

The results obtained are presented on Figure 7 for the blown air temperature, but are fairly the same for the other four temperatures, where one can see that the density and specific heat capacity of the ground are the first and second influential parameters. The convection coefficient at the air-water interface and the tank wall-air come as third and fourth. The ground conductivity comes as fifth most influent parameter. Noticeably, the wall-to-water convection coefficient is less important, which is consistent with its higher value, implying that the tank wall temperature is close to the water's whatever the coefficient value takes within the given range.

The parameters fitting procedure will focus on all parameters except the water-to-water heat exchanger efficiency, ϵ_w . Furthermore, the product of the ground density and thermal capacity ρC_p never intervenes separately in the model equations, hence for the sake of reducing the number of variables to be fitted, they were merged into an equivalent density ρ^* for a constant specific heat capacity, chosen as $C_p = 1000$ [J/kg/K].

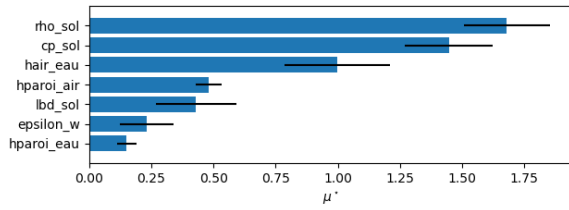


Figure 7 : Result of the sensitivity analysis on the supply air temperature.

Variable bounds	
ρ_{sol} [kg/m ³]	[800 - 3000]
C_p [J/kg/K]	[400 - 1400]
$h_{air-eau}$ [W/m ² /K]	[1 - 10]
lbd_{sol} [W/m/K]	[0.3 - 5]
$h_{paroi-eau}$ [W/m ² /K]	[1 - 10]
$h_{paroi-eau}$ [W/m ² /K]	[50 - 500]
ϵ_w [-]	[0.3 - 0.9]

Tableau 2 : Range of variation of the parameters.

5.2. PARAMETER FITTING

Given the influential parameters, an optimization procedure was set up in order to minimize the discrepancy between the model and measurements. The minimization objective was set as the average RMSE of the tank water temperature and tank air temperature. Gradient-based procedures proved to be inefficient, hence a basic genetic algorithm for single objective problems from (Blank and Deb, 2020) was bluntly used in this first approach. As the computational burden was high with regard to the paper submission deadline, ten generations with ten individuals were computed. The default parameters of mutation, selection and crossover were used and will be investigated in further works. A convergence indicator also needs to be implemented to evaluate the progress of the algorithm, *e.g.* the computation of the hypervolume. In the current problem, using a heuristic initialisation of the population with the combinations of parameters yielding the best RMSE obtained from the sensitivity analysis stage may allow to save some computational effort.

The optimum set of parameters is presented in Table 3, showing that an enhancement in heat transfer from the ground to the water helps matching the data. The initial values were hence conservative with regard to the results obtained. Notably, the optimized thermal conductivity is high compared to typical ground conductivity. The RMSE is 0.91 [K] for the tank water temperature and 1.61 [K] for the tank air temperature, meaning the discrepancy was reduced by ~ 0.3 [K] in both cases compared to the initial results.

ρ^* [kg/m ³]	λ [W/m/K]	$h_{cv,a}$ [W/m ² /K]	h_w [W/m ² /K]	$h_{w,a}$ [W/m ² /K]
2017	4.39	5.16	359	5.58

Tableau 3 : Values of the influential parameters that minimize the RMSE : water, air temperatures inside the tank

The RMSE of the supply air temperature, of the inlet and outlet temperature at the water-to-water HX are also reduced using the fitted parameters (~ 0.95 [K] for each of them). The reduction of the discrepancies between the operational and simulated data will also be undertaken with a complexification the model, for example using a zonal model for the tank, using heat exchanger plume or boundary layers equations, as per (Kenjo et al., 2007).

6. CONCLUSION

This work deals with passive cooling using rainwater tanks as a means to evacuate heat from the outdoor air supplied into dwellings. A fully instrumented prototype serves as a basis to

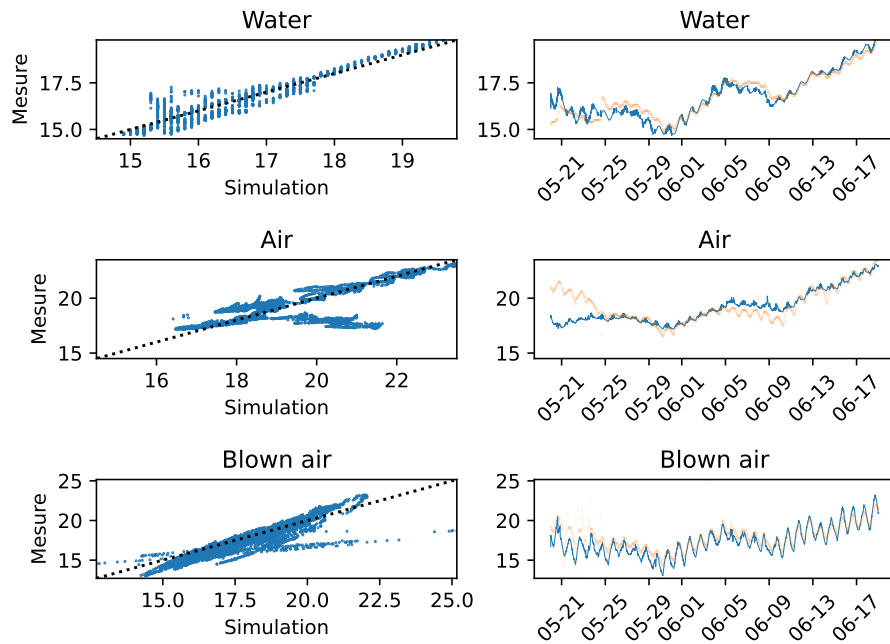


Figure 8 : Comparison of the measured and simulated temperatures (left) and evolution of the temperatures over time with fitted parameters (right)

establish and validate a numerical model.

A sensitivity analysis led on the model allowed to identify its influential parameters, namely the ground properties and convection coefficients around the tank. As a sequel a parameter fit procedure allowed to minimize the discrepancy between the model and measurements to less than ≤ 1 [K] for the tank water temperature.

Noticeably, influential parameters are the ones that are difficult to obtain with precision : the ground properties depend on moisture and composition and are often not precisely known. The purpose of this ongoing research being the derivation of sizing rules for such systems, a particular care should be adopted regarding the hypothesis upon soil properties in future developments.

Other influential parameters of the model are convection coefficients, which depend much on the geometrical configuration, rugosity and fluid temperature difference, amongst other parameters. The tank model is currently improved by the addition of thermal zones with a zonal approach. On the experimental side, measurements are currently made with buoyant temperature sensors immersed at a constant depth from the water surface to capture stratification in a more precise way.

REMERCIEMENTS

The authors would like to thank the ADEME as funding partner for this research, as well as the Gasnier family for their trust and for providing a full access to their experimental set up. May P^r Inard also be warmly thanked for his precious insights about the use of zonal models in the context of this work.

BIBLIOGRAPHIE

- ADEME (2021). La climatisation dans le bâtiment. Technical report, ADEME and Coda Strategies.
- AFPG (2023). La géothermie en France - Etude de filière 2023. Technical report, Association Française des Professionnels de la Géothermie (AFPG).
- Auer, T. (1996). Trnsys-type 344 : Assessment of an indoor or outdoor swimming pool.
- Bayer, P., Attard, G., Blum, P., and Menberg, K. (2019). The geothermal potential of cities. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 106 :17–30.
- Blank, J. and Deb, K. (2020). pymoo : Multi-objective optimization in python. *IEEE Access*, 8 :89497–89509.
- Communauté d'Agglomération de Haguenau (2017). Plan Local d'Urbanisme - Annexe III : Annexes Sanitaires : Assainissement. Technical report, Communauté d'Agglomération de Haguenau, Haguenau, France.
- Gan, G., Riffat, S. B., and Chong, C. (2007). A novel rainwater-ground source heat pump – Measurement and simulation. *Applied Thermal Engineering*, 27(2-3) :430–441.
- Hens, H. (2009). Indoor climate and building envelope performance in indoor swimming pools. *Energy efficiency and new approaches*, pages 543–552.
- Kalz, D. E., Wienold, J., Fischer, M., and Cali, D. (2010). Novel heating and cooling concept employing rainwater cisterns and thermo-active building systems for a residential building. *Applied Energy*, 87(2) :650–660.
- Kenjo, L., Inard, C., and Caccavelli, D. (2007). Experimental and numerical study of thermal stratification in a mantle tank of a solar domestic hot water system. *Applied thermal engineering*, 27(11-12) :1986–1995.
- Marco Marigo, Enrico Prativiera, Sara Bordignon, Michele Bottarelli, and Angelo Zarrella (2021). Analysis of the thermal performance of a water storage cell with helical shaped pipe for ground source heat pumps. In *Proc. IBPSA Bruges 2021*, page 8, Bruges, Belgium.
- Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, A., Connors, S. L., Péan, C., Berger, S., Caud, N., Chen, Y., Goldfarb, L., Gomis, M. I., Huang, M., Leitzell, K., Lonnoy, E., Matthews, J. B. R., Maycock, T. K., Waterfield, T., Yelekçi, O., Yu, R., and Zhou, B., editors (2021). *Climate Change 2021 : The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Morris, M. D. (1991). Factorial sampling plans for preliminary computational experiments. *Technometrics*, 33(2) :161–174.
- Striegel, L., Bouvenot, J.-B., Walther, E., and Nowamooz, H. (2023). Experimental and numerical study of geothermal rainwater tanks for buildings passive cooling. In *Proceedings of ECOS 2023*, pages 933–943.
- Upshaw, C. R., Rhodes, J. D., and Webber, M. E. (2017). Modeling electric load and water consumption impacts from an integrated thermal energy and rainwater storage system for residential buildings in Texas. *Applied Energy*, 186 :492–508.
- Yano, M., Penn, J. D., Konidaris, G., and Patera, A. T. (2012). Math, numerics, & programming (for mechanical engineers).

Programme Diane : Retour d'expérience sur les niveaux de déperditions thermiques mesurées en maison neuve avec la méthode ISABELE

Simon THÉBAULT*¹, Myriam HUMBERT²

¹ Centre Scientifique et Technique du Bâtiment
24 rue Joseph Fourier, 38400 Saint-Martin-d'Hères

² Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement, 9 rue René Viviani 44200 Nantes

*simon.thebault@cstb.fr

RESUME. Un des leviers de la lutte contre le dégèlement climatique est la mesure de la performance réelle des bâtiments, afin de garantir leur consommation énergétique. Ainsi l'objectif du projet DIANE est de réaliser un premier retour d'expérience sur la mesure de la performance réelle des maisons individuelles neuves. Cette expérimentation mobilise la méthode ISABELE (In-Situ Assessment of the Building Envelope pERformances) qui permet d'obtenir la mesure du niveau de transmission thermique d'un bâtiment Htr ainsi que son incertitude.

Sur l'échantillon de 25 maisons neuves RT2012 mesurées in situ à réception, on observe de manière très nette deux groupes de performance de transmission thermique mesurée: un premier pour lequel le niveau d'isolation atteint est bien celui prévu par la note de calcul thermique réglementaire, et un second, majoritaire, avec des écarts entre le calcul et la mesure significatifs.

MOTS-CLÉS : mesure in situ, transmission thermique, modèle inverse

ABSTRACT. One of the key factors for reducing climate change is to measure the actual performance of buildings, in order to guarantee their energy consumption. The aim of the DIANE experimental program is therefore to provide initial feedback on the actual performance of new single-family homes, using one of the R&D innovative approaches for measuring the overall insulation of the building envelope, ISABELE (In-Situ Assessment of the Building Envelope pERformances) method. This provides a measurement of a building's thermal transmittance Htr and its uncertainty.

The in situ measurements of 25 new houses clearly show two groups of measured thermal transmittance performance: a first group for which the level of insulation achieved is indeed that predicted, and a second group, the majority, with significant discrepancies between calculation and measurement.

KEYWORDS : in situ measurement, thermal transmittance, inverse modelling

1. INTRODUCTION

La construction très performante et le soutien à la massification de la rénovation énergétique constituent des leviers importants à la réduction des consommations d'énergie dans le secteur du bâtiment, et par extension à l'atténuation du changement climatique et de la précarité énergétique. Ceci suppose l'engagement de l'ensemble des acteurs de la filière, ainsi que d'apporter sécurité et confiance sur les performances énergétiques réellement atteintes. Sur ce second point, la capacité à mesurer ces performances réelles est essentielle et permet de passer d'une logique d'exigence de résultats calculés vers une logique d'exigence de résultat de performance réelle mise en œuvre.

Cependant, la mesure de la performance énergétique réelle d'un bâtiment n'est pas une notion simple, car elle dépend de nombreux paramètres (conditions climatique, conditions d'usage des occupants, et performance intrinsèque de l'enveloppe et des systèmes énergétiques).

Dans le cadre de cet article, nous nous concentrons sur la mesure de la performance réelle de l'isolation thermique globale de l'enveloppe d'un bâtiment, celle-ci jouant un rôle déterminant dans les consommations de chauffage en France métropolitaine. Face à ce besoin de mesure de la performance de l'enveloppe de multiples méthodes ont été développées pour un déploiement in situ tel que les méthodes : coheating (Johnston et al. 2013; Johnston, Miles-Shenton, and Farmer 2015), EBBE (CEREMA and ADEME 2018), QUB (Meulemans et al. 2017), et plus récemment SEREINE (Juricic et al. 2023), SmartHTC (Jack et al. 2021) et Veritherm (Baxter et al. 2021).

Cet article présente la contribution du déploiement de la méthode ISABELE en maison individuelle neuve dans le cadre du programme d'expérimentation DIANE (ADEME 2022) copiloté entre 2019 et 2022 par le CSTB et le Cerema dont l'objectif était de réaliser un premier retour d'expérience sur la performance réelle des maisons individuelles neuves. Il s'agissait de répondre aux questions suivantes : quel est le niveau de performance réellement atteint in-situ ? A partir de quand l'écart entre le calcul théorique du Htr et sa mesure peut être qualifié de significatif et montre que la performance prévue n'est pas atteinte ?

2. METHODOLOGIE DE MESURE DU COEFFICIENT DE DEPERDITION THERMIQUE

La méthode *ISABELE* (Boisson and Bouchié 2014; Thébault and Bouchié 2018) développée par le CSTB a été utilisée pour la mesure du coefficient de déperdition par transmission et son incertitude associée. Son principe général consiste à chauffer le bâtiment et mesurer sa réponse dans le temps, de manière à remonter par analyse aux caractéristiques thermiques globales de l'enveloppe.

2.1. PROTOCOLE EXPERIMENTAL

Cette mesure est réalisée sur une période courte (2 à 4 jours) à l'issue des travaux sur bâtiment inoccupé. Préalablement, toutes les protections solaires mobiles (stores, volets roulant ou battants, etc.) sont fermées, le système de ventilation est stoppé, les ouvertures sont fermées ou obturées selon les recommandations pour la réalisation d'un test d'étanchéité à l'air (suivant la norme NF EN ISO 9972).

Le dispositif de mesures intérieures et extérieures est mis en place à l'aide d'un kit d'instrumentation dédié constitué de modules intérieurs et extérieurs communiquant avec un concentrateur assurant la remontée des données vers une interface dédiée. La Figure 1 suivante donne un aperçu du kit d'instrumentation ISABELE.



Figure 1: Kit d'instrumentation ISABELE

L'essai se déroule en 3 phases sur une durée de 4 jours :

- Une phase d'évolution libre : la température intérieure de la maison est libre (chauffage éteint),
- Une phase de chauffage : les convecteurs sont allumés pour chauffer la maison à une température de 10 degrés supérieure à la température extérieure moyenne,
- Une phase de refroidissement libre : arrêt du chauffage

2.2. METHODE D'ANALYSE DES DONNEES

La méthode d'analyse, détaillée dans l'article (Thébault and Bouchié 2018), consiste à identifier différents modèles simplifiés de comportement thermique du bâtiment (réseaux RC équivalents) par optimisation (méthode inverse), en utilisant l'ensemble des données mesurées au cours du test ainsi que les données caractéristiques du bâtiment (fichier descriptif et résultat du test d'étanchéité à l'air). Le modèle simplifié le plus approprié est sélectionné sur des critères statistiques (ratio de vraisemblance). Dans son approche, la méthode présente des similitudes avec la méthode de Bacher (Bacher and Madsen 2011)

La valeur des résistances du modèle optimal permet alors de remonter à la valeur du coefficient de transmission thermique H_{tr} , (en W/K , représentant le niveau d'isolation thermique global de l'enveloppe), et son équivalent U_{bat} (en $W/(m^2.K)$ de surface déperditive).

Une propagation d'incertitude est ensuite réalisée via une méthode de Monte Carlo couplée à l'utilisation des variances/covariance des résistances identifiées par le modèle optimal. Cette méthode permet de considérer l'ensemble des sources d'erreur (à la fois aléatoires et systématiques) des conditions limites utilisées.

De manière aléatoire, et lorsque l'écart avec la note de calcul thermique s'avère important, une vérification de la note de calcul thermique est réalisée pour identifier d'éventuelles sources d'écart explicables par les hypothèses de calcul.

3. PRESENTATION DE L'ÉCHANTILLON

Le programme DIANE a permis la collecte de mesures sur un échantillon de 25 maisons individuelles neuves RT2012. La plupart des maisons sélectionnées présentent le mode constructif le plus représentatif de la maison individuelle neuve en France, soit parpaing + isolation par l'intérieur (93.5% des maisons construites entre 2012 et 2020). Les critères de sélection des maisons étaient liés aux contraintes de mesure : non mitoyenne avec un bâtiment/local chauffé, Revêtements de sol posés (sur chappe/dalles) à la date du test pour éviter la consommation de chauffage due au séchage de la dalle, surface habitable de 80 à 120 m², alimentation électrique pour l'expérimentation à l'aide du tableau électrique final d'une puissance de 6 kVA minimum et enfin la maison devait être libre et sans occupation pendant au moins 5 jours consécutifs.

La Figure 2 présente une cartographie des opérations ayant fait l'objet d'une mesure enveloppe exploitable sur le territoire.



Figure 2 : Cartographie des essais ayant fait l'objet d'une mesure du niveau d'isolation de l'enveloppe exploitable

4. RESULTATS ET ANALYSE

La Figure 3 présente pour l'ensemble des opérations, les écarts entre le calcul de conception et la mesure in situ constatés avec leurs densités de probabilité. On voit qu'il est possible de classer les résultats dans trois catégories en fonction de l'écart entre le calcul et la mesure : écart faible (borne supérieure d'incertitude en dessous de 35 %), significatif (de 35% à 75%) et très significatifs (au-delà de 75%), la couleur représentant le niveau d'écart.

Sur les 25 opérations mesurées, il est intéressant de noter qu'une opération sur cinq est à la cible visée, tandis que 4 opérations sur cinq présentent des écarts défavorables significatifs à très significatifs (+25% à +80% de déperdition supplémentaire en moyenne).

Un autre graphique en Figure 4 présente les écarts mesure/calcul en performance absolue, avec comme élément de comparaison les seuils de performance du Ubat définis par le nouveau DPE (Légifrance 2021). Pour l'ensemble des cas, les valeurs des Ubat calculés se situent toutes dans la zone « très bonne performance » tandis que les valeurs mesurées indiquent une dispersion beaucoup plus grande (de « très bonne » à « moyenne »).

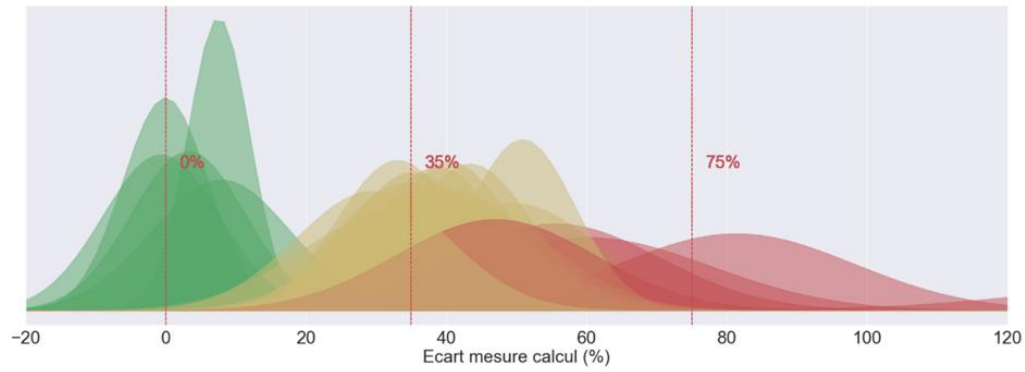


Figure 3 : Visualisation de l'écart mesure-calcul de l'indicateur U_{bat} sur les 25 opérations mesurées de l'expérimentation DIANE

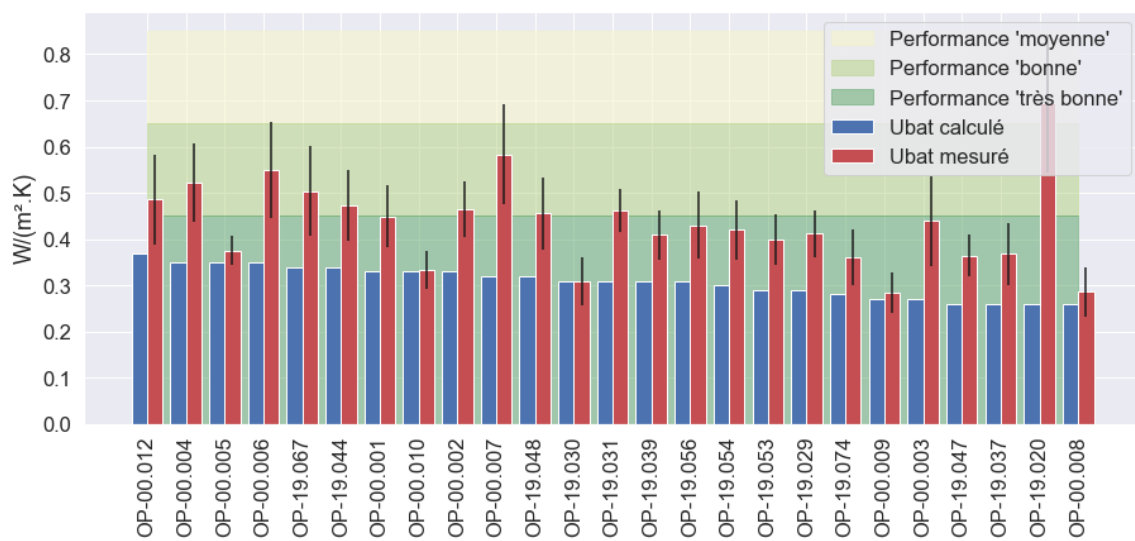


Figure 4 : Visualisation des niveaux de performance calculés et mesurés de l'indicateur U_{bat} sur les 25 opérations mesurées de l'expérimentation DIANE

Quelques erreurs de calcul thermique du U_{bat} ont été identifiées sur un sous-échantillon de 14 opérations spécifiques (ponts thermiques négligés, erreurs de surface, oubli de portes, etc.) mais le recalcul du U_{bat} indique globalement des différences à la marge au regard de l'écart mesure/calcul (ADEME, CSTB, and Cerema 2022). Cependant, deux points essentiels potentiellement responsables de cet écart n'ont pas pu être investigués : la vérification de la conformité des produits mis en œuvre, et la vérification des mètres par mesures in situ (notamment sur la surface des fenêtres)

Les autres écarts potentiels ne relèvent pas du calcul mais de la mise en œuvre (défaut d'exécution, ou exposition à l'humidité/ou pluie des isolants). Il n'apparaît pas de corrélation notable entre le niveau de performance attendu et l'écart mesure/calcul. Cependant il est intéressant de noter que sur les 5 opérations présentant un écart faible, 3 d'entre elles ont été réalisées dans le cadre d'une démarche de certification CERQUAL (ADEME, CSTB, and Cerema 2022).

Concernant les opérations dont l'écart est très significatif (courbes rouges en Figure 3), une inspection sur trois d'entre elles (OP-00.003, OP-00.006 et OP-19.020) a permis d'identifier de manière qualitative des causes évidentes contributives de l'écart calcul mesure constaté, notamment :

- L'utilisation de produits non conformes dont les propriétés thermiques des isolants étaient moins performantes que prévues (OP-00.003 : isolants moins épais et moins performants que prévus sur certains murs, performance plus faible que prévue pour les menuiseries installées),
- La non prise en compte de ponts thermiques de liaison (OP-00.003 : liaison plancher bas / refend)
- Une mauvaise mise en œuvre générant des ponts thermiques (OP-00.006 : tassement / pose mal soignée de l'isolant dans les combles, liaison combles/paroi extérieure mal traitée),
- Des défauts d'isolation plus ou moins importants (OP-19.020 : cas extrême pour laquelle l'isolation des combles n'avait pas été réalisée).

5. DISCUSSION ET RESULTATS COMPLEMENTAIRES

Pour répondre à la question du niveau de performance réellement atteint in situ, l'expérimentation DIANE montre d'abord que la mesure de la transmission thermique en maison neuve est supérieure ou égale à la transmission thermique calculée. (cf. Figure 4) ce qui rejoint la tendance de précédentes études réalisées par le passé par la méthode coheating en Angleterre (Johnston, Miles-Shenton, and Farmer 2015) et la méthode EBBE en France (CEREMA and ADEME 2018).

Les mesures montrent aussi que le niveau de performance calculé peut être réellement atteint in situ, toutefois sur un nombre limité de cas. Enfin, on peut noter comme montré dans la partie 4 – figure 3, que l'écart entre le calcul théorique du Htr et sa mesure peut être qualifié de significatif lorsque la borne supérieure de l'incertitude dépasse 35% (limite en deçà de laquelle on peut considérer que la performance mesurée est à la cible, aux incertitudes près). Dans ce cas on peut affirmer que la performance prévue n'est pas atteinte. Ces mesures peuvent être mise en perspective avec celles du projet PROFEEL Sereine mené en parallèle (2017–2021), dont le protocole et la méthode d'analyse de données, plus optimisés, se rapprochent de la méthode ISABELE (Juricic et al. 2023). Celui-ci concernait principalement des maisons rénovées. Il visait à développer un protocole de mesure à réception adapté à la rénovation et à l'expérimenter sur des premières opérations.

Sur les 35 maisons mesurées, seules 5 possédaient un calcul thermique réglementaire (dont une neuve et une avant rénovation, voir Figure 5). Toutefois il est intéressant de mettre en perspective ces 5 opérations avec celles de l'expérimentation DIANE.

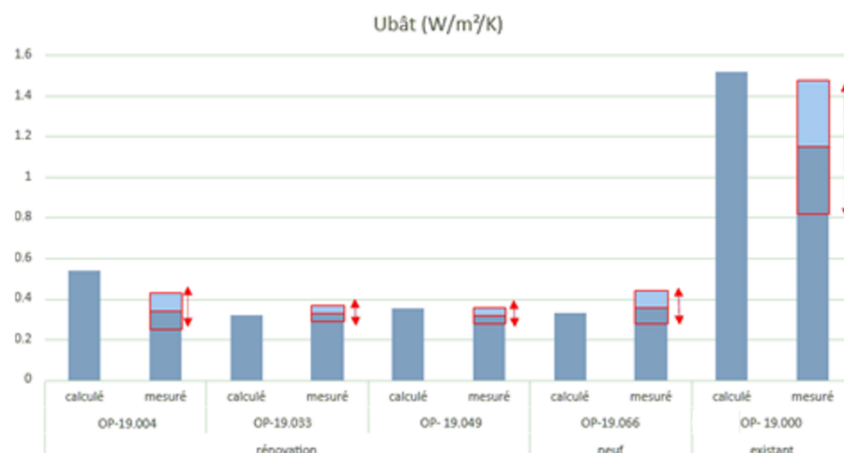


Figure 5 : Visualisation des niveaux de performance calculés et mesurés de l'indicateur $U_{bât}$ sur les 5 opérations Sereine ayant un calcul thermique

Sur cet échantillon, la mesure concorde bien avec le calcul pour 3 opérations sur 5. Sur deux maisons, on observe même un Ubat mesuré plus faible que celui calculé, ce qui n'a pas été observé dans l'échantillon DIANE. Cela peut s'expliquer par les incertitudes sur la composition des parois que l'on retrouve dans l'existant ou le bâti rénové et qui ne sont pas présentes dans le neuf car la composition des parois est connue. Par exemple, pour l'opération OP-19.004, l'incertitude sur le calcul est certainement importante car la composition d'une paroi mitoyenne supposée en brique n'était pas connue (la résistance thermique d'un mur en brique pouvant varier du simple au double, -de 0.4 à 0.8 m².K/W- (Goustille 2024). Pour l'opération OP 19.000, l'écart est certainement là aussi dû à l'incertitude sur les matériaux existant (présence de parpaing creux ou plein par exemple).

Enfin, la présence d'un calcul thermique réalisé pour la rénovation de ces 5 maisons, indique que ces travaux ont été réalisés soit par des maîtres d'ouvrage professionnels, soit dans une démarche de certification nécessitant un calcul thermique. Cela semble favoriser l'obtention de bons résultats de mesure conforme aux attentes, et confirme les premières observations faites sur les opérations certifiées DIANE.

6. CONCLUSION

L'expérimentation DIANE a été la première campagne de mesure sur la performance thermique de l'isolation globale de l'enveloppe réalisée en France sur la maison individuelle neuve. Elle montre, que sur l'échantillon mesuré de 25 maisons neuves de même mode constructif, représentative du parc neuf, le résultat de la mesure est toujours supérieur au calcul, et dans une majorité de cas de manière significative. Alors que les calculs réglementaires prévoyaient des valeurs de Ubat de niveau "très bon" selon l'échelle du DPE, les valeurs mesurées varient de "très bon" à "moyen".

Ces résultats ont aussi été mis en regard des premières mesures PROFEEL Sereine : en rénovation, on peut observer dans certains cas une performance mesurée meilleure que le calcul. Cela est dû aux caractéristiques des parois initiales mal connues et à des valeurs par défaut réglementaires plutôt pénalisantes.

Les démarches de certification sembleraient mener à une performance mesurée proche de celle calculée, certainement grâce à un meilleur suivi. L'échantillon est toutefois trop petit pour généraliser.

Ce retour d'expérience du programme DIANE sera à compléter avec les résultats du programme PROFEEL Sereine 2 (2022-2024) en cours qui porte sur la mesure de la performance in-situ à réception aussi bien de maisons neuves que de maisons rénovées.

7. REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient l'ADEME et le Ministère de la Transition écologique et solidaire pour leur soutien financier au programme DIANE, ainsi que l'AQC ayant permis de développer le protocole opérationnel basé sur ISABEL dans le cadre du programme PACTE MERLiN. Merci aussi à CERQUAL pour la mise à disposition de ses expérimentations pour DIANE et aussi au programme PROFEEL Sereine et à ses partenaires – AQC, CSTB, Cerema, INES, Mines-ParisTech, COSTIC, USMB - pour la mise à disposition des données de mesures Sereine.

8. BIBLIOGRAPHIE

- ADEME, CSTB, and Cerema. 2022. “Mesure de La Performance Énergétique Des Bâtiment – Application à La Maison Individuelle – Programme DIANE : Déploiement Nationale de Mesure in Situ Des Performances Energétiques Des Bâtiments.” ADEME. <https://librairie.ademe.fr/urbanisme-et-batiment/5620-mesure-de-la-performance-energetique-des-batiments.html>.
- Bacher, Peder, and Henrik Madsen. 2011. “Identifying Suitable Models for the Heat Dynamics of Buildings.” *Energy Build.* 43 (7): 1511–22. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.02.005>.
- Baxter, Paul, Simon Jordan, Emma Lewis, Sue Western, and Nathan Wrench. 2021. “Veritherm System Overview and Verification Results.” Cambridge Consultants. <https://veritherm.co.uk/wp-content/uploads/2021/05/Validation-Report-P3577-R-001-v1.0.pdf>.
- Boisson, P, and R Bouchié. 2014. “ISABELE Method : In-Situ Assessment of the Building Envelope Performances.” In *9th Int. Conf. Syst. Simul. Build.*, 1:1–20. Liege.
- CEREMA, and ADEME. 2018. “Bâtiments démonstrateurs à basse consommation énergie - Enseignements de 141 constructions et rénovations du programme PREBAT – 2012-2017.”
- Goustille. 2024. “Tableau Des Conductivités Thermiques Des Matériaux - Réseau Canopé - Banque de Ressources RESO d’AVENIR(s).” Onisep. https://www.reseau-canope.fr/etincel/system/files/BIM-sequences/GoustilleS1-Maison-Habitat/Seance1/S1M4-DT04_Conductivites_resistances_thermiques_materiaux.pdf.
- Jack, Richard, Luke Smith, Richard England, and Adam Low. 2021. “SmartHTC Validation Report.” Build Test Solutions. <https://www.buildtestsolutions.com/files/62d7f83708601f8b97c3fca7781399d9fde132f3.pdf>.
- Johnston, David, Dominic Miles-Shenton, Damid Farmer, and Jez Wingfield. 2013. “Whole House Heat Loss Test Method (Coheating).”
- Johnston, David, Dominic Miles-Shenton, and David Farmer. 2015. “Quantifying the Domestic Building Fabric ‘Performance Gap.’” *Build. Serv. Eng. Res. Technol.* 36 (5): 614–27.
- Juricic, Sarah, Mickaël Rabouille, Arnaud Challanonnex, Arnaud Jay, Simon Thébault, Simon Rouchier, and Rémi Bouchié. 2023. “The Sereine Test: Advances towards Short and Reproducible Measurements of a Whole Building Heat Transfer Coefficient.” *Energy and Buildings* 299 (November): 113585. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113585>.
- Légifrance. 2021. *Arrêté Du 31 Mars 2021 Relatif Au Diagnostic de Performance Énergétique Pour Les Bâtiments Ou Parties de Bâtiments à Usage d’habitation En France Métropolitaine. NOR. Vol. LOGL2033917A.* <https://www.legifrance.gouv.fr/eli/arrete/2021/3/31/LOGL2033917A/jo/texte>.
- Meulemans, Johann, Florent Alzetto, David Farmer, and Christopher Gorse. 2017. “QUB/e: A Novel Transient Experimental Method for in Situ Measurements of the Thermal Performance of Building Fabrics.” In *Building Information Modelling, Building Performance, Design and Smart Construction*, 115–27. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-50346-2_9.
- Thébault, Simon, and Rémi Bouchié. 2018. “Refinement of the ISABELE Method Regarding Uncertainty Quantification and Thermal Dynamics Modelling.” *Energy and Buildings* 178 (November): 182–205. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.08.047>.

Analyse comparative de solutions pour améliorer le confort thermique d'un bâtiment résidentiel neuf en climats futurs tout en limitant l'impact carbone

Adrien Toesca¹, Anaïs Machard^{1*}, Pierrick Gervasi², Vincent Parternay³, Laurent Reynier², Georgios Kyriakodis³

CSTB, Direction Energie Environnement,

¹ 24 rue Joseph Fourier, 38400 Saint-Martin-d'Hères

² 84 Avenue Jean Jaurès, Champs-sur-Marne, 77447 Marne-la-Vallée cedex 2

³ 290 route des Lucioles - BP 209, 06904 Sophia Antipolis Cedex

*anaïs.machard@cstb.fr

Cet article présente une étude comparative de solutions pour limiter les surchauffes dans un bâtiment neuf, avec une évaluation du confort d'été dans les logements et de l'impact carbone des différentes solutions dans les villes de Nîmes et Paris, en tenant compte des conditions climatiques actuelles et futures ainsi que de l'effet de l'îlot de chaleur urbain. Les solutions évaluées sont les protections solaires mobiles et fixes, les brasseurs d'air, des pompes à chaleur et une solution de rafraîchissement évaporatif indirect. Les résultats de l'étude mettent en évidence que, parmi les différentes solutions testées, les brasseurs d'air, la solution de refroidissement évaporatif indirect et la PAC air-eau collective émergent comme des stratégies particulièrement efficaces pour améliorer le confort thermique tout en limitant l'impact carbone en comparaison à l'utilisation de PAC air-air à l'échelle des logements.

MOTS-CLÉS : Confort estival, Analyse de Cycle de Vie, Changements Climatiques.

This article presents a comparative study of summer thermal comfort and carbon impact between the cities of Nîmes and Paris, considering current and future climatic conditions as well as the urban heat island effect. Different conventional solutions such as mobile and fixed solar shading, air fans or heat pumps, and an innovative indirect evaporative cooling solution are evaluated. The results of the study show that, among the various solutions tested, air fans, indirect evaporative cooling, and water-to air heat pump emerge as particularly effective strategies for improving thermal comfort while limiting carbon impact, compared with the use of air-to-air heat pumps.

KEYWORDS: Summer comfort, Life Cycle Assessment, Climate change

1. INTRODUCTION

La France subit depuis deux décennies une augmentation de la fréquence et de l'intensité des vagues de chaleur, augmentation qui va se poursuivre dans le futur du fait du changement climatique (Perkins-Kirkpatrick et Lewis 2020). En parallèle, le secteur du bâtiment étant responsable de plus d'un tiers des émissions mondiales de gaz à effet de serre (Nielsen et al. 2016), la réglementation environnementale 2020 (RE2020) a introduit un indicateur carbone associé à une valeur seuil maximale à respecter pour limiter le poids carbone des nouveaux bâtiments construits. Alors qu'il apparaît urgent d'exiger une réévaluation profonde des pratiques de conception et de rénovation dans le secteur du bâtiment, il devient de plus en plus complexe de traiter à la fois les problématiques d'atténuation du changement climatique et d'adaptation aux fortes chaleurs lors de la conception ou de la rénovation d'un bâtiment. Cet article présente une partie des résultats du projet ICARE réalisé en partenariat avec l'entreprise EDF, qui propose une évaluation multicritère de différentes solutions, classiques et innovantes, passives et actives, pour améliorer le confort d'été des bâtiments tout en limitant leur impact carbone.

2. METHODOLOGIE

2.1. DONNEES CLIMATIQUES

Les données de projections climatiques utilisées dans ce travail sont issues du projet CMIP5 (5th Coupled Model Intercomparison Project). Pour cette étude, l'horizon à moyen terme est considéré (période entre 2036 et 2065) pour le scénario RCP8.5 ("Representative Concentration Pathway" : Trajectoire de Concentration Représentative). Afin de considérer l'incertitude liée aux modèles climatiques, deux modèles de climat sur seize analysés ont été retenus : Le modèle CNRM-CM5, qui projette un réchauffement modéré pour la France en été à l'horizon 2050 et le modèle GFDL-CM3, qui projette un très fort réchauffement pour la France en été au même horizon. Les données climatiques ont été corrigées de leur biais en utilisant les données de réanalyse ERA5. Les fichiers météorologiques ont été préparés par EDF R&D. Deux types de fichiers météorologiques futurs ont été reconstitués : une année type et une canicule. L'année type est construite sur la période 2036-2065. La méthode utilisée consiste à sélectionner dans les années projetées avec chacun des deux modèles l'année dont l'évolution de la température se rapproche le plus de celle de la moyenne climatologique des deux modèles sur la période, au sens de la distance euclidienne. Pour sélectionner une séquence caniculaire, il a été décidé de définir une canicule en adaptant la méthode proposée par (Khan et al. 2019) : un évènement de température maximum journalière dépassant le 98ème percentile de la distribution des températures maximales quotidiennes du modèle CNRM. Parmi l'ensemble de ces séquences identifiées, la canicule ayant l'intensité maximale comparée à toutes les canicules de la période a été sélectionnée.

2.2. DESCRIPTION DU BATIMENT SERVANT DE CAS D'ETUDE

Le bâtiment étudié est un bâtiment de logements collectifs neuf correspond aux standards d'isolation de la RT-2012, de type R+2 sur terre-plein, avec toiture terrasse. Il est composé à chaque étage de 3 logements quasi identiques correspondant à un logement T3 de 66 m². A chaque étage, deux logements sont non traversants et le troisième logement est traversant, distinct des deux autres par la présence de surfaces vitrées ouvrables aux deux extrémités du salon. La Figure 1 permet de visualiser le bâtiment. L'enveloppe du bâtiment a été définie selon un optimum coût/énergie au regard de la RT2012. Le niveau d'isolation dépend donc de la zone géographique étudiée. Par ailleurs, en zone H1a le bâtiment dispose d'une isolation extérieure, alors que l'isolation est intérieure en zone H3. Le Tableau 1 donne les valeurs de U des différentes parois opaques et vitrées du bâtiment.

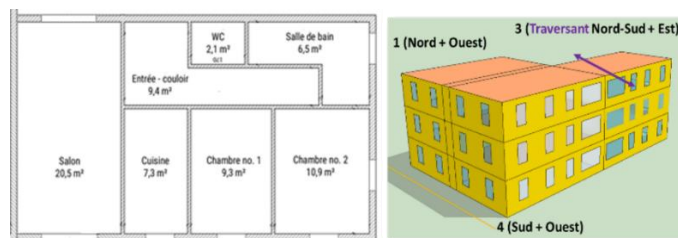


Figure 1: description du bâtiment (plan des logements sur la gauche et modélisation 3D du bâtiment sur la droite)

Tableau 1 : composition des Uparoi et Uvitrage [$W/m^2.K$] pour les climats H1a et H3

H1a (Paris)				H3 (Nîmes)			
Vitrage	Mur extérieur	Plancher bas	Toiture terrasse	Vitrage	Mur extérieur	Plancher bas	Toiture terrasse
0.95	0.23	0.35	0.11	0.95	0.34	0.41	0.34

2.3. SOLUTIONS EVALUEES

Cette section présente les hypothèses de modélisation des différentes variantes évaluées dans le projet pour améliorer le confort estival. Il s'agit des variantes « casquette », « brasseurs d'air », « brasseur d'air réduit de nuit », « rafraîchissement adiabatique », « PAC air-air », « PAC air-eau ».

La variante « Casquette », considère l'ajout de casquettes horizontales de 0,8m de longueur sur les baies orientées à l'ouest et à l'est et de 1,2m de longueur sur l'orientation sud à Paris et 1m à Nîmes. Ces casquettes ont été dimensionnées afin de limiter les apports solaires entre le 21 mars et le 21 septembre en minimisant la perte de gains solaires l'hiver, à l'aide du diagramme solaire de chaque ville considérée, et du profil d'ombre des baies associées. Pour la variante « PM » (Protections Mobiles), le bâtiment est équipé sur toutes les baies sauf celles orientées Nord de stores extérieurs motorisés gérés manuellement conformément aux scénarios conventionnels de la RE2020.

Pour les variantes avec des brasseurs d'air, deux brasseurs sont installés dans le séjour et un dans chaque chambre. Les brasseurs ont 3 vitesses de fonctionnement, le choix de la vitesse étant fonction de la température opérative intérieure, elle suit un profil en hystérésis entre 26 °C (20% de la vitesse) et 30°C (100% de la vitesse). Pour la variante Brasseur réduit de nuit, le débit est limité à 20% du débit maximum (nuisance sonore) dans les chambres et la nuit (plus de détail dans l'annexe 7.1).

La variante « rafraichissement adiabatique indirect » est basée sur un modèle fourni par la start-up (Caeli-Energie). Le rafraichissement se fait par ajout d'humidité dans un échangeur avec deux canaux, un canal humide avec échange de masse et un canal sec avec échange de chaleur. Le système possède deux conduits d'air : un air rafraichi sans apport d'humidité dans le bâtiment, l'autre réchauffé et humidifié est rejeté à l'extérieur du bâtiment.

Deux types de pompes à chaleur (PAC) ont été testées : une PAC air/air individuelle pour chaque logement et une PAC air/eau collective. Les SEER des PAC sont aux alentours de 4,5 à Paris CNRM et 4 à Nîmes CNRM, les SCOP des années types futures sont autour de 5 à Paris et 5,3 à Nîmes.

2.4. CALCUL DES INDICATEURS CONFORT ET CARBONE

Le confort thermique est évalué à l'aide de deux indicateurs :

- l'indicateur DH réglementaire de la RE2020, qui calcule, à partir de la température opérative du bâtiment, l'inconfort cumulé en (°C.h) au-dessus de températures seuils : la journée, température seuil de confort adaptative entre 26°C et 28°C, la nuit, température fixe à 26°C.
- l'indicateur Standard Effective Temperature (SET) est également calculé en comparaison. Pour cette étude les hypothèses suivantes ont été considérées : l'activité « repos, debout » (70 W/m²) la journée et « repos couché » (40 W/m²) la nuit, une vêtue légère estivale (0,2 clo) (ISO 7730 2005). Une limite est de ne pas considérer l'isolation du matelas sur une moitié du corps pendant la nuit. Des seuils de « confort » sont définis pour la SET à 25,6°C la nuit et 30°C la journée (Tableau 2). L'indicateur SET_DH (°C.h) calcul l'inconfort cumulé au-dessus de ces seuils.

Tableau 2 : extrait de l'échelle Standard Effective Temperature (Gonzalez, Nishi, et Gagge 1974)

SET [°C]	Sensation Thermique	Etat Physiologique
22,2 – 25,6	Confortable et acceptable	Neutre
25.6 – 30	Un peu chaud, un peu inacceptable	Vasodilatation, petit débit de sudation
30 - 34.5	Chaud, inconfortable, inacceptable	Sudation

L'indicateur carbone utilisé est noté IC_{ICARE} et calculé avec la méthodologie ACV dynamique de la RE2020 comme suit : $IC_{ICARE} = IC_{PCE} + IC_{Energie}$

L'indicateur : IC_{PCE} représente l'impact carbone des produits de construction et équipements restreints à un périmètre pertinent pour la comparaison de variantes (ACV bâtiment non complète). Les impacts proviennent de fiches de la base INIES sélectionnées afin de représenter un composant générique pour chaque variante (voir annexe 7.3).

L'indicateur $IC_{Energie}$ représente l'impact carbone des consommations d'énergie du chauffage et du refroidissement (y compris consommation des brasseurs, système évaporatif indirect). Les impacts dépendent des usages et proviennent de la base INIES. Le réseau de chaleur urbain (RCU) est défini comme système de chauffage de référence pour les solutions passives et douces. Le facteur d'émission du RCU est de 91 gCO₂eq/kWh, il a été sélectionné via une régression linéaire sur les émissions ACV des réseaux de chaleur chaud en France, avec une valeur de 75%EnR (coefficient de détermination : 0.9). Les facteurs d'émission des pompes à chaleur sont de 79 gCO₂eq/kWh pour le chauffage et 64 gCO₂eq/kWh pour le refroidissement.

3. RESULTATS

3.1. ANALYSE DU CONFORT THERMIQUE ESTIVAL

3.1.1. Confort thermique du bâtiment de référence (sans variantes)

La Figure 2 présente les résultats de l'indicateur de confort DH pour les villes de Paris et Nîmes pour les climats ThD et Canicule_CNRM. A Paris, le bâtiment a également été simulé en considérant l'îlot de chaleur urbain (ICU) en suivant une méthodologie similaire à (Toesca et al. 2022) : en couplant à TRNSYS l'outil Urban Weather Generator (Bueno et al. 2013) qui modifie la température du fichier météorologique (paramétrage dans l'annexe 7.2), et en modélisant des masques solaires autour du bâtiment dans un contexte urbain (climats avec le suffixe « _UWG »).

Les résultats sont présentés sous la forme de boîte à moustache représentant les différents logements du bâtiment. Les moustaches présentent les valeurs maximums (le pire logement) et minimum (le meilleur logement). Pour chaque climat, 3 boîtes à moustaches sont présentées : le DH calculé uniquement durant le jour dans le séjour (en orange), le DH calculé uniquement durant la nuit (22h-07h) dans la pire chambre (en violet) et le DH_jour_nuit calculé comme la somme des deux précédents (en vert). Pour la ville de Paris, il est intéressant de constater que l'inconfort intervient particulièrement la nuit (box violet plus élevé que box orange) et ce pour tous les climats. Lorsque l'on considère l'ICU, et que l'on compare ses résultats à ceux des simulations sans ICU, l'inconfort augmente aussi bien la journée (principalement de 18h à 22h) que la nuit pour le climat ThD (différence entre ThD et ThD_UWG), alors que pour le climat CNRM, l'inconfort augmente beaucoup plus la nuit.

Si l'on considère les seuils de la RE2020 (représentés en pointillés pour les valeurs basses – 350 DH, et hautes – 1 250 DH), pour Paris sans ICU, il n'y a pas de problématique d'inconfort (les DH sont aux alentours de 350 DH) alors que lorsque l'on considère l'ICU, les DH augmentent fortement (plus du double) et l'inconfort devient problématique, et dépasse le seuil maximal règlementaire de 1250 DH pour le climat Canicule_CNRM_UWG. Pour la suite de l'étude, des solutions d'amélioration du bâtiment Parisien seront testées pour le climat CNRM_UWG.

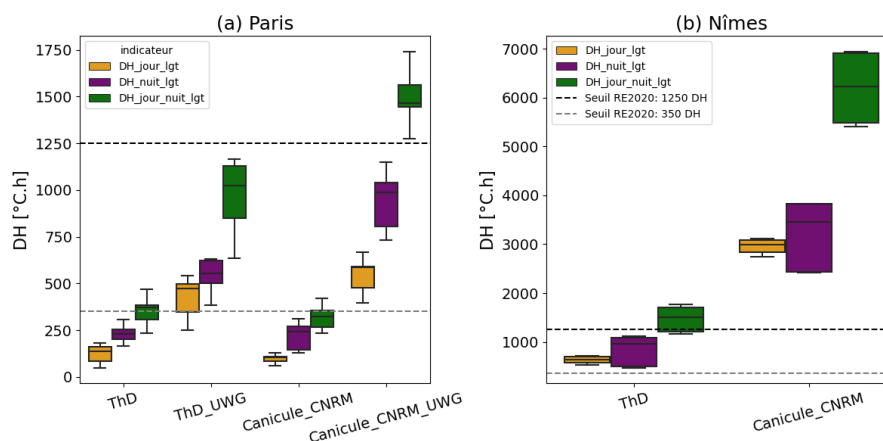


Figure 2 : Boxplot des DH jour, DH nuit et DH_jour_nuit pour les différents appartements du bâtiment pour les climats ThD et Canicule_CNRM avec et sans considération de l'ICU à Paris et les climats ThD et Canicule_CNRM à Nîmes

Pour la ville de Nîmes, les différences entre l'inconfort des climats ThD et Canicule_CNRM sont beaucoup plus marquées (du simple au triple). Dans les deux cas, l'inconfort a lieu à des niveaux comparables la journée et la nuit. Pour la météo Nîmes ThD, seul le logement le plus frais du bâtiment (le rez-de chaussée traversant) est aux alentours du seuil 1250 DH. Pour la météo Nîmes CNRM, l'inconfort est extrême pour le bâtiment de référence, c'est pourquoi des solutions d'amélioration seront analysées pour ce climat. Ces résultats sont en accord avec une étude précédente identifiant la surchauffe à Paris et à Nîmes (Machard et al. 2023).

3.1.2. Comparaison du confort thermique apporté par les variantes

Pour la suite de l'analyse un certain nombre de variantes individuelles sont analysées pour réduire l'inconfort du bâtiment pour les climats CNRM (avec considération de l'ICU pour Paris).

La Figure 3a) et b) présente des boxplot de DH_jour_nuit (somme du jour dans le séjour et de la nuit dans la pire chambre) pour tous les logements. Chaque boxplot présente les résultats pour une variante améliorant le confort. La Figure 3c) compare les niveaux de confort calculés avec l'indicateur DH le jour et la nuit pour le pire logement du climat Nîmes CNRM, avec l'indicateur SET_DH, pour le jour et la nuit également.

Toutes les variantes étudiées permettent de réduire l'inconfort par rapport au bâtiment neuf de référence. Les deux premières solutions (casquettes et PM) ont pour objectif de limiter les apports solaires entrant dans le bâtiment. Avec les scénarios de gestion des PM de la RE2020 (plutôt vertueuse), l'utilisation des PM est plus efficace que celle des casquettes et permet de réduire les DH de 40% en moyenne pour les deux climats (contre 18% pour les casquettes).

L'utilisation des brasseurs d'air avec la vitesse limitée la nuit à 20% n'est pas plus efficace que les PM pour réduire l'inconfort à Paris ICU car l'inconfort est ressenti principalement durant cette période (cf. Figure 2). A Nîmes, l'inconfort mesuré par l'indicateur DH a lieu aussi bien la nuit que la journée donc le brasseur, même dans sa version réduit de nuit, est efficace pour limiter l'inconfort (sans prise en compte de l'ICU cependant). Sans la limitation de vitesse la nuit (variante Brasseur), le brasseur est très efficace aussi bien à Paris qu'à Nîmes et permet de réduire l'inconfort de 76% en moyenne. Cela peut s'expliquer par le fait que les vitesses d'air du brasseur atteignent jusqu'à 1,4 m/s en vitesse maximale, et que le brasseur est en vitesse maximale lorsqu'il fait plus de 30°C dans le logement. On peut imaginer

que d'ici à 2050, des innovations concernant l'acoustique des brasseurs permettraient de ne pas limiter la vitesse. Une attention particulière devra être portée pour cette solution puisque les simulations n'ont pas intégré de limitation dans l'usage du brasseur pour des températures d'air supérieur à 35°C comme recommandées par (Huang et al. 2013).

Les deux solutions passives les plus efficaces peuvent être complémentaires car elles n'agissent pas sur les mêmes phénomènes. En effet, la variante (Brasseur + PM) est encore plus efficace avec une réduction de l'inconfort de 88% en moyenne. A Nîmes, c'est la première variante permettant de réduire les DH en dessous du seuil réglementaire de 1250 DH pour le climat CNRM. Le système de rafraîchissement évaporatif indirect est encore plus efficace et permet de supprimer l'inconfort pour Paris et de le réduire à seulement une centaine de DH pour Nîmes.

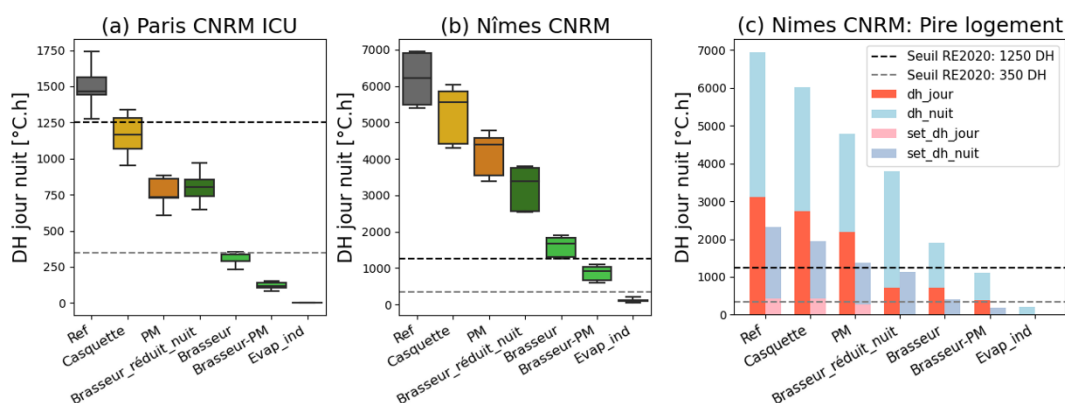


Figure 3 : Boxplot du DH jour/nuite pour tous les logements du bâtiment en fonction des variantes simulées. (a) Paris CNRM avec ICU et (b) Nîmes CNRM et (c) comparaison des DH et SET_DH pour le pire logement à Nîmes CNRM

En analysant la Figure 3c), on observe que les deux indicateurs (DH et SET_DH) évoluent dans le même sens et classent les solutions étudiées dans le même ordre. En revanche, avec l'indicateur SET_DH, l'inconfort calculé est beaucoup plus faible que pour l'indicateur DH. Cela peut s'expliquer par des seuils plus élevés pendant la journée pour les SET_DH, ce qui explique les niveaux de SET_DH_jour qui sont assez faibles. La prise en compte des autres paramètres du confort (vitesse d'air, vêture, métabolisme...) dans la SET réduisant la température ressentie par rapport à la température opérative peut aussi expliquer les différences.

En conclusion, les variantes passives les plus efficaces et déjà bien connues (PM et brasseur) sont suffisantes pour limiter l'inconfort à Paris pour la canicule future du modèle CNRM même en considérant l'ICU. En revanche à Nîmes, même avec le couplage de ces deux solutions, l'inconfort n'est pas complètement résolu, bien qu'il soit assez faible si on se fie à l'indicateur SET_DH.

3.2. ANALYSE DE CYCLE DE VIE

3.2.1. Consommations du bâtiment – composante $IC_{Energie}$

La Figure 4 montre les consommations électriques de chauffage et de froid pour la solution PAC air/eau à Paris et à Nîmes pour les différents climats. Logiquement, compte tenu des évolutions climatiques tendant au réchauffement, les consommations de chauffage diminuent et les consommations de froid augmentent pour les climats futurs. A Paris, les consommations de froid restent toujours moins importantes que les consommations de chauffage pour les climats futurs tandis qu'à Nîmes l'écart se

creuse et les consommations de froid sont plus de 3 fois plus importantes que celle de chauffage pour le climat CNRM. Les consommations d'énergie sont utilisées pour calculer l'IC Energie des différentes variantes.

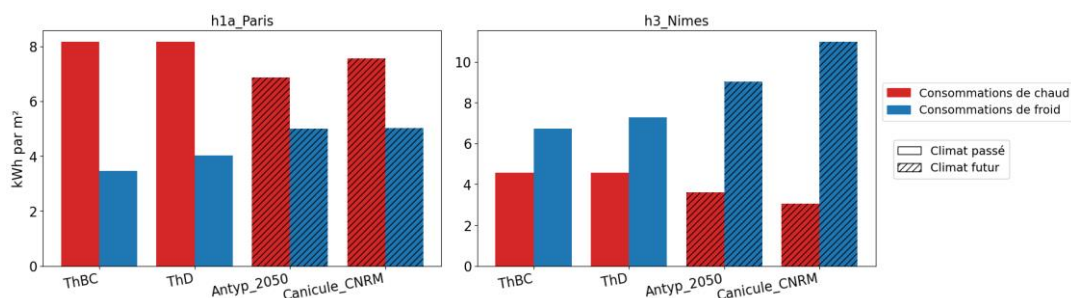


Figure 4 : Consommations électriques de chaud et de froid de la PAC air/eau pour le bâtiment à Paris et à Nîmes pour les différents climats étudiés

3.2.2. Analyse comparative de l'impact carbone du bâtiment pour les différentes solutions – IC_{ICARE}

La Figure 5 présente l'impact carbone pour les différentes solutions étudiées pour Paris et Nîmes CNRM. Cela comprend l'impact carbone lié aux matériaux, *composante IC_{PCE}*, ainsi que l'impact carbone des consommations d'énergie *composante IC_{Energie}*. A Paris, où les besoins de chauffage sont très élevés, le poids carbone du bâtiment avec les solutions passives peut principalement être attribué à l'énergie utilisée pour le chauffage par le RCU (75% ENR). Une autre variante de chauffage de référence, par exemple une chaudière à granulés, influencerait donc grandement sur les résultats.

En ce qui concerne les solutions passives, les IC-PCE augmentent de manière assez importante lorsque plusieurs variantes sont réunies (Brasseur-PM par exemple). L'IC-PCE de la PAC air/air est très important du fait de l'aspect individuel de la solution (un appareil installé par logement) et du poids carbone lié aux fluides frigorigènes.

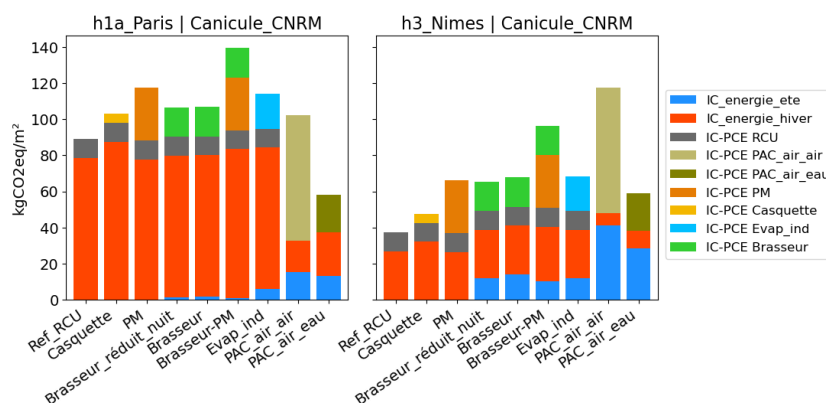


Figure 5 : Impact Carbone des différentes solutions étudiées pour Paris CNRM à gauche et pour Nîmes CNRM à droite.

A Nîmes, les besoins de froid dépassant ceux de chauffage, l'installation d'une PAC air/air apparaît comme désavantageuse. Du point de vue de l'ACV, la solution PAC air/eau est la solution avec le plus faible impact carbone à Paris et la 3^{ème} meilleure à Nîmes. En effet, elle permet de réduire considérablement l'IC_energie_hiver par remplacement du RCU et contrairement à la PAC air/air, l'IC-PCE est réduit car la solution choisie est une PAC collective pour tout le bâtiment.

A Nîmes CNRM, en comparant l'impact carbone des solutions permettant de limiter l'inconfort (le brasseur, le système de rafraîchissement par évaporation indirect ou les PAC), il apparaît que les

solutions avec le plus faible impact carbone sont la PAC air/eau, Evap_ind et le Brasseur. Les deux premières, plus performantes pour rafraîchir le bâtiment, sont donc classées les meilleures et ex-aequo. Pour aller plus loin dans les préconisations de solutions, une étude multicritère est en cours, avec l'ajout du coût associé aux différentes solutions.

4. CONCLUSION

Cet article s'est intéressé à évaluer le confort estival ainsi que l'impact carbone d'un bâtiment neuf de niveau de performance type RT2012 soumis aux climats utilisés dans le cadre de la RE2020 et à des climats futurs comprenant des canicules pour les villes de Paris et Nîmes.

Pour la ville de Paris, ne pas considérer l'ICU revient à négliger une part importante de l'inconfort possible. En effet, sans considération de l'ICU, les simulations montrent qu'il n'y a pas d'inconfort alors qu'avec, les DH dépassent le seuil réglementaire pour le bâtiment de référence. En revanche pour Nîmes, le bâtiment neuf RT2012 ne peut pas faire face aux climats futurs sans solutions limitant l'inconfort estival. Les solutions identifiées les plus efficaces, pour Nîmes, selon l'évaluation couplée confort-carbone sont la PAC air-eau et le système de rafraîchissement par évaporation indirect.

5. REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient EDF, partenaire du projet ICARE, pour la fourniture des fichiers météo futurs ainsi que pour leur modèle de pompes à chaleur. Les auteurs remercient également l'entreprise Caeli pour leur modèle de système de rafraîchissement évaporatif indirect.

6. BIBLIOGRAPHIE

- Bueno, Bruno, Leslie Norford, Julia Hidalgo, et Grégoire Pigeon. 2013. « The Urban Weather Generator ». *Journal of Building Performance Simulation* 6 (4): 269-81. <https://doi.org/10.1080/19401493.2012.718797>.
- Caeli-Energie. 2024. « <https://www.caeli-energie.com/> ».
- Gonzalez, R. R., Y. Nishi, et A. P. Gagge. 1974. « Experimental Evaluation of Standard Effective Temperature a New Biometeorological Index of Man's Thermal Discomfort ». *International Journal of Biometeorology* 18 (1): 1-15. <https://doi.org/10.1007/BF01450660>.
- Huang, Li, Qin Ouyang, Yingxin Zhu, et Lingfei Jiang. 2013. « A Study about the Demand for Air Movement in Warm Environment ». *Building and Environment* 61 (mars): 27-33. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.12.002>.
- ISO 7730. 2005. « Ergonomics of the thermal environment — Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria ». International Organisation for Standardisation.
- Khan, Najeebullah, Shamsuddin Shahid, Tarmizi Ismail, Kamal Ahmed, et Nadeem Nawaz. 2019. « Trends in Heat Wave Related Indices in Pakistan ». *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment* 33 (1): 287-302. <https://doi.org/10.1007/s00477-018-1605-2>.
- Machard, A., C. Inard, J.M. Alessandrini, F. Devys-Peyre, S. Martinez, J. Ribéron, et C. Pelé. 2023. « Climate Change Influence on Buildings Dynamic Thermal Behavior during Summer Overheating Periods: An in-Depth Sensitivity Analysis ». *Energy and Buildings* 284 (avril): 112758. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112758>.
- Nielsen, Anne N., Rasmus L. Jensen, Tine S. Larsen, et Søren B. Nissen. 2016. « Early Stage Decision Support for Sustainable Building Renovation – A Review ». *Building and Environment* 103 (juillet): 165-81. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.04.009>.
- Perkins-Kirkpatrick, S. E., et S. C. Lewis. 2020. « Increasing Trends in Regional Heatwaves ». *Nature Communications* 11 (1): 3357. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-16970-7>.
- Toesca, Adrien, Damien David, André Kuster, Michel Lussault, et Kévy Johannes. 2022. « An Urban Thermal Tool Chain to Simulate Summer Thermal Comfort in Passive Urban Buildings ». *Building and Environment* 215 (mai): 108987. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.108987>.

7. ANNEXES

7.1. HYPOTHESES SUR LA SOLUTION DES BRASSEURS D'AIR

Il y a 4 brasseurs d'air par logement : deux dans le séjour, et un par chambre. Le contrôle du brasseur d'air se fait comme suit : La gestion du débit est en fonction de la température opérative intérieure et suit le profil en hystérésis représenté sur la Figure 6. Cette gestion ne s'applique que si la pièce est occupée. Pour la variante « Brasseur_réduit_nuit », le débit est limité à 20% du débit maximal dans les chambres la nuit (de 22h à 5h).

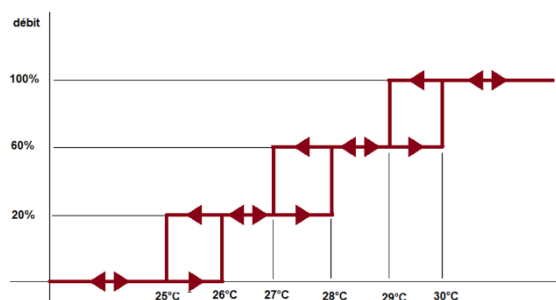


Figure 6 : Gestion du débits des brasseurs d'air en fonction de la température opérative

L'impact du brasseur d'air est évalué via une vitesse d'air moyenne ressentie¹. La température opérative est ensuite ajustée en fonction de cette vitesse d'air dans chaque pièce en retranchant $\Delta\theta_{op i}^{brasseur}$. Cette réduction est calculée selon l'algorithme dans le modèle de brasseur d'air de la RE2020 (issue de la norme EN 15251-2007) :

- Si la vitesse moyenne de la pièce ≤ 0.2 m/s :

$$\Delta\theta_{op i}^{brasseur}(h) = 0$$

- Sinon:

$$\Delta\theta_{op i}^{brasseur}(h) = (1,8322 \cdot e^{0,0361 \cdot (\theta_{rmi}(h) - \theta_i(h))}) \cdot \ln(v(h)) + (3,0498 \cdot e^{0,0368 \cdot (\theta_{rmi}(h) - \theta_{air i}(h))})$$

Avec θ_{rmi} la température radiante moyenne et $\theta_{air i}$ la température d'air de la pièce i.

7.2. HYPOTHESES SUR LE PARAMETRAGE D'URBAN WEATHER GENERATOR

Pour le paramétrage d'UWG, les données d'entrées sont principalement extraites à partir de la librairie geoclimate (<https://github.com/orbisgis/geoclimate>). Concernant les valeurs liées aux bâtiments (valeurs de U des murs, toits et sol ainsi que les années de construction), les données ont été extraites de la BDNBv5 puis ont été classés sur la base de la classification TABULA (FR France (episcopo.eu)). Le tableau suivant donne les paramètres principaux d'UWG utilisés pour le projet.

Tableau 3 : Paramétrages principaux de Urban Weather Generator

Hauteur des bâtiments	Densité de bâti	Densité de végétaux	Densité d'arbre	Longueur caractéristique	Ratio vertical sur horizontal	Albédo des toitures	Albédo des murs	Hauteur de couche limite diurne	Hauteur de couche limite nocturne
18,87 m	0,59	0,00372	0,00634	1000 m	2,006	0,11	0,4	1000 m	80 m

¹ Raftery, Paul, Jay Fizer, Wenhua Chen, Yingdong He, Hui Zhang, Edward Arens, Stefano Schiavon, et Gwelen Paliaga. 2019. « Ceiling Fans: Predicting Indoor Air Speeds Based on Full Scale Laboratory Measurements ». *Building and Environment* 155 (mai): 210-23. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.03.040>.

7.3. HYPOTHESES SUR L'ACV : PRODUITS DE CONSTRUCTION ET EQUIPEMENTS

Le tableau suivant présente la source des données pour le calcul de l'IC_PCE du projet pour chaque variante utilisée.

Tableau 4 : Hypothèses d'émissions carbone en statique pour les produits de construction et équipements

Objet	Impact carbone, statique (kgCO2eq/unité)	Unité	Durée de vie (ans)	Quantités	Source
Casquette (béton)	48	m ²	100	61m ² (Toutes les fenêtres sauf au nord)	FDES collective INIES : Casquette béton armé d'épaisseur 0,16m C25/30 XC4/XF1 CEM II/A (12652)
Brasseur d'air	316	Unité	15	36 (4 par logement)	DED INIES : Déstructificateur / Brasseur d'air (31637) en enlevant les 30% de marge de la DED
Système évaporatif indirect	324	Unité	30	9 (1 système gainé par logement)	Entreprise Caeli
Volets roulants PVC motorisés	157	m ²	30	372 m ² (Toutes les fenêtres sauf au nord)	FDES INIES : Stores à enroulement extérieur motorisés (27008)
RCU – sous station + raccordement	4580	Unité	30	1 équipement (1 pour 9 logements)	Calcul interne CSTB (surestimé – 30 logements)
RCU – réseaux secondaires	1,16	ml	100	733 m (13m hauteur + 80m aller-retour par lgt)	FDES collective INIES: Tube de cuivre pré-isolé pour distribution d'ECS et chauffage (8559)
RCU – radiateurs eau chaude 500W	39,5	Unité	50	6 par logement (54)	FDES individuelle INIES: Artis décor classique horizontal (25694)
PAC air eau – système	5630	Unité	22	1 équipement (1 pour 9 logements)	FDES individuelle INIES : HRC70 ZePAC (30796)
PAC air eau – réseaux	1,16	ml	100	13 m (13 m en hauteur rejoignant le plancher)	FDES collective INIES : Tube de cuivre pré-isolé pour distribution d'ECS et chauffage (8559)
PAC air eau – plancher chauffant/rafraichissant	14,6	m ²	50	Tout le plancher (595m ²)	FDES INIES collective : Plancher chauffant rafraichissant (33536) moins impacts chape d'épaisseur 0,05m à base de ciment (12450)
PAC air air – système et émetteurs	5500 (R32) 4650 (R290)	Unité	17	9 (1 par logement)	FDES collective INIES : PAC air/air réversible au R32 (32691) (R32) et calculs interne (R290)

Towards a Digital Twin of Grenoble-Presqu'île: A Framework for District-Scale Digital Twin Development

Nana Kofi Twum-Duah^{*1}, Jaume Fito², Sacha Hodencq¹, Frédéric Wurtz¹, Benoit Delinchant¹ and François Debray³

¹ Univ. Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP, G2Elab, 38000 Grenoble, France

² Laboratoire Procédés Energie Bâtiment (LOCIE), CNRS UMR 5271 – Université Savoie Mont Blanc, Polytech Annecy-Chambéry, Campus Scientifique, Savoie Technolac, 73376 Le Bourget-Du-Lac Cedex, France

³ Laboratoire National des Champs Magnétiques Intenses (LNCMI), CNRS UPR 3228, EMFL, Université Toulouse III - Paul Sabatier, Université Fédérale Toulouse Midi-Pyrénées, Institut National des Sciences Appliquées, Université Grenoble Alpes, 38042 Grenoble CEDEX, France

*nana-kofi-baabu.twum-duah@grenoble-inp.fr

RESUME. Alors que l'intérêt pour les jumeaux numériques de quartier s'est accru au cours des dernières années, les interprétations varient sur ce que devrait être un jumeau numérique de quartier et sur la manière dont il devrait être mis en œuvre. Dans de nombreux cas, la mise en œuvre a été spécifique à un domaine, notamment en raison de la complexité du développement d'un système avec de multiples acteurs, sous-systèmes et règles. Les travaux présentés dans cet article visent à constituer un cadre théorique pour le développement collaboratif de ces jumeaux numériques de district. Notre objectif est de continuer à développer ce cadre tout en mettant en œuvre un jumeau numérique de quartier pour de la Presqu'île de l'agglomération grenobloise.

MOTS-CLÉS : Jumeau numérique du district, Cadre théorique, Développement collaboratif.

ABSTRACT. While the interest in district Digital Twins has grown over the last few years, there are varying interpretations of what a district Digital Twin should be and how it should be implemented. In many cases, the implementation has been domain-specific, especially due to the complexity of developing such a complex system with multiple actors, subsystems, and rules. The work presented in this article represents a barebones framework for the collaborative development of such district Digital Twins. We aim to continue developing this framework while implementing a district Digital Twin for the Presqu'île district of the greater Grenoble metropolitan area.

KEYWORDS: District-Scale Digital Twin, Framework, Collaborative Development.

1. INTRODUCTION

The concept of a Digital Twin (DT) was formally introduced in literature by Michael Grieves as a Product Lifecycle Management (PLM) concept (Grieves 2016; Singh et al. 2021). Grieves' initial proposal was built on the premise that a system was made up of two sub-systems; (I) the physical system (which has always existed) and (II) a "new" virtual representation of the physical system (Grieves 2016).

At the core, a DT can be fundamentally broken down into three main components; the real (physical) space, the virtual space, and the (seamless) data link between these two spaces. Thus, a DT can be described as a real-time (or near real-time) virtual representation of physical components, characteristics, and behaviors of real-world objects, processes, and systems across all phases of the physical system's lifespan (Javaid, Haleem, and Suman 2023). DTs have been cited as being pivotal for Industry 4.0 (Singh et al. 2021; Javaid, Haleem, and Suman 2023) and could have significant implications for the energy transition – by facilitating optimized use of resources throughout the lifecycle of the physical system (at the planning and operational phases) (Ghenai et al. 2022).

Given the growing interest coupled with the increasing potential benefits of DTs, it is no surprise that a lot of work is being done to develop DTs for complex multi-actor systems such as districts (and by extension cities). Jeddoub et al (2023) point out that the development of DTs for cities is a new trend in the urban and geospatial fields, however, the concept remains ambiguous and presents differences arising from current implementation. From the literature, the main issues associated with city-scale DTs are: (i) Ambiguity concerning the definition and characteristics of a city-scale DT (Sepasgozar 2021; Shahzad et al. 2022) and (ii) Domain-specific and technical implementations (Lehtola et al. 2022).

City districts (and by extension cities) are complex socio-technical systems made up of multiple actors and sub-systems (controllable and non-controllable) interacting with the local environment (Caldarelli et al. 2023). These interactions are governed by technical rules, and laws as well as a complex web of social dynamics, cultural norms, economic factors, legal boundaries and political considerations.

Given the complexity and the associated multi-dimensional nature of districts (cities), domain-specific solutions while valuable would in most cases be inadequate at accurately representing the physical space in a virtual space. In this regard, a DT of a city should not be domain-specific (as such a representation would not allow for the interactions between the various sub-systems) but should rather be a multi-stakeholder effort (researchers, engineers, city authorities, government, etc.). To further buttress the need for a multi-stakeholder approach, the work of Schleich et al. indicates four essential characteristics should form the basis of any DT: scalability, interoperability, expansibility, and fidelity (Schleich et al. 2017; Jia, Wang, and Zhang 2022).

In order to address this issue of complexity and multi-actor interactions, the term DT has to be further expanded, in this regard, three key definitions are considered as follows:

- **Digital Twin Instance (DTI):** This is a specific virtual instance of an existing physical system linked to the physical system for its entire life cycle (Jones et al. 2020). In reality, the DTI is usually developed based on a Digital Twin Prototype (a virtual representation of a system based on which the physical system is developed (Grieves and Vickers 2017)). The DTI has many applications and depending on its use case can be considered to be in the prototype phase (for example: simulating the addition of a heat pump to the HVAC system of an existing building) or in the instance phase where the Digital twin incorporates existing components and their corresponding history to make a prediction, (predicting a potential component failure) (Grieves and Vickers 2017; Michael Grieves 2018).
- **Digital Twin Aggregate (DTA):** This type of DT in most literature is simply described as an aggregation of Digital Twin Instances (Michael Grieves 2018; Singh et al. 2021), see Figure 1.

- **Digital Twin Environment:** Grieves and Vickers (2017) describe this type of DT as “an integrated, multi-domain physics application space for operating on Digital Twins”. These operations include the interrogation of DTIs for their current and historical states and predicting the physical system’s behavior and performance under different conditions and scenarios (using the component DTIs or possibly a DTA) (Grieves and Vickers 2017; DNV 2018). In summary, the DTE encompasses all the tools and functionalities required to support the application of the DT.

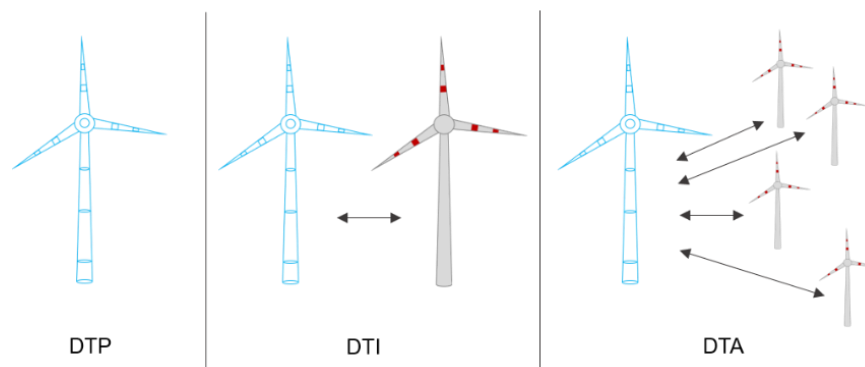


Figure 1 Graphical representation of a wind turbine as a Digital Twin Prototype (DTP), Digital Twin Instance (DTI), and Digital Twin Aggregate (DTA) (Hofbauer, Sangl, and Engelhardt 2019)

Thus, the district Digital Twin can be described as a complex DTA composed of multiple DTIs (which could be DTAs) and operated in a Digital Twin Environment. Such a complex system would require cross-disciplinary efforts to capture all the dynamics at the different levels of the district.

In this article, we present a collaborative framework for developing city/district-scale Digital Twins. Section 2 introduces the Presqu’île district of Grenoble (our use case), Section 3 focuses on the proposed collaborative framework, Section 4 is a discussion of the Presqu’île use case, and Section 5 is the conclusion and perspectives of the work presented in this article.

2. PRESQU’ÎLE – GRENOBLE

Presqu’île is a district of the greater Grenoble metropolitan area, it is located at the confluence of two rivers (the Drac and Isère). The district is composed of several commercial and multi-family residential buildings, academic institutions, and research institutions – notably several historical and unique European large-scale research infrastructures that are electro-intensive actors (Laboratoire National des Champs Magnétiques Intenses (LNCMI), European Synchrotron Radiation Facility (ESRF), Institut Laue-Langevin (ILL)). Since 2007, the district has been earmarked as an Eco district by the city and the city aims to develop key infrastructure which includes but is not limited to energy performant buildings, low-carbon transportation (charging stations, tram lines, etc.), and green spaces (Grenoble 2024).

With regard to this research project, the goal is to develop a cross-disciplinary Digital Twin of Presqu’île. It is noteworthy to mention that some work has already been carried out using data from buildings in the district (Hodencq et al. 2020; Nana Kofi Twum-Duah 2023; Pajot, Delinchant, Maréchal, and Frésier 2018; Pajot, Delinchant, Maréchal, Wurtz, et al. 2018) and utilities. Thus, our first initiative is to provide a collection of all the works (which are digital models, precursors to digital twins) that have already been carried out using the data from the district.

3. COLLABORATIVE FRAMEWORK FOR DISTRICT DIGITAL TWIN DEVELOPMENT

To facilitate the development of a cross-disciplinary and multi-actor district Digital Twin, we propose a four-layer framework as illustrated in Figure 2 below. The first layer is the human interface layer which is a visualization layer, the second layer is the data layer where data storage, polling, and communication occur, the third layer is the model interaction, which enables the interaction between the individual components of the district Digital Twin, and the fourth layer is the model layer where the various models associated to each subsystem are defined.

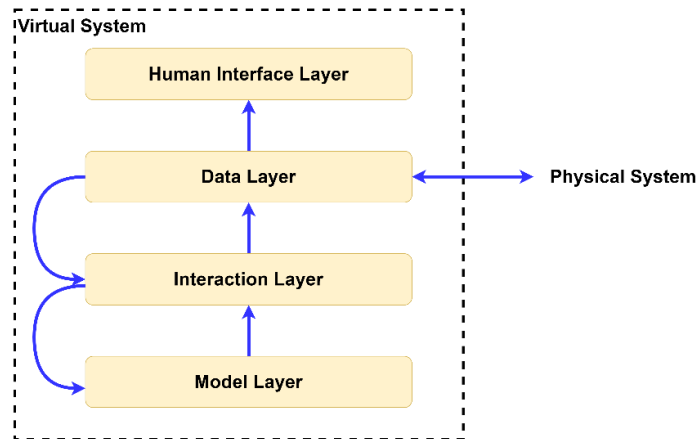


Figure 2: Collaborative Framework for District Digital Twin Development

3.1. LAYER 1: HUMAN INTERFACE LAYER

This layer is a visualization layer and its primary goal is to translate all the data into a visual format that is easy to understand by human users. For this layer, we recommend a three-dimensional (3D) representation of the district (such a 3D model would be a Digital Twin from the perspective of urban planners, and typically also contains geometric, geographic, and topological information) as is the consensus (Stoter, Ohori, and Noardo 2021). Such 3D models may not need to be developed from scratch as there are online resources that provide such 3D representations for free (see [3D MAPS](#))

This layer polls data directly from the data layer (this is the next layer in the framework) and should allow the human user to view the various subprocesses and interactions that are happening within the complex system that is the city district.

In the case of Presqu'île, this layer is represented in 3D format and will be accessible via a web application. Sensor data can be displayed on the individual buildings, however in order not to lose visual appeal, the displayed data will be limited. Details can be obtained by clicking on the desired component.

3.2. LAYER 2: DATA INTERFACE LAYER

This layer interfaces all the other layers with the data related to the system. Notably, this layer interfaces with both the physical system (i.e. the data from the real-world system is polled and stored in this layer) and the virtual system.

Fundamental considerations for this layer include the definition and subsequent establishment of Application Programming Interface (API) protocols and data storage policies. API Protocols are necessary at this layer as they define both the standards and specifications for communications between the various components of the global system (both virtual and physical). The data storage policies on

the other hand specify aspects such as units, labeling conventions, data structure, and storage formats which are essential for ensuring the integrity, accessibility and consistency of the data.

For Presqu'île, multiple API Protocols will have to be defined to collect data related to energy demand (electrical and heat), weather, etc. The collected data will then be stored in databases in which the data structure has been defined and a standardized data naming convention will be used.

3.3. LAYER 3: MODEL INTERACTION LAYER

The model interaction layer is the layer in which the interactions between the various actors and systems are modeled. To achieve this, it is essential to use a tool that allows for various components of the system (humans, buildings, etc.) to be modeled (in most cases by different stakeholders at different times) in such a manner that their interactions can be considered (i.e. the communication between the various components). An Agent-Based modeling approach satisfies these requirements and is recommended for this layer as proposed by Clemen et al (2021) and Skobelev et al (2020).

Thus, at this layer, each component of the global system (the district) is defined as an agent having their attributes and characteristics. Agents at this layer can themselves be composed of multiple agents, which would represent their sub-systems. The interactions between the various agents can be modeled as a communication channel between the various agents. However, since it is near impossible to determine all the possible interactions that a component (i.e. an agent) will have, these inter-component communications have to be determined and defined on a need basis.

Considering our use case, Presqu'île, at this layer we would define each building, EV charging stations, electric transformers, and heat exchangers (for district heating) as individual agents (thus the energy sub-system of the district). For such an application, EV agents would need signaling from the charging station agents on their availability, and building agents connected to the district heating network (also an agent) would need to send signals to their service provider on their heating demand (based on external weather conditions). MESA (Kazil, Masad, and Crooks 2020), a Python library for agent-based modeling is a potential development tool considered for this approach.

3.4. LAYER 4: MODEL LAYER

Owing to the complex nature of a district and by extension the need for a multi-disciplinary approach, the system would be composed of different types of models and approaches (Hence the need for agent-based modeling in layer 3). Thus, in this layer, the models (physical models, Machine Learning models, optimization models, etc.) are defined and associated with the respective agents defined in layer 3.

This layer implies that not all stakeholders need to use the same modeling tools and approaches to define components in the system. The main requirement at this layer is that the model should be interfaceable (i.e. a wrapper) with the agent in layer 3.

Considering our use-case, the energy system can be modeled using OMEGAAlpes (Hodencq et al. 2021), the buildings may also have physical models to represent their thermal characteristics (using a modeler such as Dimosim (Garreau et al. 2021)) whilst local renewable energy resources may have Machine Learning models to predict production, see Figure 3. All these models although different can be developed in Python and directly associated with their respective agents.

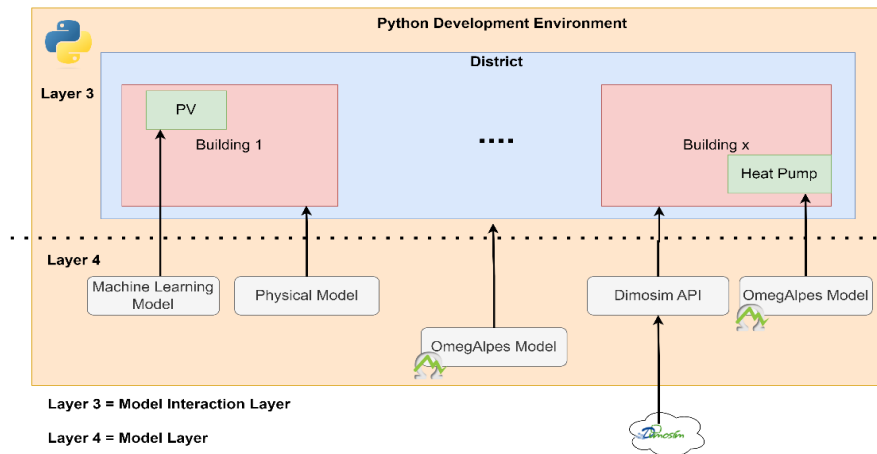


Figure 3: Sample schematic representation of the interactions between layers 3 and 4

4. THE PRESQU'ÎLE USE CASE

We have illustrated in the previous section how the various layers of the proposed framework will be utilized for our use case – Presqu'île. The Proposed DT will have two main applications, these are:

- **Operational Optimization:** the proposed digital twin will facilitate the polling of data from the various energy assets (production, consumption, and storage assets) to be used in real-time optimizations, the results of which will be transmitted to asset managers and management systems to ensure efficient use of available resources, ultimately contributing towards the global reduction of the districts carbon footprint.
- **Scenario Modelling:** Using the proposed framework, the Presqu'île Digital Twin will be suitable for modeling and testing different scenarios for the various sub-systems of the district. One such scenario will be the recovery of waste heat from the European large-scale research infrastructures, specifically the LNCMI which dissipates approximately 10GWh of heat annually; for district heating applications.

Acknowledging that the DT is a representative model of the physical system is imperative. The outputs of such DTs should be one of the considerations for making a decision, but not the only ones. Digital Twins have the potential to facilitate planning, development, operation, and forecasting, but should not prevail from collective and democratic decision-making as detailed by Alva et al (2022).

5. CONCLUSION AND PERSPECTIVES

District-scale Digital Twins present a new paradigm for investigating and analyzing solutions at the city scale. However, owing to the complex nature of districts and the complex nature of the interactions, their development requires collaborative efforts from multiple stakeholders. The framework proposed in this article, whilst barebones, attempts to address the question related to how truly representative district Digital Twins can be effectively developed such that they can reflect the complex physical system (i.e. the district). We envision that the digital twin will be a useful tool for optimizing operations, planning, and conception of the various subsystems within the Presqu'île district.

Despite districts being invariably different (geographically, topographically, socially, etc.), most districts have commonalities and as such, work needs to be carried out in defining the minimum data requirements and the appropriate communication protocols and channels for initiating a district's DT.

Lastly, feedback from the digital environment to the physical environment is essential for the successful implementation of the Digital Twin. However, in the case of human actors, for example, building occupants or EV users, this feedback has to be understandable and useful, as such some work needs to be done to determine the type and format of data that stakeholders should be presented with.

6. ACKNOWLEDGEMENT

This work was financed by the DataDistrict project funded by Carnot Energie du Futur, and received government funding managed by the Agence Nationale de la Recherche under the “Investissements d'avenir” program, reference ANR-15-IDEX-023.

7. BIBLIOGRAPHY

- Alva, P., F. Biljecki, and R. Stouffs. 2022. “USE CASES FOR DISTRICT-SCALE URBAN DIGITAL TWINS.” *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XLVIII-4/W4-2022*: 5–12. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-4-W4-2022-5-2022>.
- Caldarelli, G., E. Arcaute, M. Barthelemy, M. Batty, C. Gershenson, D. Helbing, S. Mancuso, et al. 2023. “The Role of Complexity for Digital Twins of Cities.” *Nature Computational Science* 3 (5): 374–81. <https://doi.org/10.1038/s43588-023-00431-4>.
- Clemen, Thomas, Nima Ahmady-Moghaddam, Ulfia A. Lenfers, Florian Ocker, Daniel Osterholz, Jonathan Ströbele, and Daniel Glake. 2021. “Multi-Agent Systems and Digital Twins for Smarter Cities.” In *Proceedings of the 2021 ACM SIGSIM Conference on Principles of Advanced Discrete Simulation*, 45–55. SIGSIM-PADS '21. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery. <https://doi.org/10.1145/3437959.3459254>.
- DNV. 2018. “The Age of Digital Twins.” 2018. <https://ai-and-safety.dnv.com/probabilistic-twin/digitaltwins.html>.
- Garreau, Enora, Yassine Abdelouadoud, Eunice Herrera, Werner Keilholz, G. -E. Kyriakodis, Vincent Partenay, and Peter Riederer. 2021. “District MOdeller and SIMulator (DIMOSIM) – A Dynamic Simulation Platform Based on a Bottom-up Approach for District and Territory Energetic Assessment.” *Energy and Buildings* 251 (November): 111354. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111354>.
- Ghenai, Chaouki, Lama Alhaj Husein, Marwa Al Nahlawi, Abdul Kadir Hamid, and Maamar Bettayeb. 2022. “Recent Trends of Digital Twin Technologies in the Energy Sector: A Comprehensive Review.” *Sustainable Energy Technologies and Assessments* 54 (December): 102837. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102837>.
- Grenoble, Ville de. 2024. “Presqu’Ile.” 2024. <https://www.grenoble.fr/545-presqu-ile.htm>.
- Grieves, Michael. 2016. *Origins of the Digital Twin Concept*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.26367.61609>.
- Grieves, Michael, and John Vickers. 2017. “Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems.” In *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems: New Findings and Approaches*, edited by Franz-Josef Kahlen, Shannon Flumerfelt, and Anabela Alves, 85–113. Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-38756-7_4.
- Hodencq, Sacha, Mathieu Brugeron, Jaume Fitó, Lou Morriet, Benoit Delinchant, and Frédéric Wurtz. 2021. “OMEGAAlpes, an Open-Source Optimisation Model Generation Tool to Support Energy Stakeholders at District Scale.” *Energies* 14 (18). <https://doi.org/10.3390/en14185928>.
- Hodencq, Sacha, Lou Morriet, Frédéric Wurtz, Benoit Delinchant, Benjamin Vincent, and François Debray. 2020. “Science Ouverte Pour l’optimisation de Systèmes Énergétiques : Des Données et Modèles Ouverts à Une Infrastructure de Recherche Ouverte.” In *Conférence IBPSA France*. Reims, France. <https://hal.science/hal-03290009>.
- Hofbauer, Günter, Anita Sangl, and Sonja Engelhardt. 2019. “The Digital Transformation of the Product Management Process: Conception of Digital Twin Impacts for the Different Stages

- 1.” *International Journal of Management Science and Business Administration* 5 (June): 74–86. <https://doi.org/10.18775/ijied.1849-7551-7020.2015.52.2006>.
- Javaid, Mohd, Abid Haleem, and Rajiv Suman. 2023. “Digital Twin Applications toward Industry 4.0: A Review.” *Cognitive Robotics* 3 (January): 71–92. <https://doi.org/10.1016/j.cogr.2023.04.003>.
- Jeddoub, Imane, Gilles-Antoine Nys, Rafika Hajji, and Roland Billen. 2023. “Digital Twins for Cities: Analyzing the Gap between Concepts and Current Implementations with a Specific Focus on Data Integration.” *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 122 (August): 103440. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2023.103440>.
- Jia, Wenjie, Wei Wang, and Zhenzu Zhang. 2022. “From Simple Digital Twin to Complex Digital Twin Part I: A Novel Modeling Method for Multi-Scale and Multi-Scenario Digital Twin.” *Advanced Engineering Informatics* 53 (August): 101706. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2022.101706>.
- Jones, David, Chris Snider, Aydin Nassehi, Jason Yon, and Ben Hicks. 2020. “Characterising the Digital Twin: A Systematic Literature Review.” *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* 29 (May): 36–52. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2020.02.002>.
- Kazil, Jackie, David Masad, and Andrew Crooks. 2020. “Utilizing Python for Agent-Based Modeling: The Mesa Framework.” In *Social, Cultural, and Behavioral Modeling*, edited by Robert Thomson, Halil Bisgin, Christopher Dancy, Ayaz Hyder, and Muhammad Hussain, 308–17. Cham: Springer International Publishing.
- Lehtola, Ville V., Mila Koeva, Sander Oude Elberink, Paulo Raposo, Juho-Pekka Virtanen, Faridaddin Vahdatikhaki, and Simone Borsci. 2022. “Digital Twin of a City: Review of Technology Serving City Needs.” *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 114 (November): 102915. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2022.102915>.
- Michael Grieves. 2018. “The Evolution of the Digital Twin.” *IM+io*, March 2018.
- Nana Kofi Twum-Duah. 2023. “Direct and Indirect Energy Flexibility Interactions at the Building and Community Scale: From System to the Human-Interfaced System.” Grenoble: Université Grenoble Alpes.
- Pajot, Camille, Benoit Delinchant, Yves Maréchal, and Damien Frésier. 2018. “Impact of Heat Pump Flexibility in a French Residential Eco-District.” *Buildings* 8 (10): 145. <https://doi.org/10.3390/buildings8100145>.
- Pajot, Camille, Benoit Delinchant, Yves Maréchal, Frederic Wurtz, Lou Morriet, Benjamin Vincent, and François Debray. 2018. *Industrial Optimal Operation Planning with Financial and Ecological Objectives*. <https://doi.org/10.5220/0006705202140222>.
- Schleich, Benjamin, Nabil Anwer, Luc Mathieu, and Sandro Wartzack. 2017. “Shaping the Digital Twin for Design and Production Engineering.” *CIRP Annals* 66 (1): 141–44. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2017.04.040>.
- Sepasgozar, Samad M. E. 2021. “Differentiating Digital Twin from Digital Shadow: Elucidating a Paradigm Shift to Expedite a Smart, Sustainable Built Environment.” *Buildings* 11 (4): 151. <https://doi.org/10.3390/buildings11040151>.
- Shahzad, Muhammad, Muhammad Tariq Shafiq, Dean Douglas, and Mohamad Kassem. 2022. “Digital Twins in Built Environments: An Investigation of the Characteristics, Applications, and Challenges.” *Buildings* 12 (2): 120. <https://doi.org/10.3390/buildings12020120>.
- Singh, Maulshree, Evert Fuenmayor, Eoin P. Hinchy, Yuansong Qiao, Niall Murray, and Declan Devine. 2021. “Digital Twin: Origin to Future.” *Applied System Innovation* 4 (2): 36. <https://doi.org/10.3390/asi4020036>.
- Skobelev, Petr, Vladimir Laryukhin, Elena Simonova, Oleg Goryanin, Vladimir Yalovenko, and Olga Yalovenko. 2020. “Multi-Agent Approach for Developing a Digital Twin of Wheat.” In *2020 IEEE International Conference on Smart Computing (SMARTCOMP)*, 268–73. <https://doi.org/10.1109/SMARTCOMP50058.2020.00062>.
- Stoter, Jantien, Ken Arroyo Otori, and Francesca Noardo. 2021. “Digital Twins: A Comprehensive Solution or Hopeful Vision?” October 4, 2021. <https://www.gim-international.com/content/article/digital-twins-a-comprehensive-solution-or-hopeful-vision>.

Analyse de sensibilité du modèle énergétique d'un bâtiment pédagogique constitué de conteneurs maritimes.

Mohammad Valizadeh*¹, Quentin Laporte-Chabasse¹, Kátia Cordeiro Mendonça¹, Avner Bar-Hen², et Pierre-Antoine Cormier¹

¹ CESI, LINEACT, Orléans, France

*mvalizadeh@cesi.fr

² Conservatoire National des Arts et Métiers, Paris, France

RESUME. Les modèles énergétiques, bien que très utiles pour prédire le comportement physique du bâtiment, comportent des incertitudes (paramètres inconnus, approximations...). Ces incertitudes ont un impact sur la fiabilité des prédictions, qu'il est possible de limiter via la calibration du modèle. Nous présentons dans cet article une modélisation énergétique d'un bâtiment pédagogique construit à partir de conteneurs maritimes recyclés, ainsi que la mise en œuvre de l'analyse de sensibilité, étape préliminaire à la calibration. L'analyse de sensibilité est réalisée grâce à la méthode Sobol. Nous évaluons l'impact de 12 paramètres d'entrée du modèle sur 5 variables de sortie : la consommation électrique par zone surface, les besoins en chauffage et en refroidissement, ainsi que les indices de confort thermique pour deux salles de cours. Il apparaît que les 5 paramètres d'entrée les plus influents sont l'infiltration, le débit de ventilation, la densité de puissance des équipements électriques, la réflectance du terrain et la densité d'occupation, et ce quel que soit la variable de sortie. Parmi, les paramètres d'entrée sélectionnés, ceux liés au toit végétale ne semble avoir aucun impact sur les données de sortie.

MOTS-CLÉS : Modélisation énergétique, Calibration, Analyse de sensibilité

ABSTRACT. Building energy models, although very useful for predicting the physical behavior of buildings and thus, are subject to uncertainties (unknown parameters, approximations, etc.). These uncertainties have an impact on the reliability of the predictions, which can be alleviated through model calibration. In this article, we present an energy model of an educational building constructed from recycled shipping containers, and the implementation of sensitivity analysis as a preliminary step to calibration. The sensitivity analysis is performed using the Sobol method. We evaluate the impact of 12 model input parameters on 5 output variables: electricity consumption per surface area, heating and cooling requirements, and thermal comfort of two classrooms. It appears that the 5 most influential input parameters are infiltration, minimum flow rate of mechanical ventilation, power density of electrical equipment, ground reflectance, and occupancy density, whatever the output variable. Of the selected input parameters, those related to the vegetation roof appear to have no impact on the output data.

KEYWORDS: Building energy model, Calibration, Sensivity Analysis

1. INTRODUCTION

Les modèles énergétiques du bâtiment sont largement utilisés pour la gestion du bâtiment, et notamment pour aider au pilotage des systèmes (chauffage, ventilation, climatisation - CVC). Ils permettent de simuler le comportement physique du bâtiment par la résolution des équations fondamentales de la physique, et ainsi prédire les consommations énergétiques, utiles pour établir des politiques de gestion du bâtiment en accord avec le confort et le bien-être des occupants (Andargie, Touchie, et O'Brien 2019). L'établissement du modèle requiert fréquemment certaines approximations, notamment pour pallier au manque de connaissance du bâtiment étudié ou pour diminuer sa complexité

et ainsi optimiser le temps de calcul (Coakley, Raftery, et Keane 2014). Néanmoins, ces différentes approximations sont des facteurs d'incertitude qui ont un impact sur la fiabilité des données simulées, et donc sur la politique de gestion du bâtiment.

Un moyen de limiter l'impact de ces incertitudes est de calibrer le modèle en ajustant les paramètres d'entrée pour améliorer la correspondance entre les résultats simulés et les mesures réelles du bâtiment. Il existe deux grandes catégories de méthodes de calibration : les méthodes dites manuelles et les méthodes automatiques, qui sont les plus citées dans la littérature (Coakley, Raftery, et Keane 2014). Les méthodes automatiques s'appuient sur des outils mathématiques et statistiques, tels que l'algorithme génétique (Ramos Ruiz et al. 2016) ou l'approche Bayésienne (Chong et Menberg 2018).

Les approches bayésiennes sont de plus en plus utilisées (Chong et Menberg 2018; Calama-González et al. 2021) car elles prennent naturellement en compte les incertitudes à travers des distributions a priori des paramètres du modèle. Ces distributions reflètent l'état de connaissance initial sur les paramètres à calibrer. Elles peuvent être basées sur des données préexistantes, des estimations d'experts ou des valeurs par défaut. Idéalement, il conviendrait de calibrer tous les paramètres inconnus ou incertains, mais cela occasionnerait un temps de calcul trop important (Calama-González et al. 2021). Il est alors nécessaire d'identifier les paramètres les plus influents du modèle, qui devront être calibrés, par l'intermédiaire d'une analyse de sensibilité (AS) (Menberg, Heo, et Choudhary 2016). L'enjeu est de couvrir le domaine de définition des paramètres d'entrée tout en limitant le nombre de configurations du modèle à simuler (du fait du temps de calcul associé à ces simulations). Ce qui nous conduit à adopter une méthode d'AS dite globale. Parmi ces méthodes, la régression est réputée pour être la plus rapide à calculer et facile à mettre en œuvre et convient très bien aux modèles linéaires (Helton et al. 2006). Cependant, lorsque le modèle à analyser devient plus complexe, i.e. un modèle de bâtiment dont le nombre de paramètres d'entrée est important, d'autres approches doivent être considérées. L'approche par criblage (ou *screening*), tel que la méthode Morris est très souvent citée dans la littérature, notamment dans le cadre de la calibration des modèles énergétiques (Tian 2012; Menberg, Heo, et Choudhary 2016). Cette méthode offre un compromis intéressant entre le temps de calcul et la fiabilité des résultats. Néanmoins, elle hiérarchise l'influence des paramètres entre eux, mais ne quantifie pas l'effet de ces derniers sur le modèle. Au contraire, les méthodes basées sur la variance (ANOVA) s'intéressent à l'impact des paramètres d'entrée sur la variance globale du modèle et permettent de prendre en compte les effets principaux et les effets d'interactions entre les paramètres (Mechri, Capozzoli, et Corrado 2010). Les approches, telles que Sobol ou FAST, semblent être les plus performantes en termes d'identification des paramètres influents, comparées aux autres techniques usuelles (Nguyen et Reiter 2015). En effet, il existe de nombreux travaux de recherche relatant l'utilisation de ce type de méthode, notamment Sobol, pour une AS d'un modèle énergétique de bâtiment, en particulier pour identifier l'influence des paramètres de conception sur sa performance énergétique (Mechri, Capozzoli, et Corrado 2010).

Cette contribution porte sur la modélisation énergétique d'un bâtiment pédagogique (NR3) situé sur le campus CESI de Nanterre. Ce travail de modélisation est un préalable au développement de systèmes de gestion du bâtiment dit « intelligents » centrés sur les usagers. L'objectif à terme est d'allier performance énergétique et confort des occupants. Le bâtiment NR3 a la particularité d'être constitué de conteneurs maritimes recyclés (structure modulaire). L'utilisation de conteneur comme structure pour la construction de bâtiment est de plus en plus envisagée, notamment dans une logique d'économie circulaire pour la réduction de l'impact environnemental des secteurs du transport maritime et du

bâtiment (Bertolini et Guardigli 2020). Cette contribution offre un nouveau cas d'étude, nécessaire au développement des méthodes de calibration (bayésienne) (Chong et Menberg 2018). Cet article présente les étapes préliminaires à la calibration du modèle énergétique, à savoir : le développement du modèle numérique et la mise en œuvre de l'AS. Enfin, une discussion sur les résultats de l'AS est présentée.

2. MODELE ENERGETIQUE D'UN BATIMENT MODULAIRE D'ENSEIGNEMENT

Le bâtiment NR3 est constitué de 16 conteneurs maritimes recyclés, empilés sur 2 niveaux, offrant un espace total de 220 m² dédié à l'enseignement, la recherche et l'innovation. Il est composé de 4 salles d'enseignements pouvant accueillir environ 80 étudiants au total, un bureau, un local technique et un local serveur. Il est équipé de plus de 150 capteurs et actionneurs permettant la mesure des paramètres physiques intérieurs (température, humidité, pression, niveau sonore, luminosité, la qualité de l'air, consommation électrique...) et la gestion automatique des différents systèmes, notamment CVC qui est constitué d'une ventilation mécanique double flux et d'une pompe à chaleur air-air alimentant des unités intérieures disposées dans chaque pièce du bâtiment. Le bâtiment possède quelques particularités, à savoir : un toit végétal pour une isolation thermique et acoustique optimale et une façade vitrée orientée plein sud pour maximiser les apports solaires dans chaque salle. Le bâtiment, sa maquette numérique (BIM) et son architecture sont décrits en détail dans (Doukari et al. 2022).

Le modèle énergétique du bâtiment NR3 est réalisé avec EnergyPlus, un logiciel de simulation largement utilisé par la communauté scientifique pour simuler la consommation énergétique dans le bâtiment. Pour créer l'architecture du bâtiment, et ainsi spécifier l'ensemble des données d'entrée, nous utilisons le logiciel DesignBuilder. Il intègre le moteur de simulation EnergyPlus et permet d'importer la maquette numérique de notre bâtiment. Notre modèle comprend environ 200 paramètres d'entrée définissant notamment ses conditions d'utilisation, les types de modèles physiques utilisés, les conditions environnementales et les différentes charges internes. Les conditions d'occupation sont définies par un scénario d'occupation pour un bâtiment pédagogique la norme (« NF EN 16798-1 », s. d.), et par la densité d'occupation (rapport entre surface du bâtiment et capacité d'accueil). Même si nous mesurons l'ensemble des consommations électriques du bâtiment, il est difficile de connaître précisément le nombre et le type d'équipements électriques connectés dans le bâtiment, en temps réel. Nous choisissons donc de représenter ces consommations dans le modèle en accord avec la norme (« NF EN 16798-1 », s. d.). Les températures de consigne de chauffage et de refroidissement correspondent à la politique de gestion en vigueur dans le bâtiment NR3 (19°C du 1er avril au 30 septembre et 26 °C du 1er avril au 30 septembre). EnergyPlus permet de prendre en compte la perméabilité à l'air du bâtiment. Nous choisissons l'approche « Effective Leakage Area » (ASHRAE 2009) où le paramètre « infiltration » varie entre 0,6 et 3,6 cm²/m² selon la norme (« NF EN 12831-1 », s. d.). Les conditions météorologiques correspondent à la combinaison des données mesurées par la station météo situées sur le toit du bâtiment et celles issues de la station publique la plus proche disponible dans la bibliothèque de EnergyPlus (Paris-Orly). Les simulations permettent de prédire de nombreux paramètres physiques dans le bâtiment. Étant donné notre objectif final, i.e. faire coïncider confort des occupants et performances énergétiques, les variables de sortie étudiées sont : la consommation électrique annuelle totale du bâtiment par surface, les besoins annuels en chauffage et en refroidissement (consommation électriques pour maintenir les température de consigne), et un indice de confort thermique « predicted mean vote – PMV » (ASHRAE 2009). Étant donné que le PMV est calculé chaque heure pour chaque zone, nous

calculons une valeur moyenne annuelle pour deux salles de cours, respectivement située au rez-de-chaussée (RDC) et au premier étage. Les valeurs des différentes variables de sortie sont données dans le Tableau 1.

Variable de sortie (annuelle)	Valeur
Consommation totale d'énergie [kWh]	10869,22
Besoins de chauffage [kWh]	1178,30
Besoins de refroidissement [kWh]	1684,91
PMV moyen annuel d'une salle de cours au RDC	-0.57
PMV moyen annuel d'une salle de cours au 1 ^{er} étage	-0.41

Tableau 1- Valeurs des variables de sortie de la simulation du bâtiment étudié

3. ANALYSE DE SENSIBILITE

L'AS a pour objectif d'identifier les paramètres d'entrée ayant un impact majeur sur les 5 variables de sortie de notre modèle (cf. Tableau 1). Pour cette étude, nous choisissons la méthode de Sobol, qui même si elle reste coûteuse en temps de calcul permet de déterminer efficacement les paramètres influents et leurs interactions (Tian 2012; Saltelli et al. 2010). Cette méthode évalue la contribution de chaque paramètre d'entrée dans la variance globale du modèle. L'indice de Sobol retourné par la méthode donne ainsi une mesure de la sensibilité de chaque paramètre du modèle en considérant son influence de premier ordre, mais aussi d'ordres supérieurs, du fait des interactions entre les paramètres. En considérant un modèle de la forme $Y = f(X_1, X_2, \dots, X_k)$, l'indice de Sobol de premier ordre du i -ième paramètre est donné par :

$$S_i = \frac{\text{Var}[\mathbb{E}[Y|X_i]]}{\text{Var}[Y]}, \quad (1)$$

où $\text{Var}[\mathbb{E}[Y|X_i]]$ est la variance de premier ordre du i -ième paramètre et $\text{Var}[Y]$ est la variance totale du modèle. Pour des interactions d'ordre 2, l'indice de Sobol s'écrit (S_{ij}), et peut se généraliser par ($S_{ijk\dots}$) pour des interactions d'ordre supérieur. L'indice de sensibilité d'ordre total se note (S_{T_i}), il est défini par : $S_{T_i} = S_i + S_{ij} + \dots + S_{ij\dots k}$. La valeur de ces indices est comprise entre 0 et 1, plus la valeur est importante, plus le paramètre associé est influent.

L'AS se compose de trois étapes. La première consiste à échantillonner les configurations du modèle qui seront simulées. Le nombre de configurations générées par la méthode de Sobol est défini par la relation : $2n(p + 1)$, où n est le nombre d'échantillons et p le nombre de paramètres. Le nombre d'échantillons doit être suffisamment grand pour assurer les propriétés de convergence de la méthode. (Saltelli et al. 2010; Gan et al. 2014). La seconde étape consiste à simuler les différentes configurations du modèle énergétique par le logiciel EnergyPlus comme décrit dans la section précédente. La librairie Python Eppy permet d'automatiser cette étape.

Enfin, la dernière étape consiste à calculer les indices de Sobol par équation (1) au regard des données de sortie simulées précédemment. Pour notre étude, nous retiendrons uniquement les indices de premier ordre (S_i) et d'ordre total (S_{T_i}) pour chaque paramètre étudié. Les étapes d'échantillonnage et de calculs des indices de Sobol sont assurées par la librairie Python, SALib (Herman et Usher 2017).

Parmi les nombreux paramètres d'entrée de notre modèle énergétique (≈ 200), nous en sélectionnons 12 répertoriés dans le Tableau 2. X1, X2 et X3 permettent d'évaluer l'impact des approximations faites sur l'architecture du toit végétal dans le modèle. X4 et X5 sont des paramètres caractéristiques de

l'Albédo. La gamme de variation de X_6 correspond aux valeurs d'infiltration mentionnées précédemment rapportée à la surface externe totale du bâtiment. La densité d'occupation n'étant pas mesurée en temps réel, les éventuelles entrées/sorties ou absences des étudiants ne sont pas prise en compte dans le modèle. C'est pour cela que nous intégrons X_7 à l'AS. X_9 est calculé à partir des débits théoriques de reprise et de soufflage du bâtiment rapporté à sa surface totale. Cette valeur moyenne à l'échelle du bâtiment est donc susceptible de varier selon la surface et le type d'espace étudié. X_{10} et X_{11} sont les températures de consigne mentionnées précédemment et couramment intégrer à l'AS dans la littérature (Menberg, Heo, et Choudhary 2016). Le paramètre X_{12} représente la densité d'éclairage artificiel moyenne sur l'ensemble du bâtiment. Elle est calculée pour chaque espace en prenant en compte le nombre et le type de luminaires installés dans chaque espace (Philips PowerBalance), ainsi que leur puissance théorique donnée par le fabricant (25W pour 500 lux)

Paramètres	Variation des paramètres	Distribution	Référence
Couverture du toit par des feuilles [-]	$X_1 \sim \mathcal{U}(0.001, 5)$	Uniform	
Réfectivité des feuilles [-]	$X_2 \sim \mathcal{U}(0.05, 0.5)$	Uniform	Input Output
Émissivité des feuilles [-]	$X_3 \sim \mathcal{U}(0.8, 1)$	Uniform	Reference
Réfectance du terrain [-]	$X_4 \sim \mathcal{U}(0.1, 0.9)$	Uniform	d'EnergyPlus
Réfectance d'ombrage[-]	$X_5 \sim \mathcal{U}(0.1, 0.9)$	Uniform	
Infiltration [cm^2]	$X_6 \sim \mathcal{U}(400, 2500)$	Uniform	NF EN 12831
Densité d'occupation [$\text{m}^2/\text{personne}$]	$X_7 \sim \mathcal{U}(1.8, 2.8)$	Uniform	
Densité de puissance d'équipements [W/m^2]	$X_8 \sim \mathcal{U}(4, 12)$	Uniform	Données de
Minimum d'air neuf [$\text{m}^3/\text{s}/\text{m}^2$]	$X_9 \sim \mathcal{U}(0, 0.0038)$	Uniform	gestion et
Température de consigne de chauffage [$^{\circ}\text{C}$]	$X_{10} \sim \mathcal{N}(19, 0.25)$	Normal	construction du
Température de consigne de refroidissement [$^{\circ}\text{C}$]	$X_{11} \sim \mathcal{N}(26, 0.25)$	Normal	bâtiment NR3
Densité d'éclairage [W/m^2]	$X_{12} \sim \mathcal{U}(3, 5)$	Uniform	

Tableau 2: Paramètres d'entrée incertains et leurs variations dans l'AS

L'AS a été exécutée sur un ordinateur équipé d'un processeur Intel Core i7-12700H et de 32,0 Go de mémoire vive. Toutes les tâches de simulation ont été parallélisées sur les 16 cœurs du processeur. En considérant le nombre d'échantillons $n=1024$ (puissance de 2 la plus proche de 1050) et $p=12$ paramètres, il est nécessaire d'exécuter 26624 simulations, représentant empiriquement 55,4h d'exécution sur une durée totale de 57,3h.

4. RESULTATS ET DISCUSSION

Le Tableau 3 représente les indices S_i et S_T des 12 paramètres en considérant les 5 données de sortie du modèle décrites dans le Tableau 1. Nous notons tout d'abord que les indices d'ordre un et ceux d'ordre total sont quasiment identiques pour tous les paramètres et toutes les données de sortie. Ceci suggère une contribution quasi nulle dans la variance globale du modèle des phénomènes d'interaction entre les paramètres. Le modèle qui génère les données de sortie pourrait alors être substitué par un modèle linéaire, tel que le modèle MLR (*Multiple Linear Regression*) nettement plus efficace en temps de calcul que le traditionnel GPE (*Gaussian Process Emulator*) par exemple.

La Figure 1 illustre les indices d'ordre total présentés dans le Tableau 3. Les résultats montrent que le paramètre le plus influent est l'infiltration. Un bâtiment sera d'autant plus assujéti aux pertes de chaleur qu'il est perméable. Il est donc logique que l'infiltration influence fortement l'ensemble des paramètres lié à la thermique et aux consommations électriques du bâtiment. Notons que les paramètres suivants sont également influents, mais dans une moindre mesure comparée à l'infiltration.

Paramètres	Besoins de chauffage		Besoin de refroidissement		Consommation d'énergie		PMV d'une salle de cours en RDC		PMV d'une salle au 1 ^{er} étage	
	S_i	S_{T_i}	S_i	S_{T_i}	S_i	S_{T_i}	S_i	S_{T_i}	S_i	S_{T_i}
Couverture du toit par des feuilles	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
Réfectivité des feuilles	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
Émissivité des feuilles	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
Réfectance du terrain	0.002	0.002	0.259	0.262	0.016	0.016	0.109	0.109	0.098	0.098
Réfectance d'ombrage	<0.001	<0.001	0.004	0.003	<0.001	<0.001	0.002	0.002	0.004	0.003
Infiltration	0.978	0.978	0.660	0.667	0.413	0.413	0.791	0.796	0.814	0.819
Densité d'occupation	0.006	0.006	0.029	0.032	<0.001	<0.001	0.047	0.047	0.047	0.047
Densité de puissance d'équipements	0.002	0.002	0.015	0.016	0.237	0.236	0.007	0.007	0.008	0.008
Minimum d'air neuf	0.004	0.004	<0.001	0.003	0.299	0.299	0.030	0.032	0.014	0.016
Température de consigne de chauffage	0.005	0.005	<0.001	<0.001	0.001	0.002	0.004	0.005	0.005	0.006
Température de consigne froid	<0.001	<0.001	0.024	0.026	0.003	0.004	0.007	0.008	0.007	0.007
Densité d'éclairage	<0.001	<0.001	0.001	0.001	0.030	0.030	0.001	0.001	0.001	0.001

Tableau 3: Les indices de premier-ordre (S_i) et ordre total (S_{T_i}) correspondant à chaque paramètre d'entrée concernant de chaque variable de sortie

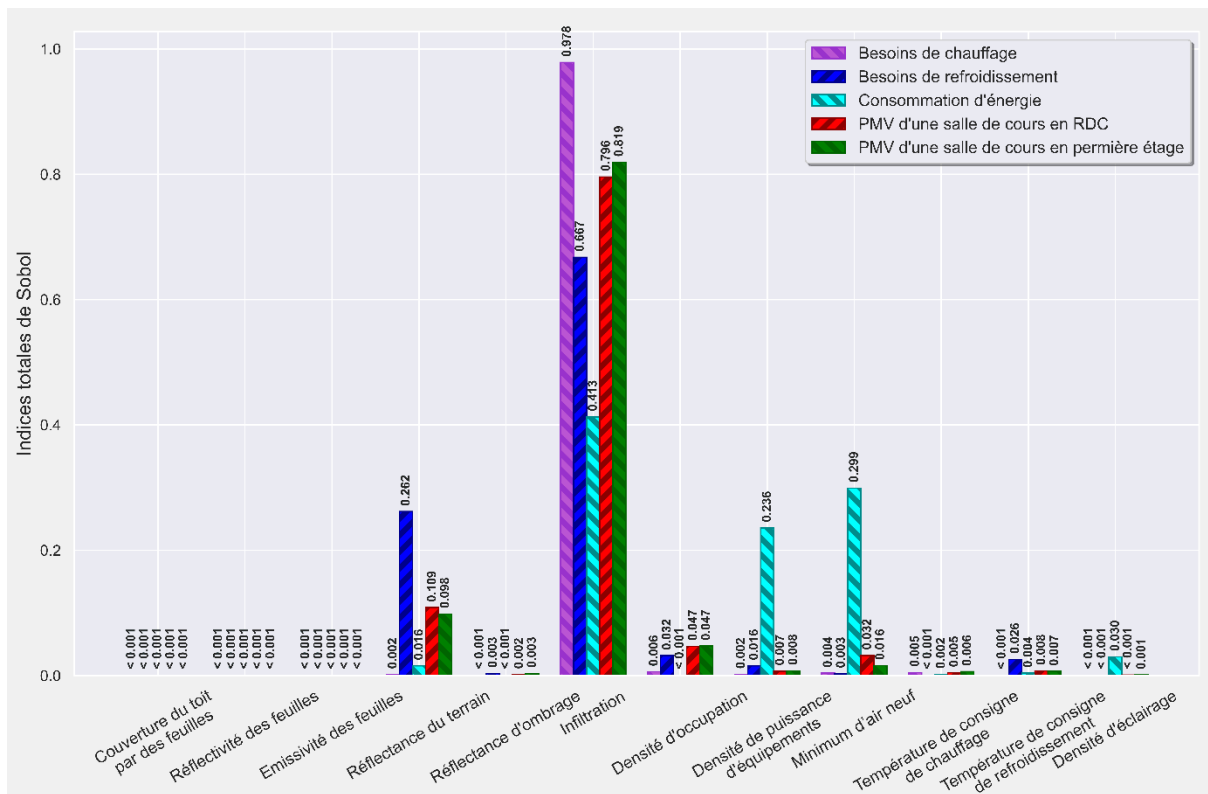


Figure 1: Résultats pour les effets de premier ordre et les effets totaux avec la méthode de Sobol

La consommation d'énergie électrique dans notre bâtiment dépend essentiellement de la VMC et des équipements présents dans le bâtiment et dans une très faible mesure de la densité d'éclairage. Pour l'éclairage, le bâtiment est équipé de 37 luminaires LED alimentés par le réseau informatique (technologie PoE). Leur consommation électrique maximum est de 25W, soit 925W à l'échelle du bâtiment. Cette valeur est très faible comparée à la puissance maximale consommée par la VMC, ≈3kW (données fabricant - VMC double flux VIM). Ce résultat est donc cohérent et est en accord avec ce qui est généralement observé dans la littérature (Amanowicz, Ratajczak, et Dudkiewicz 2023).

Un autre résultat remarquable concerne la réflectance du terrain (i.e. le rayonnement solaire diffusé par le terrain) qui a un impact significatif sur les besoins de refroidissement et le confort thermique des occupants. La contribution thermique due au rayonnement, extérieur ou intérieur, est prise en compte dans le calcul du PMV au travers de la température moyenne rayonnée. Etant donné que nous faisons l'hypothèse dans notre modèle que les volets sont ouverts en permanence, il est logique que réflectivité du terrain soit très influent sur la valeur du PMV et sur les besoins en refroidissement en été lorsque l'ensoleillement est maximal.

En outre, la densité d'occupation du bâtiment a principalement un impact sur le besoin de refroidissement et le confort thermique mesuré par l'indice PMV. Cet effet est d'autant plus remarquable pour la saison chaude, ce qui pourrait s'expliquer par une contribution thermique du rayonnement extérieur maximal en cette saison et un sous-dimensionnement identifiée des appareils de climatisation. À l'inverse, les températures de consigne de chauffage et de refroidissement ont un impact très modeste sur le modèle. Ce résultat est influencé par les lois de probabilité associées à ces paramètres (décrite dans le Tableau 2): une loi normale centrée sur la consigne et de variance 0,25 pour prendre en compte les incertitudes associées au thermocouple.

5. CONCLUSION

Nous proposons un nouveau cas d'étude qui se distingue par l'originalité du bâtiment étudié, exclusivement constitué de conteneurs maritimes. L'instrumentation de ce bâtiment offre également un avantage en terme de quantité de données collectées, qui permettent de fiabiliser la construction d'un modèle énergétique. À partir de ce modèle, nous avons mis en œuvre une méthode d'analyse de sensibilité pour identifier les paramètres influents du modèle qui seront calibrés par la suite. Nous avons sélectionné la méthode Sobol du fait de sa fiabilité et de sa complétude. Cette analyse a mis en lumière cinq paramètres influents : l'infiltration, le débit de la ventilation mécanique, la densité de puissance des équipements électriques, la réflectance du terrain et la densité d'occupation, quelle que soit la donnée de sortie considérée. Même si l'ensemble des résultats obtenus semble cohérent avec la littérature et/ou les données de conception du bâtiment, ils demandent à être approfondi. Le bâtiment constitué de nombreuses parties métalliques comporte des ponts thermiques qui ont sans aucun doute un impact sur les variables de sortie étudiées ici. Il sera donc nécessaire de développer une méthode pour les prendre en compte dans le logiciel EnergyPlus qui ne possède pas de modèle spécifique pour les évaluer. De plus, il sera nécessaire de mener une étude plus poussée de l'impact des gammes de variations sur les résultats de l'analyse de sensibilité. Enfin, il conviendrait d'évaluer les résultats obtenus dans cette étude en les comparant avec ceux obtenus par d'autres méthodes moins coûteuses, comme la méthode Morris ou RBD-FAST qui réduit le nombre d'échantillons avec un grand nombre de paramètre.

6. BIBLIOGRAPHIE

- Amanowicz, Łukasz, Katarzyna Ratajczak, et Edyta Dudkiewicz. 2023. « Recent Advancements in Ventilation Systems Used to Decrease Energy Consumption in Buildings—Literature Review ». *Energies* 16 (4): 1853. <https://doi.org/10.3390/en16041853>.
- Andargie, Maedot S., Marianne Touchie, et William O'Brien. 2019. « A review of factors affecting occupant comfort in multi-unit residential buildings ». *Building and Environment* 160 (août): 106182. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106182>.
- ASHRAE. 2009. « 2009-Ashrae-Handbook.Pdf ». 2009. <https://www.mepengineering.com/wp-content/uploads/2020/10/2009-ashrae-handbook.pdf>.

- Bertolini, Mattia, et Luca Guardigli. 2020. « Upcycling shipping containers as building components: an environmental impact assessment ». *The International Journal of Life Cycle Assessment* 25 (juin). <https://doi.org/10.1007/s11367-020-01747-3>.
- Calama-González, Carmen María, Phil Symonds, Giorgos Petrou, Rafael Suárez, et Ángel Luis León-Rodríguez. 2021. « Bayesian calibration of building energy models for uncertainty analysis through test cells monitoring ». *Applied Energy* 282 (janvier): 116118. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.116118>.
- Chong, Adrian, et Kathrin Menberg. 2018. « Guidelines for the Bayesian calibration of building energy models ». *Energy and Buildings* 174 (juillet). <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.06.028>.
- Coakley, Daniel, Paul Raftery, et Marcus Keane. 2014. « A Review of Methods to Match Building Energy Simulation Models to Measured Data ». *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 37: 123-41. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.05.007>.
- Doukari, Omar, Boubacar Seck, David Greenwood, Haibo Feng, et Mohamad Kassem. 2022. « Towards an Interoperable Approach for Modelling and Managing Smart Building Data: The Case of the CESI Smart Building Demonstrator ». *Buildings* 12 (3): 362. <https://doi.org/10.3390/buildings12030362>.
- Gan, Yanjun, Qingyun Duan, Wei Gong, Charles Tong, Yunwei Sun, Wei Chu, Aizhong Ye, Chiyuan Miao, et Zhenhua Di. 2014. « A comprehensive evaluation of various sensitivity analysis methods: A case study with a hydrological model ». *Environmental Modelling & Software* 51 (janvier): 269-85. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2013.09.031>.
- Helton, J.C., J.D. Johnson, C.J. Sallaberry, et C.B. Storlie. 2006. « Survey of Sampling-Based Methods for Uncertainty and Sensitivity Analysis ». *Reliability Engineering & System Safety* 91 (10-11): 1175-1209. <https://doi.org/10.1016/j.rss.2005.11.017>.
- Herman, Jon, et Will Usher. 2017. « SALib: An open-source Python library for Sensitivity Analysis ». *The Journal of Open Source Software* 2 (9): 97. <https://doi.org/10.21105/joss.00097>.
- Mechri, Houcem Eddine, Alfonso Capozzoli, et Vincenzo Corrado. 2010. « USE of the ANOVA approach for sensitive building energy design ». *Applied Energy* 87 (10): 3073-83. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.04.001>.
- Menberg, Kathrin, Yeonsook Heo, et Ruchi Choudhary. 2016. « Sensitivity Analysis Methods for Building Energy Models: Comparing Computational Costs and Extractable Information ». *Energy and Buildings* 133 (décembre): 433-45. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.10.005>.
- « NF EN 12831-1 ». s. d. Afnor EDITIONS. Consulté le 21 février 2024. <https://www.boutique.afnor.org/en-gb/standard/nf-en-12831/energy-performance-of-buildings-method-for-calculation-of-the-design-heat-l/fa184817/79485>.
- « NF EN 16798-1 ». s. d. Afnor EDITIONS. Consulté le 21 février 2024. <https://www.boutique.afnor.org/en-gb/standard/nf-en-16798/energy-performance-of-buildings-ventilation-for-buildings-part-1-indoor-env/fa187070/85501>.
- Nguyen, Anh-Tuan, et Sigrid Reiter. 2015. « A Performance Comparison of Sensitivity Analysis Methods for Building Energy Models ». *Building Simulation* 8 (6): 651-64. <https://doi.org/10.1007/s12273-015-0245-4>.
- Ramos Ruiz, Germán, Carlos Fernández Bandera, Tomás Gómez-Acebo Temes, et Ana Sánchez-Ostiz Gutierrez. 2016. « Genetic algorithm for building envelope calibration ». *Applied Energy* 168 (avril): 691-705. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.01.075>.
- Saltelli, Andrea, Paola Annoni, Ivano Azzini, Francesca Campolongo, Marco Ratto, et Stefano Tarantola. 2010. « Variance based sensitivity analysis of model output. Design and estimator for the total sensitivity index ». *Computer Physics Communications* 181 (2): 259-70. <https://doi.org/10.1016/j.cpc.2009.09.018>.
- Tian, Wei. 2012. « A review of sensitivity analysis methods in building energy analysis ». *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 20 (décembre): 411-19. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.12.014>.

Archétypes de profils d'occupation dans le résidentiel : entre emploi du temps et consommation énergétique

Alexis Wagner^{1,*}, Marie Ruellan², Romain Bourdais¹

¹Institut d'Electronique et des Technologies du numéRique, CentraleSupélec

Avenue De Boulaie, Cesson-Sévigné, 35700, France

² Systèmes et Applications des Technologies, de l'Information et de l'Electricité, CY Cergy Paris Université

Boulevard du Port, Cergy, 95000, France

*alexis.wagner@centralesupelec.fr

RÉSUMÉ. La classification d'enquêtes emploi du temps est une méthodologie permettant de proposer des modèles d'occupation représentatifs de la diversité des individus occupant le parc de logements. La distance de classification est un outil influençant fortement le résultat de la classification. Dans la littérature, c'est principalement la distance de Hamming qui est utilisée. Cependant, cette distance est très peu questionnée. Ce travail propose une méthodologie basée sur une distance de classification multicritère. Cette distance est constituée d'une pondération entre la distance de Hamming et une distance énergétique basée sur la consommation du poste de chauffage de chaque individu composant la base de données. Cette consommation est obtenue à partir d'une simulation thermique par gestion prédictive du chauffage. Finalement, la classification des individus issus de l'enquête emploi du temps française de 2010 a montré que l'intégration du critère énergétique facilite le choix du nombre de clusters et réduit la dispersion des consommations en chauffage au sein d'un cluster de 20 %.

MOTS-CLÉS. archétypes, commande prédictive, enquêtes emploi du temps, consommations, k-modes

1. CONTEXTE

Pour donner suite à la Stratégie nationale de réduction des émissions de gaz à effet de serre, la France s'engage à devenir neutre en carbone d'ici 2050. Dans cette optique, le secteur du bâtiment offre des perspectives d'économies d'énergie et de réduction des émissions particulièrement prometteuses puisqu'il représente environ 20 % des émissions nationales de GES et 40% de la consommation nationale d'énergie primaire (MTES,2015). Néanmoins, la mise en oeuvre de mesures de rénovation centralise des moyens humains et économiques conséquents. Il est nécessaire d'intégrer, en amont du processus, l'évaluation de leur efficacité environnementale et économique. L'enjeu central est donc de calculer la consommation des logements avant et après mise en oeuvre de la mesure de rénovation.

2. ETAT DE L'ART

2.1. L'ÉVALUATION DE MESURES DE RÉNOVATION À L'ÉCHELLE DU PARC DE LOGEMENTS

Dans la littérature, plusieurs travaux ont quantifié l'impact environnemental de solutions techniques de rénovation à l'échelle du parc. Certains de ces travaux utilisent des modèles basés sur la physique pour prédire la consommation des logements avant et après la mise en oeuvre de ces solutions techniques (Yang et al., 2022).

Les modèles physiques se basent sur les simulations thermique et électrique du logement. On observe deux inconvénients majeurs freinant leur exploitation pour l'évaluation à grande échelle du parc de logements. D'une part, les simulateurs physiques nécessitent d'intégrer des modèles réalistes de comportements de ménages. Pour éclaircir la suite de notre propos, nous définissons une situation d'habitation, comme l'association d'un bâtiment, de conditions extérieures et d'un ménage (Heinrich, 2024). Le second inconvénient des modèles physiques dans le cadre de l'évaluation de mesures de rénovation à grande échelle est que, chaque situation d'habitation traitée nécessite une simulation, avant et après mise en oeuvre de la rénovation. Traiter, au cas par cas, chaque situation d'habitation du parc français demeure un challenge quasiment impossible. Pour lever ce verrou, plusieurs travaux ont restreint leur étude à la simulation d'archétypes (Ben and Steemers, 2020; Ohene et al., 2022; Torabi Moghadam et al., 2019; Dascalaki et al., 2011). Les archétypes représentent des bâtiments, ménages ou conditions extérieures fictifs mais représentatifs de segments homogènes. L'hypothèse centrale est que la simulation d'un archétype fournit des informations sur l'ensemble des éléments composant son segment. Le nombre de simulations à réaliser est donc nettement réduit. Ainsi, Les bâtiments français constituant le parc peuvent être étudiés par l'intermédiaire des archétypes proposés par le projet TABULA (Loga et al., 2016). L'étude de l'influence du climat peut être restreinte à l'étude des zones climatiques françaises utilisées dans les réglementations thermiques (Ministère de la Transition Écologique, 2020). Cependant, à notre connaissance, il n'existe pas d'archétypes de comportement représentatifs des ménages français intégrables dans des simulations de modèles physiques.

2.2. LA CLASSIFICATION DE DONNÉES D'ENQUÊTE EMPLOI DU TEMPS

L'occupation du logement par un ménage influence fortement sa consommation. Pour prédire cette dernière avec précision, les simulateurs doivent intégrer des modèles réalistes d'occupation. Le challenge majeur dans la construction de ces modèles réside dans la variabilité du comportement d'un même individu. Ainsi, pour capter cette variabilité, des travaux ont développé des modèles d'occupation stochastiques à partir des données issues d'Enquête Emploi du Temps (Institut National de la Statistique et des Études Économiques (INSEE), 2010). Ces données sont constituées du carnet d'activité sur une journée de milliers d'individus. Ce type d'enquête a été mis en place dans de nombreux pays et leur utilisation est largement répandue pour l'étude des comportements de ménages (Osman and Ouf, 2021). A partir de ces données, les auteurs de (Wilke et al., 2011) ont donc proposé un modèle d'occupation de ménage stochastique défini par une loi de Bernoulli. Un tirage est réalisé pour déterminer l'état d'occupation à l'instant t_k et un autre pour estimer la durée de l'état. Néanmoins, l'enchaînement des activités présente des incohérences. En effet, dans ce travail, l'état d'occupation à l'instant t_k ne dépend pas de l'état à l'instant précédent t_{k-1} . Améliorant ce modèle, les auteurs de (Richardson et al., 2008) ont intégré cet effet mémoire en définissant l'occupation comme une chaîne de modèles de Markov d'ordre 1. La probabilité de rester ou de changer d'état dépend directement de l'état précédent. Il en résulte des enchaînements d'activités plus cohérents.

Néanmoins, le modèle développé par les auteurs de (Richardson et al., 2008) n'est pas représentatif de la diversité des individus occupant le parc de logements. En effet, tous les individus ont servi à l'estimation des paramètres de la chaîne de Markov. Pour améliorer la représentativité des modèles d'occupations, les auteurs de (Vorger, 2014) ont développé une méthodologie dont les entrées sont les variables descriptives du ménage étudié et dont la sortie est la chaîne de Markov représentative de son occupation. Cependant, bien qu'adapté pour des études au cas par cas, le nombre important de paramètres d'entrée ne permet pas d'intégrer

ces modèles pour l'évaluation à grande échelles de mesures de rénovation. D'autres travaux nombreux travaux ont ajouté avant l'étape d'identification une étape de classification. L'étape de classification a pour objectif de regrouper les profils d'occupation similaires entre eux. Pour chaque groupe, les paramètres de la chaîne de Markov sont estimés à partir des profils d'occupation des individus le composant. Ces travaux ont montré des résultats notables. En effet, les auteurs de (Sood et al., 2023) ont montré des écarts de consommation allant de 25 % à 35 % entre des modèles d'archétypes d'occupation stochastiques basées sur des données réelles et déterministes (ASHRAE 90.1 (Abushakra et al., 2001)). Les auteurs de (Buttitta et al., 2019) ont associé des archétypes d'occupation à des archétypes de logement et ont montré des écarts de consommation avec des scénarios d'occupation déterministes allant jusqu'à 30 %. Les auteurs de (Mitra et al., 2020) ont quantifié, quant à eux, des écarts allant jusqu'à 41 % pour des archétypes basés sur les données d'enquête emploi du temps américaines. Principalement, deux algorithmes de classification sont utilisés pour regrouper les profils d'occupation: l'algorithme k-modes (Diao et al., 2017; Buttitta et al., 2017) et les algorithmes de clustering hiérarchique (Aerts et al., 2014). Cependant, bien que considéré comme un facteur déterminant, la distance caractérisant la similitude entre deux scénarios est peu questionnée dans les travaux précédents. Majoritairement, ces travaux utilisent la distance de Hamming, quantifiant le temps d'activité commun entre deux profils. On retrouve une distance différente uniquement dans les travaux (Diao et al., 2017) avec l'utilisation de la distance de Levenshtein. Ces travaux supposent donc, à travers leur distance de classification, que la similarité des comportements des individus d'un même groupe engendre une consommation homogène au sein de ce groupe.

Cette observation nous questionne sur l'utilisation de la distance de Hamming pour la classification. **Est-il possible de définir une distance offrant un meilleur regroupement des comportements permettant d'estimer de façon robuste les consommations énergétiques après simulation ?** Ce travail se distingue en deux parties. Dans un premier temps, à partir des profils d'activités des individus interrogés lors de l'enquête emploi du temps réalisée par l'INSEE en 2010, d'estimer pour chaque profil la consommation énergétique du chauffage par commande prédictive linéaire. Cette consommation est par la suite intégrée dans un algorithme de classification multicritère dont la distance entre deux individus est définie par une pondération entre leur similitude en termes d'activité et la proximité de leur consommation en chauffage.

3. MÉTHODOLOGIE

La schéma de principe de la méthodologie développée est présenté figure 1. Un premier tri de la base de données est réalisé. Pour chaque profil d'occupation la consommation de chauffage est évaluée. Le chauffage est piloté par commande prédictive linéaire avec gestion de l'intermittence. La consommation est estimée pour un unique cas d'étude composé d'un modèle thermique de bâtiment et de conditions extérieures. Les consommations énergétiques et les profils d'occupation sont associés, par méthode k-modes. Les individus composant chaque groupe permettent d'identifier les paramètres d'une chaîne de Markov d'ordre 1.

3.1. JEU DE DONNÉES ET TRI

Les données utilisées sont issues de l'enquête française emploi du temps réalisée en 2010. Cette enquête a interrogé 12 000 ménages pour obtenir le déroulement des activités qu'ils ont réalisé avec un pas de temps de 10 minutes. Pour ce travail, ces activités ont été classifiées en 3 états : présent, sommeil et absent. De plus, uniquement les carnets des individus habitant dans une maison individuelle ont été sélectionnés dans ce travail. La figure 2 présente la distribution moyenne des profils d'activité des individus sélectionnés dans la base de données.

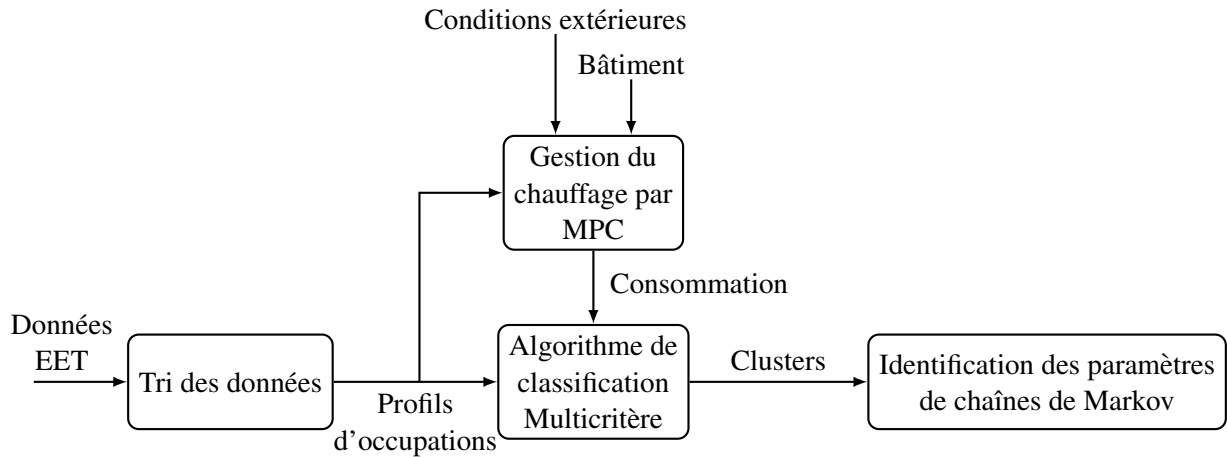


Figure 1: Méthodologie de classification de profils d'occupation avec intégration d'un critère énergétique

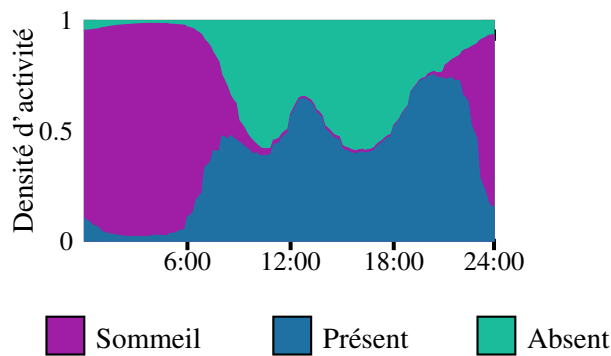


Figure 2: Densité moyenne d'activité des individus habitant une maison individuelle

3.2. GESTION DU CHAUFFAGE PAR COMMANDE PRÉDICTIVE LINÉAIRE (MPC)

3.2.1. Cas d'étude

Le logement individuel étudié correspond à un archétype de maison individuelle moyennement isolée. Ce modèle a été construit à partir des données du projet Tabula belge. Ce projet européen classe le parc de logements de 20 pays en segments homogènes (Loga et al., 2016). Notre choix s'est porté sur un modèle d'archétype de bâtiment belge car, à notre connaissance, il n'existe pas de modèles thermiques d'archétypes de bâtiments français validés par la communauté scientifique. De plus, le parc de logements belges a subi une évolution de sa réglementation thermique similaire à la France. Les logements inclus dans un même segment sont caractérisés par leur année de construction et leur type d'habitation (maison individuelle, mitoyenne, logement collectif, immeuble). Le modèle utilisé est explicité dans (Reynders et al., 2014). Sa particularité est qu'il est bi-zone, la partie 'jour' du logement est séparée de la partie 'nuit' par un étage (figure 3). Pour chaque zone, la température de l'air intérieur est désignée par T_{air} , la température des murs en contact avec l'extérieur par T_m , celle des murs intérieurs T_{mi} , et d'étage T_{e0} et T_{e1} . La partie jour échange de la chaleur avec le sol dont la température est désignée par T_s . Le renouvellement de l'air intérieur est modélisé à travers la résistance R_{vent} . Cette résistance thermique inclut également la résistance thermique des fenêtres. La

température de l'air extérieure est notée T_{ext} .

De plus, l'air intérieur des deux zones est directement chauffé par convection par le système de chauffage. Les autres murs et sols sont chauffés par rayonnement. Les consignes en chauffage de la partie 'jour' et de la partie 'nuit' peuvent être différentes soit:

$$u = \begin{bmatrix} u_j \\ u_n \end{bmatrix} \quad (1)$$

On observe les températures de l'air intérieur, à la fois de la zone 'jour' et de la zone 'nuit', soit:

$$Y = \begin{bmatrix} T_{air_j} \\ T_{air_n} \end{bmatrix} \quad (2)$$

Les fenêtres et les murs absorbent les rayonnements solaires décomposés selon les 4 points cardinaux tel que:

$$\Phi_s = \begin{bmatrix} \Phi_{nord} \\ \Phi_{est} \\ \Phi_{sud} \\ \Phi_{ouest} \end{bmatrix} \quad (3)$$

Le modèle d'état linéaire associé peut s'écrire sous sa forme discrète à partir de la figure 3:

$$X_{k+1} = AX_k + Bu_k + E_T T + E_\Phi \Phi_s \quad (4)$$

$$Y_k = CX_k \quad (5)$$

- $X \in \mathbf{R}^9$: vecteur d'état
- $A \in \mathbf{R}^{9 \times 9}$: matrice d'état
- $E_T \in \mathbf{R}^{9 \times 2}$: matrice de perturbation (T_{ext}, T_s)
- $E_\Phi \in \mathbf{R}^{9 \times 2}$: matrice de perturbation (Φ_s)

La série temporelle de température extérieure sélectionnée est représentative d'une journée de janvier de l'archétype de la zone climatique H2B (La Rochelle) (figure 4a). Les apports solaires sont obtenus à partir de PVSYS pour cette même zone.

3.2.2. Commande prédictive linéaire

L'algorithme de gestion de chauffage étudié est une commande prédictive linéaire avec gestion de l'intermittence (Morosan et al., 2010). A chaque instant k , le contrôleur détermine la séquence de commande de la puissance de chauffe $u_{K|k}$ sur un horizon de prédiction de longueur K , séquence minimisant un critère d'optimisation. Seul le premier élément de la séquence est appliqué au système et un nouveau calcul est effectué au pas de temps suivant. La contrainte à respecter, $W_{T_{K+1|k}}$, est liée au confort lorsque l'occupant est présent dans le logement, indication fournie par la matrice d'occupation $OCC_{K+1|k}$. Pour garantir la faisabilité du problème d'optimisation, cette contrainte est relâchée par une variable d'écart, notée $\epsilon_{T_{K+1|k}}$ et pénalisée

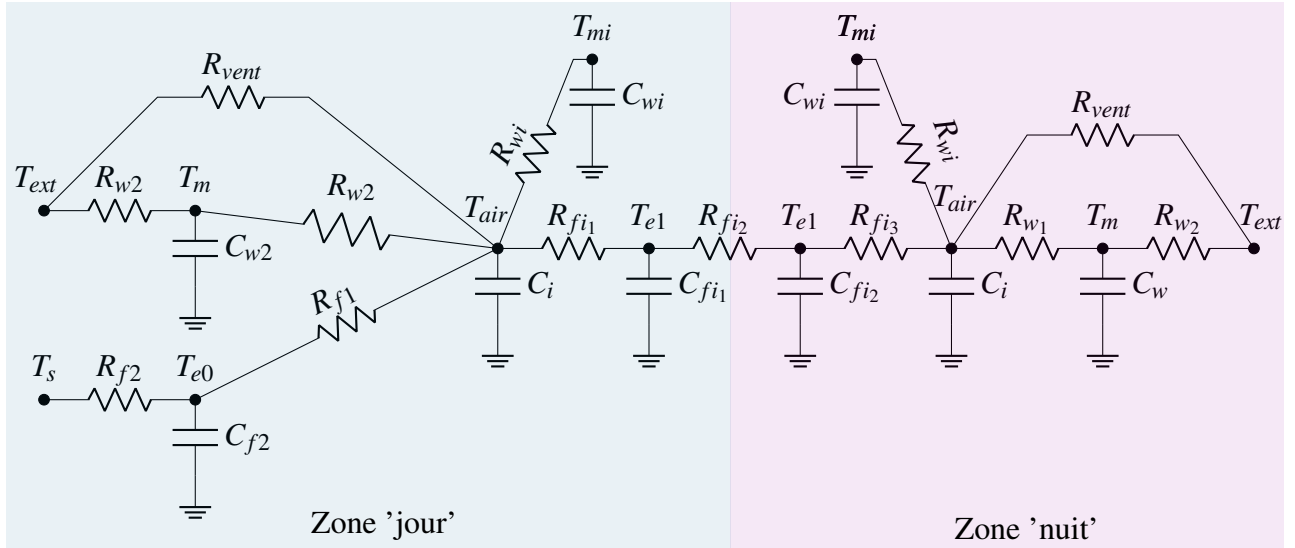


Figure 3: Modèle thermique bi-zone issu de (Reynders et al., 2014)

si la contrainte n'est pas respectée. Le problème d'optimisation prend la forme suivante :

$$\begin{aligned}
 \min \quad & J(u_{jK|k}, u_{nK|k}, \varepsilon_{T_{jK|k}}, \varepsilon_{T_{nK|k}}) = \mathbf{1}_{N_p}^T u_{jK|k} + \mathbf{1}_{N_p}^T u_{nK|k} + \text{pen}_T \mathbf{1}_{N_p}^T \varepsilon_{T_{jK|k}} + \text{pen}_T \mathbf{1}_{N_p}^T \varepsilon_{T_{nK|k}} \\
 \text{soumis à:} \quad & 0 \leq u_{jK|k} \leq u_{j\max} \\
 & 0 \leq u_{nK|k} \leq u_{n\max} \\
 & T_{\text{air}_{jK+1|k}} + \varepsilon_{T_{jK+1|k}} \geq \text{OCC}_{jK+1|k} W_{T_{jK+1|k}} \\
 & T_{\text{air}_{nK+1|k}} + \varepsilon_{T_{nK+1|k}} \geq \text{OCC}_{nK+1|k} W_{T_{nK+1|k}} \\
 & \varepsilon_{T_{jK|k}} \geq 0 \\
 & \varepsilon_{T_{nK|k}} \geq 0
 \end{aligned}$$

Le modèle de prédiction choisit est le même modèle d'état que celui utilisé pour la simulation thermique. La propagation du modèle d'état (1) permet d'exprimer les sorties prédites en fonction de l'état courant X_k . Soit la température de l'air sur l'ensemble de l'horizon de prédiction :

$$Y_{K|k} = FX_k + H_u u_{K|k} + H_T T_{K|k} + H_\Phi \Phi_{K|k} \quad (6)$$

$$F = \begin{bmatrix} CA \\ \vdots \\ CA^{N_p} \end{bmatrix}, \quad H_u = \begin{bmatrix} CB_u & 0 & 0 & \dots & 0 \\ CAB_u & CB_u & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ CA^{N_p-1}B_u & CA^{N_p-2}B_u & CA^{N_p-3}B_u & \dots & CB_u \end{bmatrix}$$

$$H_T = \begin{bmatrix} CB_t & 0 & 0 & \dots & 0 \\ CAB_t & CB_t & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ CA^{N_p-1}B_t & CA^{N_p-2}B_t & CA^{N_p-3}B_t & \dots & CB_t \end{bmatrix}$$

3.3. SIMULATION THERMIQUE

Une simulation thermique de la commande prédictive précédente est appliquée à l'ensemble des profils d'occupation de la base de données. Chaque simulation est réalisée pour le même bâtiment et les mêmes conditions extérieures. Les consignes en température de chaque zone sont regroupées dans le tableau suivant:

	Contrainte	$OCC = 1$	$OCC = 0$
Zone 'jour'	W_{T_j}	20	16
Zone 'nuit'	W_{T_n}	18	16

On définit la consommation totale associée au i^{eme} profil d'individus conséquence de la gestion du chauffage par la commande prédictive linéaire précédente :

$$E_i = \int u_{i_j} dt + \int u_{i_n} dt \quad (7)$$

La figure 4 présente la distribution de la consommation de la zone 'jour', la zone 'nuit' et la consommation totale pour l'ensemble de la base de données.

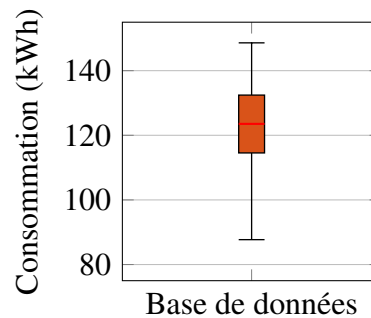


Figure 4: Distribution de la consommation totale en chauffage des individus composant la base de données

3.4. ALGORITHME DE CLASSIFICATION MULTICRITÈRE

3.4.1. *k-modes++*

L'algorithme K-modes ++ est une amélioration à l'initialisation de l'algorithme K-modes, largement répandu pour la classification de données. Son objectif est de diviser un jeu de données noté X en n_c groupes, minimisant l'inertie intra-cluster du jeu de données :

$$W(X, C) = \sum_{k=1}^{n_c} \sum_{Z_i \in C_k} d(Z_i, C_k) \quad (8)$$

- X : Jeu de données constitué des profils d'occupations sur une journée des 12600 individus
- n_c : nombre de clusters
- C : Vecteurs constitué des centres des n_c clusters
- C_k : centre du cluster k
- Z_i : i^{eme} individu
- d : distance de classification entre deux profils d'occupation à trois états

3.4.2. Distance entre deux individus

La distance choisie est l'élément central pour intégrer le potentiel d'économie d'énergie au travail de classification. L'objectif est d'obtenir des profils d'occupation à trois états distants entre eux mais minimisant également la dispersion de la consommation d'énergie des individus appartenant au même cluster. Ainsi, la distance de classification développée se décompose en deux termes pondérés par le coefficient $\lambda \in [0, 1]$: la distance de Hamming d_h et la distance "énergétique" d_E . Le profil de chaque individu est constitué de l'ensemble de ses activités (présent, sommeil et absent) sur une journée avec un pas de temps de 10 minutes et de sa consommation obtenue par simulation thermique. Soit la distance entre le profil Z_i et Z_j :

$$d(Z_i, Z_j) = (1 - \lambda) \cdot d_H(Z_i, Z_j) + \lambda \cdot d_E(Z_i, Z_j) \quad (9)$$

Distance de Hamming:

La distance de Hamming compte le nombre de dissemblances entre deux vecteurs de même taille. Pour l'application proposée, cette distance compare, à chaque pas de temps t , les activités a de deux individus considérant les m pas de temps composant les différents profils Z_i et Z_j , soit:

$$d_H(Z_i, Z_j) = \frac{1}{m} \sum_{t=1}^m \delta(a_{i_t}, a_{j_t}) \quad (10)$$

Où:

$$\delta(a_{i_t}, a_{j_t}) = \begin{cases} 1 & \text{si } a_{i_t} = a_{j_t} \\ 0 & \text{si } a_{i_t} \neq a_{j_t} \end{cases}$$

Distance énergétique:

Le critère énergétique se base sur la consommation obtenue par simulation thermique présentée dans la sous-section précédente. On définit la distance énergétique entre deux profils :

$$d_E(Z_i, Z_j) = \frac{|E(Z_i) - E(Z_j)|}{E_m - \bar{E}} \quad (11)$$

- $E(Z_i)$: consommation totale de l'individu Z_i
- E_m : consommation maximale
- \bar{E} : consommation moyenne

3.4.3. Critère de décision

Une métrique couramment utilisée pour estimer le nombre de clusters le plus adapté à la classification est l'inertie intra-cluster, caractérisant la dispersion des individus par rapport au centre du cluster. La distance de classification a deux critères distincts : la similitude des profils et leur consommation. Ainsi, on définit deux inerties pour évaluer la performance de la classification.

La variance intra-cluster associée à la distance de Hamming, W_h , pour un nombre de clusters n_c :

$$W_H(n_c) = \sum_{k=1}^{n_c} \sum_{Z_i \in C_k} d_H^2(Z_i, C_k) \quad (12)$$

La variance intra-cluster associée à la distance énergétique, W_E , pour un nombre de clusters n_c :

$$W_E(n_c) = \sum_{k=1}^{n_c} \sum_{Z_i \in C_k} d_E^2(Z_i, C_k) \quad (13)$$

Ces deux critères vont permettre à la fois d'estimer le nombre de clusters n_c mais aussi un coefficient de pondération λ adapté.

3.5. IDENTIFICATION DES PARAMÈTRES DE CHAÎNES DE MARKOV

Dans le cadre de notre travail, on suppose qu'un individu peut uniquement être dans un état 'sommeil', 'présent' ou 'absent'. Une fois les individus regroupés, pour chaque groupe et à chaque pas de temps, les fréquences de changement d'état sont décomptées. Ainsi, de l'instant $t - 1$ à t , l'individu peut conserver son état ou passer à un autre état. La chaîne de Markov est donc dépendante du temps. On définit la matrice de transition associée à l'instant t , $\forall t > 1$:

$$T_t = \begin{bmatrix} p_t^{11} & p_t^{12} & p_t^{13} \\ p_t^{21} & p_t^{22} & p_t^{23} \\ p_t^{31} & p_t^{32} & p_t^{33} \end{bmatrix} \quad (14)$$

Où P_t^{ji} désigne la probabilité de passer de l'état i sachant $t - 1$ à l'état j à l'instant t , soit:

$$P_t^{ji} = P(a(t) = j \mid a(t-1) = i) = \frac{n_t^{ji}}{n_t^{tot}} \quad (15)$$

$a(t)$: état de l'individu à l'instant t

n_t^{ji} : nombre de passage de l'état j à i entre l'instant $t - 1$ et t

n_t^{tot} : nombre total d'observations

4. RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

Les données présentées précédemment sont regroupées suivant cinq valeurs de $\lambda \in \{0, 0.1, 0.15, 0.2, 0.5\}$ et pour $K \in [1, \dots, 9]$. La figure 5 représente l'inertie intra cluster énergétique normalisée, $W_{E,N}$ en fonction de l'inertie intra cluster normalisée associée à la distance de Hamming, $W_{H,N}$. La normalisation permet d'observer les deux grandeurs à la même échelle.

Pour $\lambda = 0$, la variance énergétique n'est pas systématiquement décroissante lorsque le nombre de clusters augmente. Ce résultat met en lumière que sans critère de classification énergétique, l'augmentation de K ne garantit pas une meilleure distinction énergétique des clusters.

De plus, pour $\lambda = 0.5$, la variance de Hamming diminue très peu en comparaison des autres valeurs. Les regroupements résultants sont uniquement réalisés suivant le critère énergétique. Bien qu'intéressant énergétiquement, les modèles de Markov s'en retrouvent donc dégradés.

Pour $\lambda \in \{0.1, 0.15, 0.2\}$, une enveloppe apparait représentant un compromis intéressant entre similitude des profils d'un même groupe et dispersion énergétique des consommations. L'intégration du critère énergétique stabilise également la classification pour $\lambda \in \{0.15, 0.2\}$. En effet, les deux variances sont décroissantes. La variance énergétique permet également de choisir plus facilement le nombre de clusters résultant. En effet, un nombre de clusters acceptable correspond au nombre de clusters minimal, à partir duquel l'augmentation de K diminue

peu les deux variances. Pour la suite de l'analyse, nous fixons le nombre de clusters à 5. En effet, au-delà de 5 clusters, les inerties intra-clusters de Hamming et énergétiques stagnent. L'ajout d'un cluster supplémentaire est donc peu intéressant.

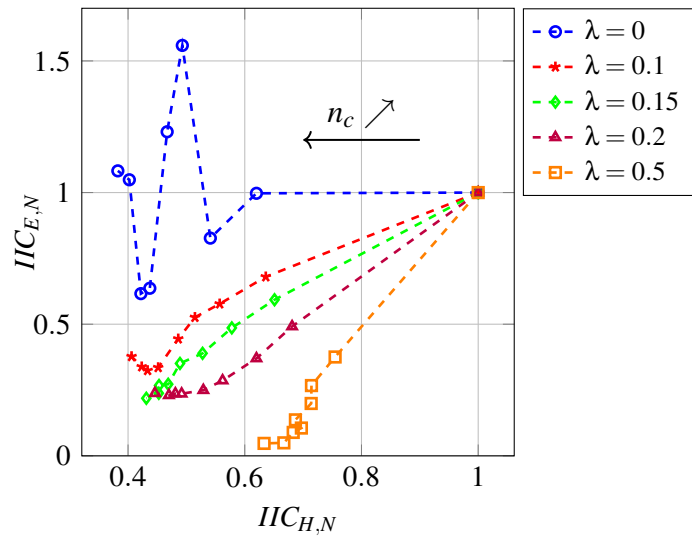


Figure 5: Inertie Intra cluster énergétique, $W_{E,N}$, en fonction de l'Inertie Intra cluster de Hamming, $W_{H,N}$

La figure 6 présente les densités moyennes des clusters résultant pour $\lambda \in \{0, 0.15\}$ pour $K = 5$. On identifie:

Pour $\lambda = 0$ pour 12663 individus:

- Cluster 1 (9.4 %):** départ en journée avec un retour tardif au logement
- Cluster 2 (23.3 %):** départ en journée retour en début de soirée
- Cluster 3 (17.5 %):** absence longue en après-midi
- Cluster 4 (14.2 %):** absence en journée avec intermittence
- Cluster 5 (35.6 %):** présence au logement toute la journée

Pour $\lambda = 0.15$ pour 12663 individus:

- Cluster 1 (10.8 %):** départ en journée avec un retour tardif au logement
- Cluster 2 (30.9 %):** départ en journée retour en début de soirée
- Cluster 3 (18.8 %):** absence longue en après-midi
- Cluster 4 (18 %):** absence le matin
- Cluster 5 (21 %):** présence au logement toute la journée

L'observation de ces clusters montre que les principaux changements lorsque λ passe de 0 à 0.15 se distinguent au niveau des clusters 3-4-5. En effet, le cluster 4 pour $\lambda = 0$ est un cluster caractérisant l'intermittence. Cependant, l'algorithme de classification pour $\lambda = 0.15$ considère qu'énergétiquement, il est plus pertinent de diviser ce cluster en 1 cluster de départ le matin (cluster 4) et un de départ l'après-midi (cluster 5). On observe également une meilleure définition du cluster 5.

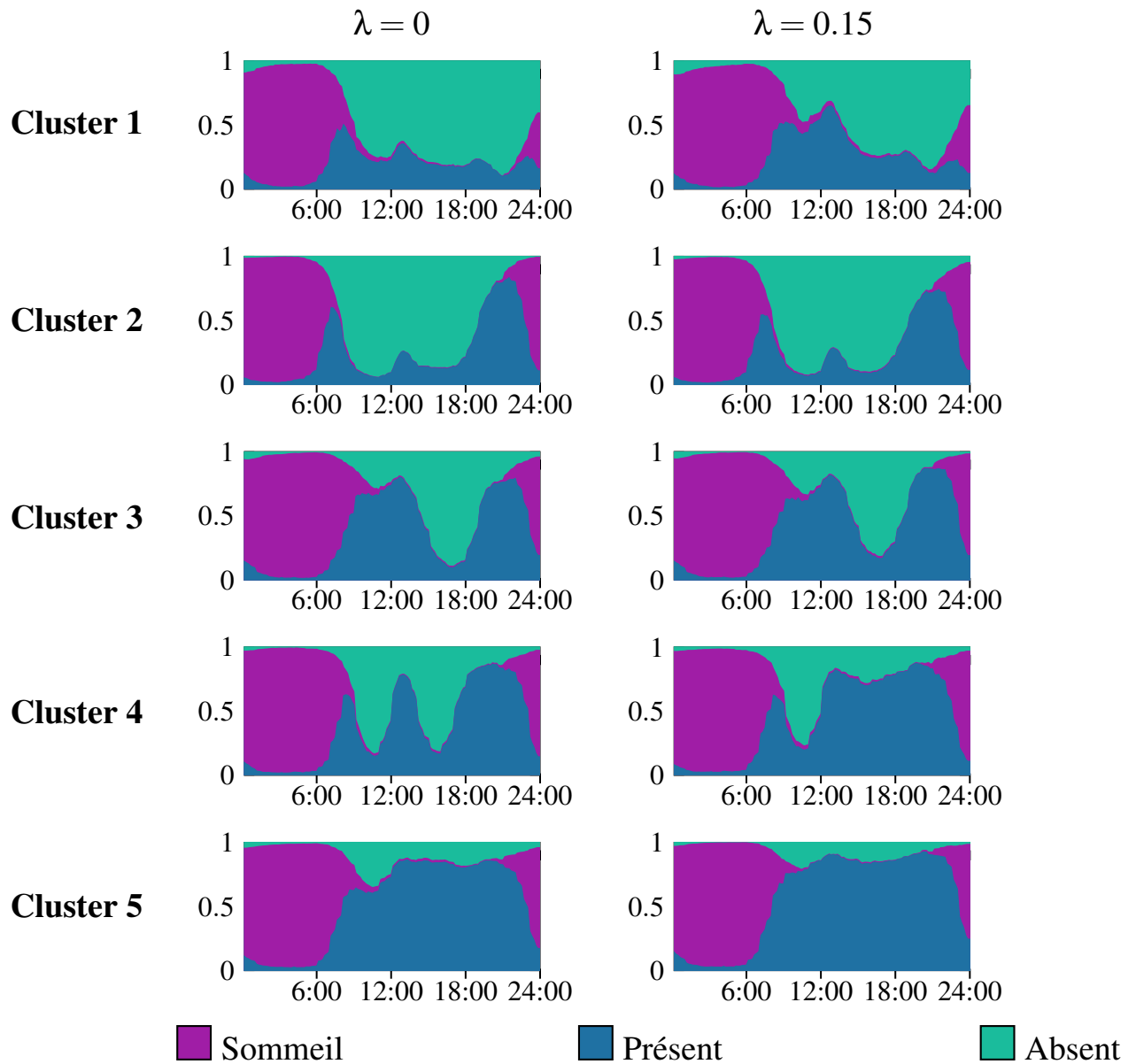


Figure 6: Densité de probabilité d'activité des 5 clusters pour $\lambda = 0$ et $\lambda = 0.15$. Les clusters sont numérotés selon leur consommation en chauffage croissante

La figure 7 présente les boîtes à moustaches des consommations des profils composant chaque cluster. Dans un premier temps, l'écart type moyen en consommation des groupes est de 8.5 kWh pour $\lambda = 0$ et de 6.8 kWh pour $\lambda = 0.15$ soit une réduction de 20 %. Il y a donc en moyenne moins de dispersion énergétique au sein des groupes.

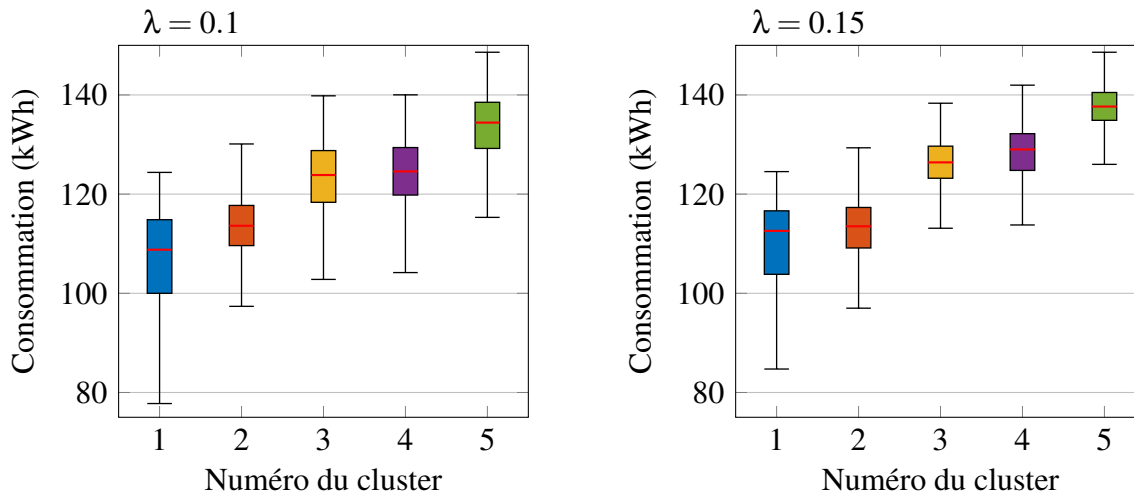


Figure 7: Boîtes à moustaches de la consommation énergétiques des individus composant les clusters

5. CONCLUSION

Ce travail propose une méthodologie de classification d'enquêtes emploi du temps basée sur une distance de classification multicritère. En effet, pour chaque profil, leur consommation est estimée par simulation thermique du chauffage piloté par commande prédictive linéaire avec gestion de l'intermittence. Les différents profils et leur consommation définissent ainsi une distance de classification multicritère. Les profils sont regroupés selon leur similitude et leur différence de consommation. Dans un premier temps, on observe que l'intégration du critère énergétique stabilise la classification facilitant la détermination du nombre de clusters. De plus, l'application aux enquêtes emploi du temps françaises a montré une réduction moyenne de la dispersion des consommations de 20 %. Ce travail apporte donc des premières perspectives intéressantes. Cette idée de construction d'un multicritère pour la classification peut être enrichie, en intégrant d'autres éléments, tels les algorithmes de pilotage, les consommations électriques, les capacités d'autoconsommation, ...

Cependant, un travail conséquent reste à réaliser pour consolider les apports méthodologiques et l'analyse des résultats. Il est notamment nécessaire de valider la méthodologie vis à vis d'autres situations d'habitation (bâtiments, conditions extérieures).

BIBLIOGRAPHIE

- Abushakra, B., Sreshthaputra, A., Haberl, J., and Claridge, D. (2001). Compilation of diversity factors and schedules for energy and cooling load calculations. Technical report, ASHRAE Research Project 1093-RP, Final Report.
- Aerts, D., Minnen, J., Glorieux, I., Wouters, I., and Descamps, F. (2014). A method for the identification and modelling of realistic domestic occupancy sequences for building energy demand simulations and peer comparison. *Building and Environment*, 75:67–78.
- Ben, H. and Steemers, K. (2020). Modelling energy retrofit using household archetypes. *Energy and Buildings*, 224:110224.
- Buttitta, G., Turner, W., and Finn, D. (2017). Clustering of Household Occupancy Profiles for Archetype Building Models. *Energy Procedia*, 111:161–170.
- Buttitta, G., Turner, W. J. N., Neu, O., and Finn, D. P. (2019). Development of occupancy-integrated archetypes: Use of data mining clustering techniques to embed occupant behaviour profiles in archetypes. *Energy and Buildings*, 198:84–99.
- Dascalaki, E. G., Droutsa, K. G., Balaras, C. A., and Kontoyiannidis, S. (2011). Building typologies as a tool for assessing the energy performance of residential buildings – A case study for the Hellenic building stock. *Energy and Buildings*, 43(12):3400–3409.
- Diao, L., Sun, Y., Chen, Z., and Chen, J. (2017). Modeling energy consumption in residential buildings: A bottom-up analysis based on occupant behavior pattern clustering and stochastic simulation. *Energy and Buildings*, 147:47–66.
- Heinrich, M. (2024). *Habitats, Habitants et Pratiques énergétiques : Intégrer les situations d’habitation dans la modélisation de la consommation d’énergie domestique*. PhD thesis, Ecole des Ponts, ParisTech.
- Institut National de la Statistique et des Études Économiques (INSEE) (2010). Enquête emploi du temps (eet). Données d’enquête.
- Loga, T., Stein, B., and Diefenbach, N. (2016). TABULA Building Typologies in 20 European countries making energy-related features of residential building stocks comparable. *Energy and Buildings*, 132.
- Ministère de la Transition Écologique (2020). Règlement Environnemental 2020. Disponible sur : <https://www.ecologie.gouv.fr/reglement-environnemental-re-2020>.
- Mitra, D., Steinmetz, N., Chu, Y., and Cetin, K. S. (2020). Typical occupancy profiles and behaviors in residential buildings in the united states. *Energy and Buildings*, 210:109713.
- Morosan, D.-P., Bourdais, R., Dumur, D., and Buisson, J. (2010). Building temperature regulation using a distributed model predictive control. *Energy and Buildings*, 42(9):1445.
- Ohene, E., Hsu, S.-C., and Chan, A. P. C. (2022). Feasibility and retrofit guidelines towards net-zero energy buildings in tropical climates: A case of Ghana. *Energy and Buildings*, 269:112252.

- Osman, M. and Ouf, M. (2021). A comprehensive review of time use surveys in modelling occupant presence and behavior: Data, methods, and applications. *Building and Environment*, 196:107785.
- Reynders, G., Diriken, J., and Saelens, D. (2014). Bottom-up modeling of the belgian residential building stock: Influence of model complexity. *International conference on system simulation in buildings edition 9, Liège, Belgium*;, pages 574–592.
- Richardson, I., Thomson, M., and Infield, D. (2008). A high-resolution domestic building occupancy model for energy demand simulations. *Energy and Buildings*, 40(8):1560–1566.
- Sood, D., Alhindawi, I., Ali, U., McGrath, J. A., Byrne, M. A., Finn, D., and O’Donnell, J. (2023). Simulation-based evaluation of occupancy on energy consumption of multi-scale residential building archetypes. *Journal of Building Engineering*, 75:106872.
- Torabi Moghadam, S., Coccolo, S., Mutani, G., Lombardi, P., Scartezzini, J.-L., and Mauree, D. (2019). A new clustering and visualization method to evaluate urban heat energy planning scenarios. *Cities*, 88:19–36.
- Vorger, (2014). *Étude de l’influence du comportement des habitants sur la performance énergétique du bâtiment*. These de doctorat, Paris, ENMP.
- Wilke, U., Haldi, F., and Robinson, D. (2011). A model of occupant’ activities based on time use survey data.
- Yang, X., Liu, S., Zou, Y., Ji, W., Zhang, Q., Ahmed, A., Han, X., Shen, Y., and Zhang, S. (2022). Energy-saving potential prediction models for large-scale building: A state-of-the-art review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 156:111992.

Contribution solaire au bilan thermique du corps humain : un modèle anisotropique simplifié

Edouard Walther^{1,2*}, Mateusz Bogdan³

¹INSA Strasbourg, Département Génie Thermique Énergétique et Environnement

24 Boulevard de la Victoire - 67000 Strasbourg

²Université de Strasbourg, INSA Strasbourg, CNRS, ICube Laboratory UMR 7357, Strasbourg, France

³AREP L'hypercube, 16 avenue d'Ivry 75013 Paris, France

*edouard.walther@insa-strasbourg.fr

RÉSUMÉ. Le calcul de la contribution solaire au bilan thermique dans les simulations numériques du confort extérieur est divisé en deux approches : soit avec une géométrie simplifiée et un flux solaire sans composante anisotrope, soit avec une géométrie plus complexe de l'humain et un calcul détaillé des flux composantes du flux solaire, utilisant par exemple un ciel paramétré. On se propose ici de développer une approche intermédiaire permettant une reconstitution analytique du flux total reçu par un individu à partir des flux direct et diffus horizontaux, tout en intégrant un modèle anisotrope de ciel diffus.

MOTS-CLÉS. flux solaire, individu

ABSTRACT. The solar contribution to the heat balance of the individual in numerical simulations of the outdoor climate is divided in two branches : either with a simplified geometry of the human being, or with a detailed computation of the solar flux, for instance with a parametrized sky model. The present work deals with an intermediate approach allowing to compute the direct and diffuse components of the solar flux in unobstructed configurations, integrating the anisotropy of the diffuse sun radiation.

KEYWORDS. solar flux, individual

1. INTRODUCTION

La contribution du rayonnement solaire au bilan thermique de l'humain en extérieur est significative. Le flux radiant S reçu par un individu est donné par la somme des flux solaire ϕ et infrarouge E :

$$S = \alpha\phi + \varepsilon E \quad (1)$$

Diverses méthodes ont été développées pour caractériser le flux solaire reçu par un individu à partir de mesures en flux en extérieur. La difficulté vient de l'intégration des parties diffuses et directes du flux solaire. Une variété importante de modèles existe, cependant on peut les catégoriser de manière simplifiée à partir du modèle géométrique utilisé pour la prise en compte des flux directs et diffus :

- La contribution solaire directe est souvent calculée à partir d'un facteur de projection qui sert à représenter le flux reçu par un individu cylindrique en position debout.
- La contribution diffuse est calculée à partir d'une représentation parallélépipédique de l'individu, soit six faces sur lesquelles il s'agit de calculer ou mesurer les flux solaires diffus (cette méthode provient probablement de la méthode du dispositif expérimental

utilisé pour mesurer la température radiante (Holmer et al., 2015)). On notera par ailleurs que sur le plan de la simulation numérique de température radiante, les flux de grande longueur d'onde sont déterminés par la même méthode (Wallenberg et al., 2020).

En d'autres termes, l'individu est cylindrique vis-à-vis du rayonnement solaire direct et parallélépipédique vis-à-vis du rayonnement diffus et de grande longueur d'onde. L'objectif du présent travail est d'explorer la possibilité d'utiliser une même géométrie cylindrique pour la détermination des flux solaires direct et diffus sur un individu. Outre l'objectif de cohérence géométrique du modèle d'individu vis-à-vis des flux reçus et la démonstration du concept établi dans (Walther and Hamdani, 2018), trois objectifs sont recherchés :

- pour la physique du phénomène, la prise en compte de l'anisotropie du flux diffus qui engendre des différences importante soulignées dans (Wallenberg et al., 2020), qui relève un écart de température radiante compris entre -3 [K] et $+3$ [K] pour un ciel diffus isotrope ou anisotrope. Des conclusions similaires ont été obtenues par (Li et al., 2022).
- sur le plan numérique on cherche à éviter de calculer le facteur de forme de rayonnement des faces de l'individu avec le ciel (dans le cas du rayonnement solaire non obstrué). En effet, intégrer l'anisotropie du ciel diffus sur un parallélépipède suppose la discrétisation du ciel en plus d'une centaines de faces (Wallenberg et al., 2020).
- pour la simplicité de la méthode, on souhaite également reconstituer la contribution solaire à partir des flux direct et diffus horizontaux couramment disponibles dans les fichiers météorologiques.

Dans les paragraphes qui suivent, deux méthodes existantes qui serviront de comparaison avec le modèle développé sont présentées.

Méthode du facteur de projection – Cette méthode utilisée notamment par Fanger se base sur un facteur f_p défini comme le rapport la surface réellement exposée au soleil sur la surface du corps humain potentiellement exposée au rayonnement. On considère généralement que ce facteur correspond à celui d'un individu cylindrique (Matzarakis et al., 2010). Le facteur f_p est ainsi défini d'après une corrélation fonction de la hauteur solaire (Pickup et al., 2000) :

$$f_p = 0.42 \cos(h) + 0.043 \sin(h) \quad (2)$$

Il a été montré que le facteur f_p est pratiquement équivalent à l'intégrale de la surface projetée cylindrique (Walther and Hamdani, 2018) qui évolue avec la hauteur solaire.

Pour intégrer l'impact du flux solaire dans les modèles de confort, la notion de température radiante moyenne est couramment utilisée. Elle est définie par la température d'une surface qui émettrait le même flux que la somme des flux de grande et courte longueur d'onde. On peut la calculer à partir de la température radiante T_r issue des échanges de grande longueur d'onde et diffus, incrémentée de la contributions solaire directe normale incidente comme suit (Matzarakis et al., 2010) :

$$T_r^* = \sqrt[4]{T_r^4 + \frac{\alpha f_p \varphi_b}{\sigma \varepsilon}} \quad (3)$$

où φ_b est le flux direct normal incident.

Méthode des 6 directions – ce procédé expérimental introduit notamment par (Höppe, 1992) sert à déterminer la température radiante en extérieur à partir de six mesures : quatre mesures cardinales et deux plans face vers le haut et bas, pondérées par des coefficients représentant les contributions de chaque surface à l'échange radiatif (avec E_i l'éclairement infrarouge reçu par surface d'un parallélépipède et φ_i le flux solaire) :

$$T_r^* = \sqrt[4]{\frac{\sum_{i=1}^6 w_i (\alpha \varphi_i + \varepsilon E_i)}{\sigma \varepsilon}} \quad (4)$$

Avec $w_i = 0.22$ pour les 4 parois cardinales et $w_i = 0.06$ pour les faces hautes et basses.

Dans la section qui suit on présente le modèle analytique de reconstruction du flux diffus et direct sur l'individu, puis on valide ses résultats à partir d'un calcul numérique. Ensuite le modèle est comparé à deux techniques couramment utilisées dans la bibliographie expérimentale ou numérique. Une illustration sur un calcul de température radiante en milieu extérieur est proposée en ouverture.

2. FLUX SOLAIRES REÇUS

Il s'agit de déterminer la contribution des courtes longueurs d'onde à la température radiante à partir des flux direct et diffus reçus sur un plan horizontal. Pour ce faire, on se base sur un modèle géométrique cylindrique de l'humain aux propriétés de symétrie intéressantes et le modèle de rayonnement diffus de (Perez et al., 1990).

2.1. FLUX DIRECT φ_b

Dans la suite on définit comme plan azimuthal le plan de normale colinéaire au rayonnement direct incident. Considérons un plan vertical passant par le milieu d'un cylindre soumis à un rayonnement direct et réfléchi tel que représenté sur la Figure 1 a). Le flux direct φ_b pour un azimuth nul sur ce plan est donné en fonction du flux direct horizontal φ_b^h , de l'angle d'incidence i et de la hauteur solaire h par la relation :

$$\varphi_b = \varphi_b^h \frac{\cos(i)}{\sin(h)} \quad (5)$$

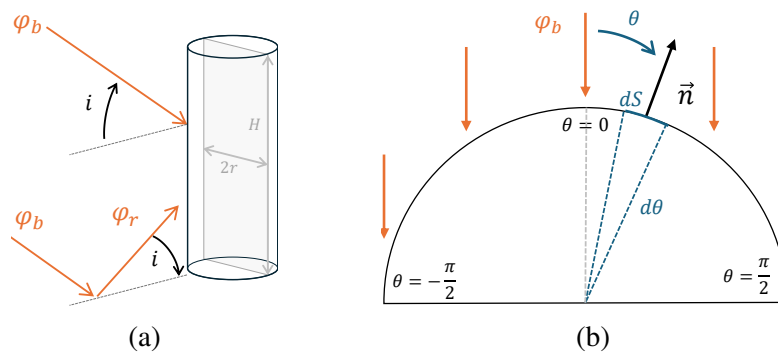


Figure 1 : a) Flux direct φ_b et réfléchi φ_r reçus sur un plan vertical azimuthal passant par le centre du cylindre avec un angle d'incidence i et b) Vue en coupe – flux direct reçu sur la partie éclairée d'un cylindre et surface élémentaire exposée au rayonnement.

On sait également calculer le rayonnement incident sur un plan azimuthal pour une hauteur solaire h . Soit θ l'orientation du plan azimuthal. Dans le repère lié au cylindre, $\theta = 0$ et la face éclairée est dans $\theta \in [-\frac{\pi}{2}; \frac{\pi}{2}]$. Le flux direct ϕ_b reçu par la surface directement éclairée du cylindre de rayon r et de hauteur H peut se calculer à partir du flux incident φ_b avec l'intégrale

suivante, illustrée sur la Figure 1 b) :

$$\phi_b = \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \varphi_b \cos(\theta) r H . d\theta = 2\varphi_b r H = S_p \varphi_b \text{ [W]} \quad (6)$$

Avec $S_p = 2rH$ la surface projetée dans l'axe du rayonnement.

2.2. FLUX DIFFUS φ_D

Le modèle de rayonnement diffus utilisé est celui de (Perez et al., 1990). Il consiste à calculer les contributions du dôme céleste, de l'horizon, ainsi que du disque circumsolaire comme présenté sur la Figure 2 a).

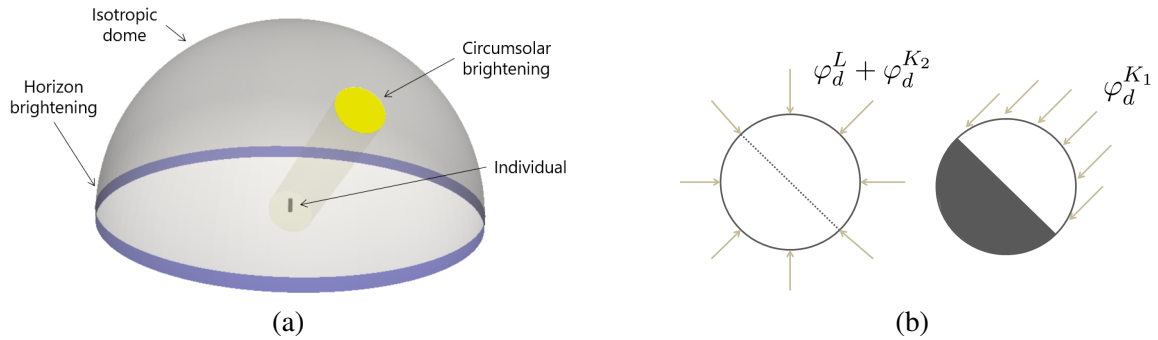


Figure 2 : a) Représentation du modèle diffus de Perez éclairant un individu cylindrique et b) Hypothèses d'isotropie et d'anisotropie pour les composantes diffuses du rayonnement.

Dans le modèle de Perez, le flux diffus φ_d sur un plan quelconque d'inclinaison β est donné à partir du flux diffus horizontal au sol φ_d^h :

$$\varphi_d = \varphi_d^h \left((1 - K_1) F_{\text{sky}} + K_1 \frac{a}{b} + K_2 \sin(\beta) \right) \quad (7)$$

Les paramètres sont :

- β est l'inclinaison de la surface réceptrice, soit dans notre cas $\beta = \pi/2$.
- K_1 et K_2 sont des coefficients pondérant les densités de flux circumsolaire et de l'horizon, qui évoluent dans le temps en fonction de la hauteur solaire et la localisation (voir également les détails dans (Perez et al., 1987), (Perez et al., 1990))
- a et b sont respectivement les cosinus des angles d'incidence et solaire zénithal.
- $F_{\text{sky}} = \frac{1 + \cos(\beta)}{2}$ est le facteur de forme entre la surface et le ciel, en champ libre.

À partir de l'équation (7), on écrit le flux diffus comme la somme des contributions de l'horizon φ_d^L , de l'éclairement circumsolaire $\varphi_d^{K_1}$ et de la voûte céleste $\varphi_d^{K_2}$:

$$\varphi_d = \varphi_d^L + \varphi_d^{K_1} + \varphi_d^{K_2} \quad (8)$$

$$\varphi_d^L = (1 - K_1) \frac{1 + \cos(\beta)}{2} \quad (9)$$

$$\varphi_d^{K_1} = K_1 \frac{a}{b} \quad (10)$$

$$\varphi_d^{K_2} = K_2 \sin(\beta) \quad (11)$$

Pour tâcher d'améliorer la prise en compte du flux diffus, on pose les hypothèses suivantes, qui découlent directement du modèle de Perez, illustrées par la Figure 2 b) :

- Hypothèse d'isotropie : le cylindre est éclairé de manière diffuse sur toute sa surface par la voûte céleste (contribution $(1 - K_1)$ dans l'équation (7)) et par l'horizon avec la contribution K_2 .
- Hypothèse d'anisotropie : la contribution circumsolaire (contribution K_1) ne s'applique qu'à une moitié éclairée du cylindre. Cette hypothèse a également été faite par (Li et al., 2022) qui applique en revanche un facteur de projection f_p au flux diffus en provenance du disque solaire, tandis qu'on calcule ici la contribution avec une intégrale simple – inspirée de l'Equation (6), comme expliqué ci-après.

Pour la contribution circumsolaire $\varphi_d^{K_1}$, le calcul intégral présenté dans l'équation (6) est réitéré. Le flux diffus total reçu met donc en jeu les surfaces $S_p = 2rH$ et $S_c = 2\pi rH$:

$$\phi_d = 2rH\varphi_d^{K_1} + 2\pi rH \times (\varphi_d^L + \varphi_d^{K_2}) \quad (12)$$

$$= S_p\varphi_d^{K_1} + S_c(\varphi_d^L + \varphi_d^{K_2}) \quad (13)$$

On ne détaille pas ici le calcul de la composante réfléchi qui sera diffuse et isotrope.

2.3. VALIDATION DU MODÈLE DIFFUS ANISOTROPIQUE

Les calculs sont menés sur le fichier météorologique de la ville du Havre (2005) issu de la base de données *Meteonorm*. Les flux diffus et directs sont calculés avec *pvlib* qui se base sur le modèle de Perez pour le flux diffus (Holmgren et al., 2018). Il s'agit alors de calculer le flux total reçu par un cylindre en tenant compte des éléments précédents.

Afin de vérifier l'hypothèse selon laquelle la part anisotrope du flux diffus peut être répartie de la même manière que le flux direct sur le demi-cylindre face au soleil, une approximation de cylindre sous la forme d'un dodécagone est utilisée – voir Figure 3 a). Pour chaque facette d'orientation $\theta_i \in [0, 2\pi]$, on récupère les flux diffus et direct par incrément de $\pi/12$ puis on les somme, à l'instar de l'équation présentée pour le flux direct : $\phi_d = \sum_{\theta=1}^{12} S_i\varphi_d(\theta_i)$.



Figure 3 : a) Géométrie du "cylindre" à douze faces et b) Géométrie pour la méthode des 6 directions.

Les résultats montrent une bonne concordance entre les flux calculés sur un cylindre discret et les flux analytiques. L'écart entre modèles est de l'ordre de quelques Watts, avec une RMSE inférieure à 1 [W/m²] pour chacun des flux. On obtient respectivement 0.18, 0.61 et 0.76 [W/m²] pour les flux direct, diffus et total (voir Tableau 1) ce qui valide l'hypothèse d'anisotropie représentée par l'Équation (13). Il est donc possible de prendre en compte l'anisotropie du ciel diffus à partir de la surface projetée exposée au rayonnement du disque solaire avec l'Équation (6).

3. COMPARAISON AVEC DEUX MÉTHODES EXISTANTES

On compare ici les flux solaires obtenus avec les deux méthodes présentées en introduction, pour le cas d'un individu en champ libre.

Flux	RMSE [W/m ²]
Direct φ_b	0.18
Diffus φ_d	0.61
Total φ	0.76

Tableau 1 : RMSE pour les différents flux calculé selon la méthode analytique proposée versus *pvlib* pour validation.

3.1. COMPARAISON AVEC LA MÉTHODE DU FACTEUR DE PROJECTION F_P

La valeur des flux directs reçus calculés par la méthode du f_p est légèrement plus élevée que celle de l'intégrale cylindrique, comme en témoigne la comparaison des modèles présentée ci-dessous. On notera que d'autres corrélations plus basses sont disponibles dans la littérature et peuvent expliquer cet écart. L'erreur augmente linéairement avec le flux comme l'indique le graphique de Bland-Altman. Les écarts peuvent aller jusqu'à 100 [W/m²] et la valeur de RMSE est de ~ 27 [W/m²].

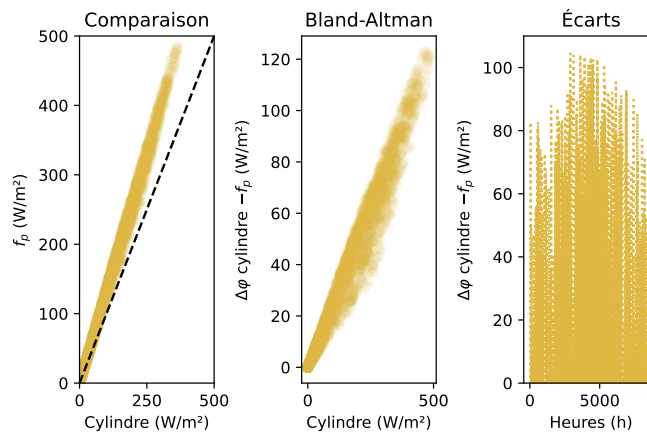


Figure 4 : Comparaison des flux directs pour la méthode proposée et la méthode f_p sur une année.

3.2. COMPARAISON AVEC LA TECHNIQUE DES SIX DIRECTIONS

On compare désormais avec la technique des 6 directions présentée en préambule de ces travaux. La géométrie est celle présentée sur la Figure 3 b). On observe sur la Figure 5 a) et b) des différences plus importantes entre le modèle cylindrique et celui à 6 directions, notamment avec des valeurs plus dispersées pour des flux élevés, cependant les résultats restent similaires. La concordance est meilleure pour le flux diffus que pour le flux direct, avec des écarts de l'ordre de ± 5 [W/m²]. Ainsi pour un effort calculatoire moindre, la reproduction du flux diffus est similaire à celle de la méthode des six directions.

La comparaison sur trois jours en saison hivernale et estivale est présentée sur les Figures 6 a) et b). On constate que les amplitudes et dynamiques des deux méthodes sont similaires. La méthode permet également de retrouver les ordres de grandeur de flux que dans la littérature expérimentale (Kántor et al., 2018) (Park and Tuller, 2011). Les maxima sont du même ordre de grandeur et interviennent à des instants proches.

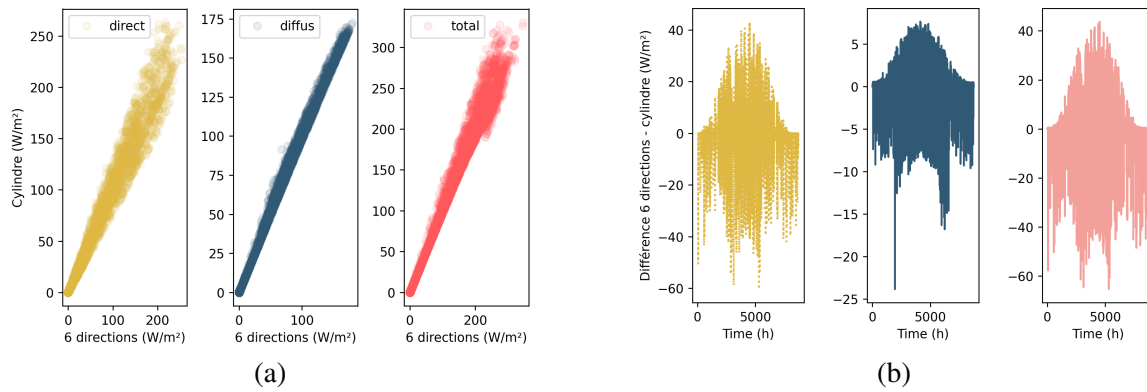


Figure 5 : Comparaison des flux reçus avec la méthode des six directions a) et b) différences de flux en fonction du temps pour les flux direct, diffus et total (de gauche à droite).

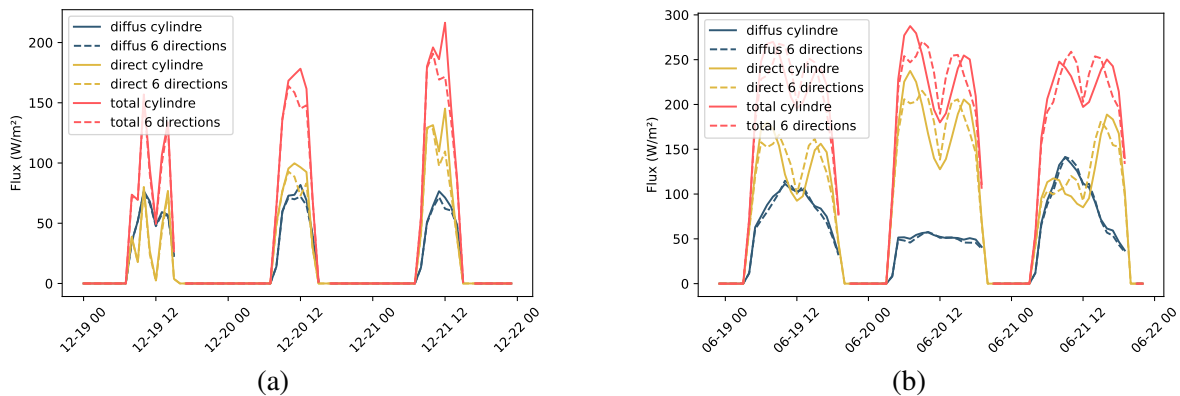


Figure 6 : Comparaison des méthodes sur trois jours autour du solstice a) d'été et b) d'hiver.

4. CONCLUSION

En partant du constat que la géométrie de l'individu varie dans les différents modèles existants en fonction du flux radiatif considéré, ce travail propose une méthode analytique pour le calcul des flux solaires direct et diffus sur un cylindre. Le modèle permet de prendre en compte l'anisotropie du flux diffus.

Dans un premier temps on valide le modèle analytique de calcul sur un cylindre en comparant les résultats avec ceux obtenus par un outil numérique de référence (Holmgren et al., 2018) sur un cylindre discrétisé.

Ensuite les résultats obtenus pour le flux direct sont comparés avec la méthode du facteur de projection f_p , dérivée par Fanger pour un individu, ce qui permet de vérifier que la méthode de l'intégrale cylindrique est adaptée à la modélisation du flux reçu par l'humain.

Concernant le flux total reçu, les résultats obtenus sont du même ordre de grandeur que ceux de la méthode dite "à 6 directions". Ils montrent une très bonne concordance sur le diffus ainsi que sur le direct. Les résultats sont proches et exhibent des dynamiques similaires.

L'avantage de la technique présentée ici est qu'elle ne requiert que les flux horizontaux direct et diffus, ainsi que la hauteur solaire, généralement présents dans les fichiers météorologiques ou faciles à déterminer avec des outils librement accessibles.

BIBLIOGRAPHIE

- Holmer, B., Lindberg, F., Rayner, D., and Thorsson, S. (2015). How to transform the standing man from a box to a cylinder—a modified methodology to calculate mean radiant temperature in field studies and models. In *Proceedings of the 9th International Conference on Urban Climate (ICUC9), Toulouse, France*, pages 20–24.
- Holmgren, W. F., Hansen, C. W., and Mikofski, M. A. (2018). pvlib python : A python package for modeling solar energy systems. *Journal of Open Source Software*, 3(29) :884.
- Höppe, P. (1992). Ein neues Verfahren zur Bestimmung der mittleren Strahlungstemperatur im Freien. *Wetter und Leben*, 44(1-3) :147–151.
- Kántor, N., Gál, C. V., Gulyás, Á., and Unger, J. (2018). The impact of façade orientation and woody vegetation on summertime heat stress patterns in a central european square : comparison of radiation measurements and simulations. *Advances in Meteorology*, 2018.
- Li, Z., Feng, X., and Fang, Z. (2022). A modified method to measure outdoor mean radiant temperature : Comparison between two-hemisphere method and six-direction integral method. *Building and Environment*, 221 :109292.
- Matzarakis, A., Rutz, F., and Mayer, H. (2010). Modelling radiation fluxes in simple and complex environments : basics of the rayman model. *International journal of biometeorology*, 54 :131–139.
- Park, S. and Tuller, S. E. (2011). Comparison of human radiation exchange models in outdoor areas. *Theoretical and applied climatology*, 105(3) :357–370.
- Perez, R., Seals, R., Ineichen, P., Stewart, R., and Menicucci, D. (1987). A new simplified version of the perez diffuse irradiance model for tilted surfaces. *Solar energy*, 39(3) :221–231.
- Perez, R., Seals, R., Zelenka, A., and Ineichen, P. (1990). Climatic evaluation of models that predict hourly direct irradiance from hourly global irradiance : prospects for performance improvements. *Solar Energy*, 44(2) :99–108.
- Pickup, J., de Dear, R., et al. (2000). An outdoor thermal comfort index (OUT_SET*)-part I-the model and its assumptions. In *Biometeorology and urban climatology at the turn of the millenium. Selected papers from the Conference ICB-ICUC*, volume 99, pages 279–283.
- Wallenberg, N., Lindberg, F., Holmer, B., and Thorsson, S. (2020). The influence of anisotropic diffuse shortwave radiation on mean radiant temperature in outdoor urban environments. *Urban Climate*, 31 :100589.
- Walther, E. and Hamdani, E. M. (2018). Calcul trigonométrique du flux reçu par un individu. In *Conférence IBPSA Bordeaux*, pages 1–8.

The transient P.E.T comfort index : A Description and analysis of the physiological model

Edouard Walther^{1,2,*}, William Dumontaud³

¹INSA Strasbourg, Département Génie Thermique Énergétique et Environnement
24 Boulevard de la Victoire – 67000 Strasbourg

²Université de Strasbourg, INSA Strasbourg, CNRS, ICube Laboratory UMR 7357, Strasbourg, France

³ENS Paris-Saclay, 4 avenue des Sciences – 91190 Gif sur Yvette

*edouard.walther@insa-strasbourg.fr

RÉSUMÉ. Ce travail présente la version transitoire du modèle physiologique utilisée dans l'indicateur de confort Physiological Equivalent Temperature (PET). Les hypothèses de modélisation sont détaillées dans un premier temps, puis on compare les grandeurs physiologiques simulées à un cas issu de la littérature expérimentale. Enfin l'influence du schéma numérique de résolution des équations constitutives est discutée. Les résultats montrent que le modèle de la PET ne reproduit pas aussi bien les variations de température de peau et du corps humain que celui de Gagge (SET). De plus, le schéma d'intégration temporelle explicite conduit à une prédiction instable ou imprécise des températures, et il convient donc d'utiliser un schéma implicite pour faire face à la non-linéarité des coefficients du modèle.

MOTS-CLÉS. confort, PET, physiologie

ABSTRACT. The present work deals with the physiological model used in the transient version of the Physiological Equivalent Temperature (PET) comfort index. The modelling assumptions are first presented, then the simulated physiological quantities are compared with a case from the experimental literature. Finally, the influence of the numerical integration schemes is explored. The results show that the PET model does not reproduce skin and body temperature variations as well as the Gagge (SET) model. In addition, the commonly used explicit scheme leads to unstable or imprecise prediction of the skin and core temperatures and hence an implicit scheme should be used for time integration, thus handling the non-linearity of the model's coefficients.

KEYWORDS. thermal comfort, PET, physiology

1. INTRODUCTION

Among a variety of existing comfort indexes, the "two-node" model initially developed by (Gagge et al., 1971), (Gagge et al., 1986) is used for the prediction of comfort in indoor or outdoors conditions. It has been successfully used to predict indoor dynamic thermal comfort of individuals exposed to transient conditions, or in outdoor spaces (Nazarian et al., 2019), (Vellei and Le Dréau, 2020). It relies on a relatively simple mathematical model of the human body, consisting of two differential equations that provide the skin and body core temperatures. These temperatures allow for the determination of an "effective" or "equivalent" temperature of a reference environment much resembling an indoor office, that provokes the same physiological response as the actual environment. A comfort scale was derived from ranges of temperatures of this reference environment – see (Gagge et al., 1986).

Based on the same representation of the human body and developed at the turn of the 1990's (Höppe, 1989), (Höppe, 1993), the *Physiological Equivalent Temperature* (PET). The physiolo-

gical model on which the PET is based is called "Instationary Munich Energy balance Model" (IMEM). The comfort index derived from the IMEM also relies on an equivalent temperature, determined in similar indoors conditions. The PET comfort index was integrated in the German VDI norm (VDI, 2008) and has been regularly used in the last decade (Lau et al., 2019), (Kataoutas et al., 2015), (Krüger et al., 2012). It remains however somewhat mysterious : the first exhaustive description of the steady PET model can be found in (Walther and Goestchel, 2018).

As per its transient version, the works by (Höppe, 1993), (Höppe, 2002), (VDI, 2008) partially provide the details about the model. More explanations could potentially be found in (Höppe, 1994), (Höppe, 1989) and (Höppe, 1984), however to date those manuscripts are not accessible by modern means of communication. As a result, the existing literature does not cover critical aspects of the model, noticeably a clear description of the equations used, how they are numerically solved and a validation against experimental data.

The work presented here thus aims at describing thoroughly the "Instationary Munich Energy Model of the Individual", comparing its result with openly available experimental data and evaluating the impact of the numerical procedure used to compute the body thermophysiological reaction.

2. DESCRIPTION OF HÖPPE'S TWO-NODE MODEL

The illustration of Höppe's "two-node model", is shown on Figure 1, where the human consists in a cylinder composed of three layers : the body core, the skin, and a clothing layer that partially covers the cylinder. In essence the model is much alike Gagge's, except that convection and radiation are split here between the bare and clothed part of the body.

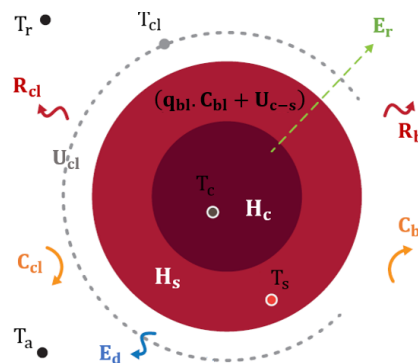


Figure 1 : Illustration of the two-node model by Höppe, considering separately bare and clothed skin.

The diagram on Figure 1 is also a representation of the heat fluxes between the body layers and the external environment. They can be divided into two main groups :

- Sensible heat transfer including conductive, convective and radiation exchanges : U_{c-s} is the skin conductance, U_{cl} the clothing conductance, $q_{bl} \cdot C_{bl}$ is heat transport by blood flow, C_b convection on bare skin, C_{cl} convection on clothed skin, R_b and finally R_{cl} the radiant exchange on bare and clothed skin ;
- Latent heat transfer including perspiration through skin (E_d) and exchange of humidity by breathing (E_r). Sweating may also occur but is not represented on Figure 1.

2.1. GOVERNING EQUATIONS

The set of governing equations consists in the following heat balances for the core, skin and clothing temperatures :

$$H_c = mC_p(1 - \alpha) \frac{dT_c}{dt} = S_d \cdot [M + E_r - (q_{bl}c_{bl} + U_{c-s})(T_c - T_s)] \quad (1)$$

$$H_s = mC_p\alpha \frac{dT_s}{dt} = S_d [R_b + C_b + E_d + (q_{bl}c_{bl} + U_{c-s})(T_c - T_s) - U_{cl}(T_s - T_{cl})] \quad (2)$$

$$H_{cl} = 0 = S_d [C_{cl} + R_{cl} + U_{cl}(T_s - T_{cl})] \quad (3)$$

With m the body mass, α the fraction of skin of body mass, C_p the calorific capacity of the body, M the metabolic activity and S_d the surface of the human body calculated by the Dubois' formula. The central point of the present work being the comparison with experimental data and a numerical analysis of the model, we refer the reader to the details of each term presented in (Walther and Goestchel, 2018). One point can nonetheless be outlined : the coefficients in Equations (1), (2) and (3) are non-linear : they evolve with the skin, core and clothing temperatures.

2.2. TEMPERATURE CONTROL MECHANISMS

The human body is considered as a thermally controlled system evolving in response to the temperature difference with "set temperatures" of the skin, core and body. The temperature control actions for the two-node model used by Höppe are provided hereinafter.

Vasomotricity – The blood flow rate q_{bl} is ruled by the difference of both skin and core temperatures with their set values T_s^{set} , T_c^{set} as per equation (4) :

$$q_{bl} = \frac{q_{bl}^n + C_d \cdot (T_c - T_c^{set})}{1 + C_s \cdot (T_s^{set} - T_s)} \text{ [L/m}^2\text{/h]} \quad (4)$$

The coefficients C_d and C_s relate to the dilation and constriction phenomena. The control mechanism is such that the temperature differences are set to zero in equation (4) when they are negative. The blood flow q_{bl} varies more than tenfolds between its extreme values.

Sweating – The body temperature is the weighted average of skin and core temperature – see equation (5). Its value triggers sweating and the evaporative cooling.

$$T_b = \alpha \cdot T_s + (1 - \alpha) \cdot T_c \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (5)$$

where α is the fraction of skin mass of the body. Furthermore, α depends on the blood flow q_b since the proportion of the skin compared to the core is greater if it contains more blood.

Sweating is determined by the difference between body and body set temperature and the sweating coefficient $C_{sw} = 304.94 \text{ [g/(m}^2\text{.h.K)]}$ as per equation (6).

$$q_m^{sw} = C_{sw} \cdot (T_b - T_b^{set}) \text{ [kg/m}^2\text{/h]} \quad (6)$$

Evaporation E_{sw} at skin surface depends on the production of sweat and on the latent heat :

$$E_{sw} = L_v \cdot \frac{q_m^{sw}}{3600} \text{ [W/m}^2\text{]} \quad (7)$$

Shivering – Contractions of muscles in very cold environments result in heat generation. This translates into a source term M_{sh} as follows :

$$M_{sh} = C_{sh} \cdot (T_s^{set} - T_s) \cdot (T_c^{set} - T_c) \text{ [W/m}^2\text{]} \quad (8)$$

with $C_{sh} = 19.4 \text{ [W/m}^2\text{/K}^2\text{]}$ the shivering factor. Note that in Equation (8) temperature differences are considered zero when they become negative, as a part of the control model.

3. COMPARISON AGAINST THE EXISTING LITERATURE

In this section, the model is compared to the experimental and numerical literature and possible improvements are explored.

3.1. COMPARISON WITH EXPERIMENTAL DATA

The data used in the experiment of (Munir et al., 2009) serves as a means of comparison : a group of lightly clothed, sedentary male individuals was sequentially exposed to different ambient conditions and their average core and skin temperatures were measured. The duration of each stage as well as the corresponding temperature, relative humidity and air velocity are summarised in Table 1.

Duration (min)	Temperature (°C)	Relative humidity (%)	Air velocity (m/s)
30	29.4	46.8	0.09
20	19.5	52.8	0.21
60	29.3	47.1	0.09
20	38.9	46.7	0.22
20	29.5	47.1	0.1

Tableau 1 : Summary of the ambient conditions in the experiment of (Munir et al., 2009)

On Figure 2 a), the results for both Gagge’s and Höppe’s model are plotted. The skin and core temperatures of Gagge’s model were determined with the validated procedure available in (Tartarini and Schiavon, 2020) with initial conditions being the skin and core set values. One can observe that both models reproduce the dynamics and amplitude of the skin temperatures for varying ambient conditions. They exhibit similar features in terms of dynamics, although Höppe’s model is subject to larger discrepancies in amplitudes : Höppe’s model skin temperature overshoot at about 120 min exposure seems unlikely, as the skin temperature reaches the core temperature. In terms of root mean square error (RMSE) *versus* the data, Gagge’s reaches 0.75 [K] whereas Höppe scores 1.69 [K].

3.2. OBSERVATIONS AND POSSIBLE IMPROVEMENTS

The observation made by (Melnikov et al., 2018) for Gagge’s original two-node model is that heat transfer between core and skin appears to be insufficient for the rapid variations of skin temperatures observed experimentally in (Munir et al., 2009). (Melnikov et al., 2018) hence performed a global minimisation procedure on the three physiological parameters affecting the skin temperature in Equation (4) (*i.e.* dilation and striction coefficients, and basal blood flow rate). Provided that physical safeguards for parameters values are respected, such a procedure is a means of finding the appropriate thermophysiological constants for the cohort studied. They

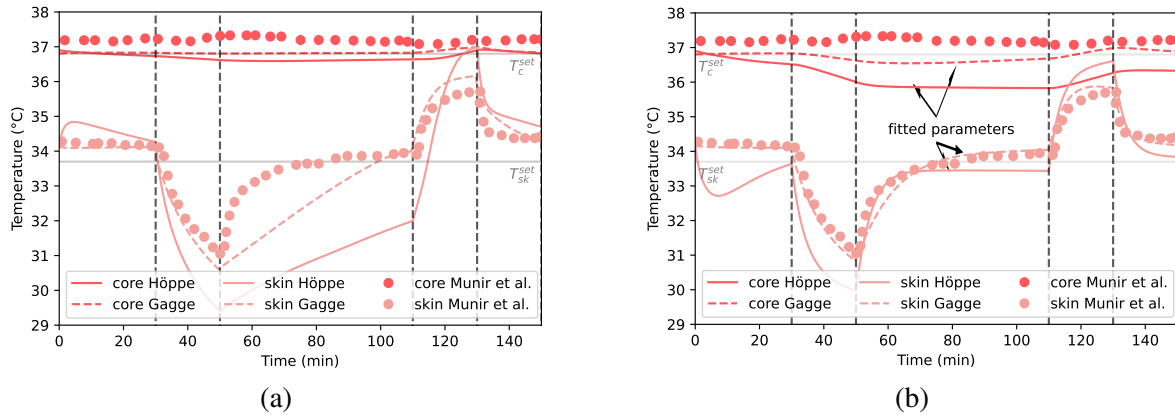


Figure 2 : a) Comparison of the skin and core temperatures with field data from (Munir et al., 2009) and b) Comparison after a parametric fit on Höppe's and Gagge's model constants after (Melnikov et al., 2018).

found that a dilation coefficient $C_d = 50$ [$\text{L}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$], a basal skin blood flow $q_{bl}^n = 10.7$ [$\text{L}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$] and the dilation coefficient $C_s = 0.1$ [K^{-1}] minimize the discrepancy with the available measurements.

Using the same method, the physiological parameters that minimize the discrepancy for Höppe's model are, *i.e.* $q_{bl}^n = 15$ [$\text{L}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$], $C_s = 0.05$ [K^{-1}] and $C_d = 134.8$ [$\text{L}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]. The results in terms of skin and core temperatures for both models are presented on Figure 2 b). One can conclude that :

- The improvement of the prediction of skin temperature is pronounced, as the root mean square error (RMSE) for Gagge's model is divided by three (0.08 K versus 0.75 K initially). For Höppe's model the RMSE drops from 1.69 K to 0.83 K, at the cost of an unrealistic behaviour.
- The core temperature in both models is also affected by the change of the coefficient and the temperature changes with a different dynamic than the data, exhibiting a drop in core temperature that does not reflect the measurements. What is more, in Höppe's model, the skin temperature exceeds the core one, which appears unrealistic in such conditions.

4. NUMERICAL CONSIDERATIONS

The original versions of the two-node models involve the explicit forward Euler integration scheme – see *Addendum b* to ANSI/ASHRAE Standard 55-2013 for Gagge's model and the Fortan program in (VDI, 2008) for Höppe's. This numerical scheme had the advantage of simplicity in times when scientific computing was not as user-friendly as it may be nowadays. However, the conditional stability of explicit schemes is put at risk by the thermophysiological model and the 60 seconds default time step used in the reference models may be questioned with regard to the non-linear coefficients of the model.

4.1. BRIEF DESCRIPTION OF THE θ -SCHEME

In the sequel, following notation will be used, where T^+ is the temperature at the time step $t + dt$ such that $\frac{dT}{dt} = \frac{T(t+dt) - T(t)}{dt} \simeq \frac{T^+ - T}{\Delta t}$. At a given time step where the temperature array $[T] = T_c, T_s, T_{cl}$ is known (*e.g.* the initial conditions), discretising the system of equations (1),(2),(3) leads to solving simultaneously for the unknown array $[T^+] = T_c^+, T_s^+, T_{cl}^+$ as a linear

combination of the explicit (known) and implicit temperatures (unknown) :

$$T_c^+ = T_c + \frac{\Delta t}{mC_p} \cdot \left((1 - \theta) \cdot \frac{H_c([T])}{1 - \alpha([T])} + \theta \cdot \frac{H_c([T^+])}{1 - \alpha([T^+])} \right) \quad (9)$$

$$T_s^+ = T_s + \frac{\Delta t}{mC_p} \cdot \left((1 - \theta) \cdot \frac{H_s([T])}{\alpha([T])} + \theta \cdot \frac{H_s([T^+])}{\alpha([T^+])} \right) \quad (10)$$

$$0 = H_{cl}(T_c^+, T_s^+, T_{cl}^+) \quad (11)$$

The value of θ in Equations (9) and (10) determines the type of numerical scheme : $\theta = 0$ yields Euler's explicit scheme, $\theta = 1$ is the full implicit scheme and $\theta = \frac{1}{2}$ represents Crank-Nicolson's semi-implicit scheme, which error is of second order in time. The effect of the choice of θ will be explored in the following section.

4.2. INFLUENCE OF THE INTEGRATION SCHEME

In order to evaluate the influence of the integration scheme, an numerical experience is led in this section, in order to compare the behaviour of the time integration for T_c and T_s with a full explicit, full implicit and Crank-Nicolson scheme. The exposure to three type of ambient conditions are simulated :

- "Office" is a typical indoor with operative temperature conditions, average relative humidity and low air velocity.
- "High Mean Radiant Temperature (MRT)" is a hot outdoor with a radiant temperature 30 [K] higher than the dry bulb temperature, 40 [%] relative humidity and low air velocity.
- "Winter" represents cold outdoor conditions with 0.5 [m/s] air velocity.

The conditions evaluated are summarised in the following table, with an exposure time of one hour, starting from the initial conditions $[T] = 36.8, 33.8, (T_a + T_r)/2$.

Ambient condition	Office	High MRT	Winter
Air T_a [°C]	20	30	0
Radiant T_r [°C]	20	60	0
Humidity φ [%]	50	40	90
Velocity v [m/s]	0.15	0.15	0.5
Activity met [-]	1	1	1
Clothing clo [-]	0.6	0.3	1

Tableau 2 : Summary of the ambient parameters for the conditions tested

The core temperature being less prone to rapid variations, we will examine the impact of the numerical schemes in terms of skin temperature, the latter being one of the components of thermal sensation (Vellei and Le Dréau, 2020), (Fanger et al., 1970). Figure 3 shows the evolution of the skin temperature over the first 600 [s] in the three ambient conditions described hereinabove. One can observe a similar skin temperature for 600 [s] exposure in the "High MRT" environment for the three integration schemes, however a discrepancy of more than 2 [K] is noticeable between the "Office" and "Winter" conditions between the full implicit and explicit schemes. It takes ~ 1 h exposure for the three schemes to reach the same temperature.

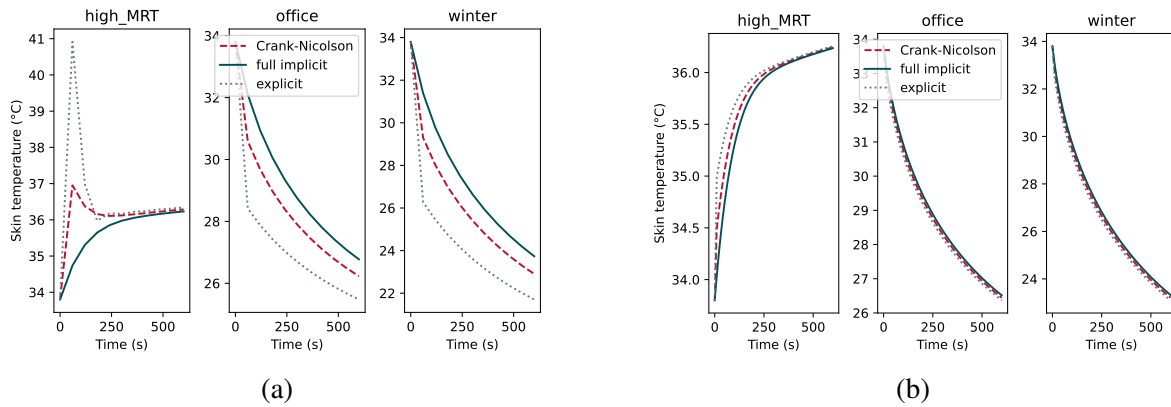


Figure 3 : a) Skin temperature with $\theta = 0, 0.5, 1$ for three ambient conditions with $\Delta t = 60$ [s] and b) Comparison between the explicit, implicit and Crank-Nicolson for various ambient conditions with $\Delta t = 10$ [s]

4.3. INFLUENCE OF THE TIME STEP ON THE PET

When choosing the time discretisation of a control problem, a particular care must be given to the amplitude of the time step : control models add up numerical stability and choice of the sampling rate (Walther, 2021)¹. Indeed, the time interval at which the difference between the actual value and the set value is measured matters : Large time steps may lead to increased numerical or "control" instabilities. In other words, the controller actions modify the behaviour of the system depending on the measured error, and the latter varies with different sizes of time step. The influence of the time discretization on the PET is exposed in the following paragraphs.

Figure 4 a) shows the evolution of the PET for $\Delta t = 10$ s for the explicit, semi-implicit and full implicit schemes. Comparing with the results observed in Figure 3, the results are more homogeneous and no overshoot can be observed for the "high MRT" ambient conditions. The discrepancy between schemes is also smaller.

As an illustration, Figure 4 a) shows the evolution of the PET over time in the same ambient conditions as presented in the previous Section, however at a lower $\Delta = 10$ [s]. One can observe that the temperature profiles exhibit more similarity than for $\Delta t = 60$ [s], which is the value used in the standards for the comfort indexes SET and PET (Gagge et al., 1971), (VDI, 2008). The explicit scheme performs noticeably better than with 60 seconds time step.

4.4. NUMERICAL OSCILLATIONS AT ELEVATED TEMPERATURES

For some extreme conditions of heat exposure, similar to the "high MRT" conditions except with $T_a = 41$ [°C], the explicit scheme exhibits an oscillatory behaviour, as presented on Figure 4 b). Owing to the thermophysiological response, numerical oscillations appear for elevated air and radiant temperatures. Such conditions trigger high sweating rates, as per Equation (6), provoking large values of latent heat flux that destabilise the explicit scheme. The latter is indeed stable, but not necessarily convergent (Patankar, 1980).

1. See the example provided in Chapter 2 - Section 3

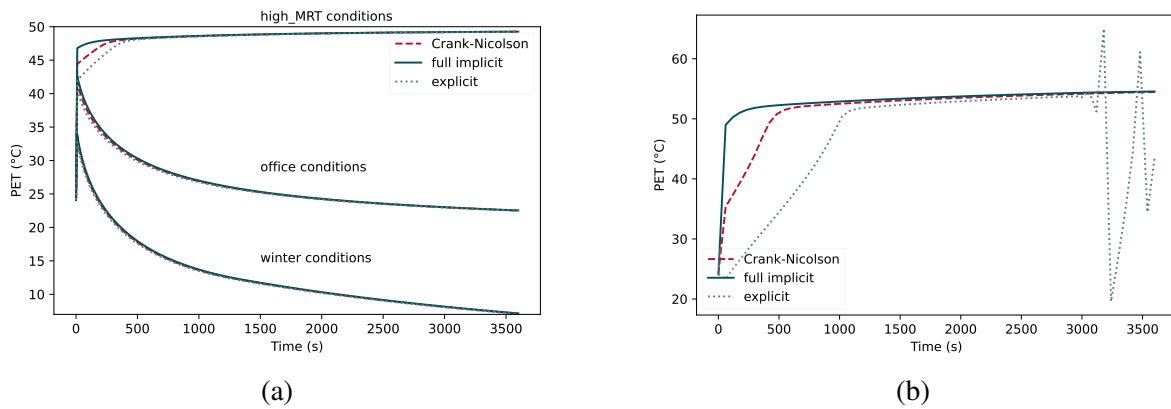


Figure 4 : a) Comparison between the explicit, implicit and Crank-Nicolson for various ambient conditions with $\Delta t = 10$ [s] and b). Comparison between the explicit, implicit and Crank-Nicolson scheme for high MRT conditions and $T_a = 41$ [°C] with $\Delta t = 60$ [s]

5. CONCLUSION & PERSPECTIVES

The present work proposes a presentation of Höppe’s transient two-node model and explores both its ability to compare with field data and the aptitude of the numerical procedure used to compute the physiological reaction.

The parameters of Höppe’s physiological model can be tuned so that the skin temperature exhibits a lower error in comparison with measured data, however at the cost of an unrealistic behaviour, *i.e.* the skin temperature reaching the core temperature.

The practical implications of the results on the numerical side of the problem are the following :

- A time step $\Delta t < 60$ [s] is required in order to capture the dynamics for all schemes.
- Given the likeliness of occurrence of oscillations, using the explicit scheme appears unsafe. An implicit or semi-implicit one would allow solving this issue.
- The implicit integration schemes (either full implicit or Crank-Nicolson) offer a better representation of the non-linearity of coefficients in the system of differential equations.

The stability issue with of the explicit scheme rises probably also applies to Gagge’s two-node model. As a perspective, the influence of the numerical schemes of Gagge’s two-node model could be explored.

The code of the transient PET model and SET model are available in following repository :
https://github.com/eddes/AREP/blob/master/PET_transient.py
https://github.com/eddes/AREP/blob/master/SET_theta_scheme.py

BIBLIOGRAPHIE

- Fanger, P. O. et al. (1970). Thermal comfort. analysis and applications in environmental engineering. *Thermal comfort. Analysis and applications in environmental engineering*.
- Gagge, A., Stolwijk, J., and Nishi, Y. (1971). An effective temperature scale based on a simple model of human physiological regulatory response. *ASHRAE Transactions*, 77 :21–36.
- Gagge, A. P., Fobelets, A., Berglund, L., et al. (1986). A standard predictive index of human response to the thermal environment. *ASHRAE trans*, 92(2) :709–731.

- Höppe, P. (1984). *Die Energiebilanz des Menschen*, volume 49. Univ., Meteorolog. Inst.
- Höppe, P. (1989). Application of a dynamical energy balance model for the prediction of thermal sensation and comfort. In *Proc. of the 11th ISB-Congress. West Lafayette, USA*, pages 267–272.
- Höppe, P. (1994). Die Wärmebilanzmodelle MEMI und IMEM zur Bewertung der thermischen Beanspruchung am Arbeitsplatz. *Verh. Dtsch. Ges. Arbeitsmed. Umweltmed*, 34 :153–158.
- Höppe, P. (2002). Different aspects of assessing indoor and outdoor thermal comfort. *Energy and buildings*, 34(6) :661–665.
- Höppe, P. R. (1993). Heat balance modelling. *Experientia*, 49(9) :741–746.
- Katavoutas, G., Flocas, H. A., and Matzarakis, A. (2015). Dynamic modeling of human thermal comfort after the transition from an indoor to an outdoor hot environment. *International journal of biometeorology*, 59(2) :205–216.
- Krüger, E., Emmanuel, R., Drach, P., and Corbella, O. (2012). Comparison of outdoor comfort field data against calculations of the thermal indices pmv and pet. In *The 7th Windsor Conference : The Changing Context of Comfort in an Unpredictable World, Cumberland Lodge, Windsor, London, UK*.
- Lau, K. K.-L., Shi, Y., and Ng, E. Y.-Y. (2019). Dynamic response of pedestrian thermal comfort under outdoor transient conditions. *International journal of biometeorology*, 63(7) :979–989.
- Melnikov, V., Krzhizhanovskaya, V. V., Lees, M. H., and Sloot, P. M. (2018). System dynamics of human body thermal regulation in outdoor environments. *Building and Environment*, 143 :760–769.
- Munir, A., Takada, S., and Matsushita, T. (2009). Re-evaluation of Stolwijk’s 25-node human thermal model under thermal-transient conditions : Prediction of skin temperature in low-activity conditions. *Building and Environment*, 44(9) :1777–1787.
- Nazarian, N., Acero, J. A., and Norford, L. (2019). Outdoor thermal comfort autonomy : Performance metrics for climate-conscious urban design. *Building and environment*, 155 :145–160.
- Patankar, S. V. (1980). Numerical heat transfer and fluid flow, Series in Computational Methods in Mechanics and Thermal Sciences. *Mechanics*.
- Tartarini, F. and Schiavon, S. (2020). pythermalcomfort : A python package for thermal comfort research. *SoftwareX*, 12 :100578.
- VDI (2008). Environmental meteorology, Methods for the human biometeorological evaluation of climate and air quality for urban and regional planning at regional level, Part I : Climate. *Verein Deutscher Ingenieure*, 3787 :Blatt 2.
- Vellei, M. and Le Dréau, J. (2020). On the prediction of dynamic thermal comfort under uniform environments. In *11th Windsor Conference 2020*, pages 424–439.
- Walther, E. (2021). *Building Physics – Applications in Python*. DIY Spring, Paris.
- Walther, E. and Goestchel, Q. (2018). The PET comfort index : Questioning the model. *Building and Environment*, 137 :1–10.

Advancing Urban Building Energy Model Validation: A Comprehensive Multi-Period Approach for Dynamic Outputs

Chunxiao WANG^{1,2,3}, Thomas BERTHOUS³, Bruno DUPLESSIS³, Eric PEIRANO¹, Pascal SCHETELAT², Peter RIEDERER²

¹ Efficacity, France

² CSTB, Direction Energie et Environnement, France

³ CEEP, Mines Paris, Université PSL, France

RESUME.

Cet article présente une nouvelle méthodologie pour valider les sorties dynamiques, telles que les courbes de charge, des modèles de simulation énergétique urbaine (MSEU) à travers une approche de validation multi-période. Cette approche consiste à évaluer les modèles sur différentes périodes afin d'assurer leur précision et fiabilité dans diverses conditions. Appliquée à Dimosim, un MSEU co-développé par le CSTB et Efficacity, via une étude de cas sur le réseau de chauffage de Blagnac en France, la méthodologie identifie efficacement les incertitudes au sein des périodes de validation et la validité relative du modèle sur différentes périodes, améliorant ainsi la fiabilité et l'interprétabilité de la validation des MSEU. Les perspectives de la méthodologie portent sur son application sur des contextes urbains différents et l'intégration de la calibration du modèle à la méthodologie actuelle.

MOTS-CLÉS : simulation énergétique urbaine, méthodologie de validation, sorties dynamiques.

ABSTRACT.

This article presents a new methodology for the validation of the dynamic outputs, such as load profiles, of urban building energy models (UBEM) through a multi-period approach. This approach consists of evaluating models across different periods to ensure their accuracy and reliability under various conditions. Applied to Dimosim, a UBEM co-developed by the CSTB and Efficacity, through a case study of the Blagnac heating network in France, the methodology effectively identifies uncertainties within validation periods and the relative model validity over different periods, enhancing reliability and interpretability of UBEM validation. Perspectives for the methodology include its application to diverse urban contexts and the integration of model calibration into the current methodology.

KEYWORDS: urban building energy modelling, validation methodology, dynamic outputs.

1. INTRODUCTION

Rapid urbanization significantly impacts energy consumption and sustainability, with urban areas, home to half of the global population and expected to rise to 58%, contributing to 36% of global final energy consumption and 40% of CO₂ emissions. This situation underscores the need for Urban Building Energy Models (UBEM) as tools for urban planners and policymakers to make informed decisions. Despite the potential of UBEMs, their effectiveness hinges on their accuracy and predictive capabilities, underscoring the importance of their validation. While validations of UBEM, are attempted in the literature (Lefort 2022; Oraiopoulos and Howard 2022), validations of dynamic

outputs are often limited by data availability and a traditional focus on singular time series (Hedegaard et al. 2019).

This approach, critiqued for its sensitivity to specific events (Pack 1990), contrasts with the forecasting field's recommendation for varied validation periods, like the rolling-origin approach, for validation reliability (Tashman 2000). Yet, UBEM studies primarily concern uncertainties in input parameters and data enrichment process (Prataviera et al. 2022; Jaeger 2021), neglecting validation period uncertainties. This study introduces a new UBEM validation methodology addressing these uncertainties, outlined in section 2 through methodology (2.1) and a case study (2.2), and evaluating the methodology's value via case study results in section 3.

2. METHODOLOGY

2.1. METHODOLOGY PRINCIPLE

The proposed methodology, consisting of four stages, is based on the principle of multi-period validation, an approach that has been applied in time series forecasting (Pack 1990). Multi-period validation creates a sample of validation periods within an individual time series via a rolling-origin approach, to remove ‘the possibility that the arbitrary choice of time origin might unduly affect the [forecasting accuracy]’ (Fildes 1992). This methodology section provides a guide for conducting multi-period validation of UBEMs.

2.1.1. Data pre-processing

This stage aims to prepare a reliable validation dataset. We must verify following aspects of collected data:

- Availability: At what temporal and spatial scales is the data available?
- Internal Consistency: Are measurements consistent within themselves?
- External Consistency: Are measurements consistent with other reference figures, such as heating degree day, and the modelling objectives?

The more detailed conditions for working with validation data at this stage have been discussed by Oberkampf, Roy and Jensen (Oberkampf and Roy 2013; Jensen 1995).

2.1.2. Creation of validation period samples

In a multi-period approach, we can increase the effective size of validation period sample in the following three dimensions (Pack 1990):

- The number of time series studied, for example, more measurement sites;
- The duration of validation period, which can be determined by the uses of model;
- The origins of validation period, where a rolling-origin approach can be applied.

When possible, we should add an additional dimension, spatial scale which indicates the aggregation level of buildings, which is crucial in uses of UBEM.

2.1.3. Classification of validation periods

Once the sample of validation periods is created, it is possible to classify periods to study the model's validity under different conditions. The size of each group of validation periods must remain large enough to produce interpretable distributions of validation results.

2.1.4. Calculation of validation metrics in samples

In this step, one must select validation metrics that fit with the potential uses of the model. Normalized metrics should be preferred in this step as we may perform comparison of validation results across different measurement sites.

Then, errors should be calculated for all validation periods in each sample. Validation results are thus distributions of validation metrics, which allow interpreting the uncertainty related to the choice of the validation period.

2.2. CASE STUDY

A case study was chosen to evaluate the proposed methodology on the Dimosim tool (Garreau et al. 2021). The site is a district in Blagnac, France, where selected buildings are connected to a fourth-generation district heating network (Figure 1). The network features 4 kilometres of tubes, 36 substations and a nominal thermal power of 14 MW. Annually, the system delivers 19 GWh of heat for the space heating and the domestic hot water use of 72 buildings (2000 equivalent dwellings), while 55 of them are residential.



Figure 1: Layout of Blagnac heating network

Measurements from heat meters installed at substations: heating power (MW), flow rate (m^3/h), supply and return temperature ($^{\circ}\text{C}$), with an hourly time step, are used in this case study. The objective of this case study is to evaluate the model adequacy while simulating dynamic thermal behaviours of collective residential buildings.

2.2.1. Data pre-processing

In this phase, we initially identify substations with available dynamic data, then ensuring both internal and external data consistency. Thermal load profiles, in W/m^2 , are derived from either direct measurement via heat meters or recalculated using flow rate and supply and return temperatures. Internal consistency checks involve comparing recalculated energy data with direct measurements from heat meters. Subsequently, profiles based on flow rates and temperature measurements are preferred for their superior availability and accuracy. External consistency is confirmed by correlating daily energy consumption with heating degree days calculated from local weather data using the COSTIC method (COSTIC 2021).

2.2.2. District modelling and inputs

The space heating demand of selected buildings is simulated by Dimosim using a single-zone model for each building. The simulation duration is from 01/01/2021 to 31/12/2022 at a time step of 1 hour. No calibration is performed.

Building geometrical data is provided by BDNB (CSTB 2024), and then corrected manually by researchers after visual verifications. Regarding building envelop, parameters are provided either by building-level Energy Performance Certificates (EPC) from BDNB or provided by an internal multi-source expert-curated database, which assigns typical values for thermal properties of a building according to building usage type and construction period. The heating temperature set point is chosen

as 19 °C constantly for all buildings and the internal gains are set as constant ratios (in W/m²) depending on building usage type. Weather data used in the simulation is collected in a weather station at the airport of Toulouse, right next to Blagnac.

For domestic hot water (DHW) usage, we implemented precalculated stochastic DHW demand profiles in modelled buildings. These profiles are precalculated using Qiriel and Croniq for building profile enrichment and DHW demand simulation. (Ansanay-Alex et al. 2016).

2.2.3. Validation of period samples

In the current case study, we are capable to increase our sample size through all three dimensions mentioned in 2.1.2 while adding an additional spatial dimension. Table 1 resumes all four dimensions in our global sample. In the spatial dimension, we worked both at substation and aggregated level. For the three dimensions mentioned in 2.1.2, we took the following approach:

- Number of time series investigated: based on the application objective and results of data pre-processing, we selected 17 substations out of 32 to create substation level samples and 15 of them to generate 300 combinations of substations for aggregated level samples.
- Duration of validation periods: in each sample, we created 7 sub-samples corresponding to different period durations, ranging from 1 day to 3 months.
- The origins of the validation period: in each sub-sample, individual validation periods are created with a rolling-origin approach as origins are modified each time at a daily time step.

2.2.4. Clustering method

In this stage, a clustering algorithm has been applied to classify daily load profiles at the substation scale. This combination of dimensions was chosen for two reasons:

- Validity of classification approaches: We can refer to existing studies (Bourdeau et al. 2020), whose findings can guide our methodological choice.
- Independence of profiles: Unlike profiles of other durations generated with a rolling-origin approach, daily profiles are still independent of each other in substation level samples.

In this case study, we applied clustering analysis using the tslearn Python package (Tavenard et al. 2020) to time series from 01/01/2021 to 31/05/2023 to maximize sample size. Focusing on intra-day patterns rather than daily consumption, we normalized daily profiles using mean and standard deviation, executed K-means clustering, and determined the optimal cluster count with the elbow method.

In the customized elbow method, we first calculate the within-cluster sum of squares (WCSS) for number of clusters ranging from 1 to 8, where the maximum value is chosen after a primary clustering test, then identify the elbow point with a quantitative approach by comparing a decrease rate, as in equation (2), to a chosen threshold value. The optimal cluster number will be the largest number before the decrease rate reaches this threshold.

$$decrease\ rate = (WCSS[i + 1] - WCSS[i]) / (WCSS[i] - WCSS[0]) \quad (2)$$

In this study we set the threshold at 0.15 to best capture minor differences in heating set point management patterns. We also preferred the Euclidean distance metric for its effectiveness over Dynamic Time Warping, as confirmed through a series of clustering tests.

2.2.5. Calculation of validation metrics

Two commonly used metrics: Normalized Mean Bias Error (NMBE) and Coefficient of Variation of Root-Mean-Square Error (CVRMSE) are selected in this case study and these metrics are calculated at profile / cluster / substation / aggregated levels. Metrics are calculated by equations (3) and (4).

$$NMBE = \frac{1}{\bar{M}} \times \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - M_i)}{n} \times 100\% \quad (3)$$

$$CVRMSE = \frac{1}{\bar{M}} \times \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - M_i)^2} \times 100\% \quad (4)$$

Where:

- P_i represents the predicted values,
- M_i represents the measured values,
- \bar{M} represents the mean of measured values,
- n is the number of measurements.

	Nb of time series	Validation period lengths	Period origins
Substation level	17 substations	1/3/7/14/30/60/90 days	01/01/2021 – 31/12/2022
Aggregated level	300 combinations of 5 substations out of 15	1/3/7/14/30/60/90 days	01/01/2021 – 31/12/2022

Table 1: Four dimensions in created validation samples.

3. RESULTS

3.1. CLUSTERING RESULTS

Optimal cluster numbers range from 3 to 5, showcasing distinct daily heating patterns influenced by temperature setpoints variations. Noteworthy patterns include Substation 20's increase in power supply at 23h during January 2021 (Figure 2) and Substation 3's temperature decrease every Monday night (Figure 3a). Weather conditions significantly impact clustering where temperature setpoints are consistent among periods, with variations in heating degree day and Global Horizontal Irradiance (GHI) affecting cluster formation (Figure 3b).

3.2. VALIDATION OF CLUSTERED DAILY PROFILES

In the validation of clustered daily profiles, we assessed cluster-level validation metrics alongside the distributions of individual profile metrics, as partially illustrated in Table 2 and Figure 3c. The findings indicate that the metrics at the cluster level are consistent with the average values of the samples. However, variations become evident when comparing metrics across different clusters and against substation-level metrics, highlighting how operational settings and weather conditions influence model performance.

The impact of load pattern on model validity is quite different: long-duration setpoint adjustments significantly impact validation metrics, notably in cluster 1 in Substation 3 where NMBE indicates daily consumption overestimation (Table 2) and CVRMSE suggests a poorer model validity compared to cluster 0 periods under similar weather conditions. Meanwhile, the minor adjustments show negligible impact on the validation metrics.

Weather conditions also play a critical role in model validity, as differentiated clusters, based on heating degree days and GHI, show varying model performance. This is particularly true for periods

with same setpoints but diverse weather conditions, such as cluster 0, 2 and 3 in Substation 3 (Table 2). In Substation 3, we obtained a substation-level NMBE of 2.5% while cluster-level NMBE range from -18.7% to 25.4% and none of them is as good as substation-level result. Similar results in other substations indicate a tendency for the current model to perform better during full heating seasons and overestimate energy usage during milder seasons

3.3. VALIDATION WITH DIFFERENT PERIOD DURATIONS

The variability of validation results calculated under different validation period durations is measured through standard deviation respectively at substation and aggregated level.

3.3.1. Substation level results

At the substation level, standard deviations generally decrease as the validation period duration increases from 1 day to 3 months. This trend suggests an increasing stability of validation metrics over longer periods. Despite of the global trend of decreasing variability, the maximal standard deviations in sub-samples don't necessarily follow such trend as illustrated in Figure 4. However, due to the limited number of sub-samples at substation level (17), it is hard to interpret more on such phenomena.

3.3.2. Aggregated level results

Similar trends at substation level have been observed again at aggregated level, such as the non-monotony of maximal standard deviations in samples (Figure 5). While the trend of decreasing variability with increasing validation period duration remains evident, the aggregated level results exhibit less variability than those at the substation level. Besides, when the period duration comes to 2 months, variabilities for all metrics at aggregated level are significantly reduced, which is not the case at substation level.

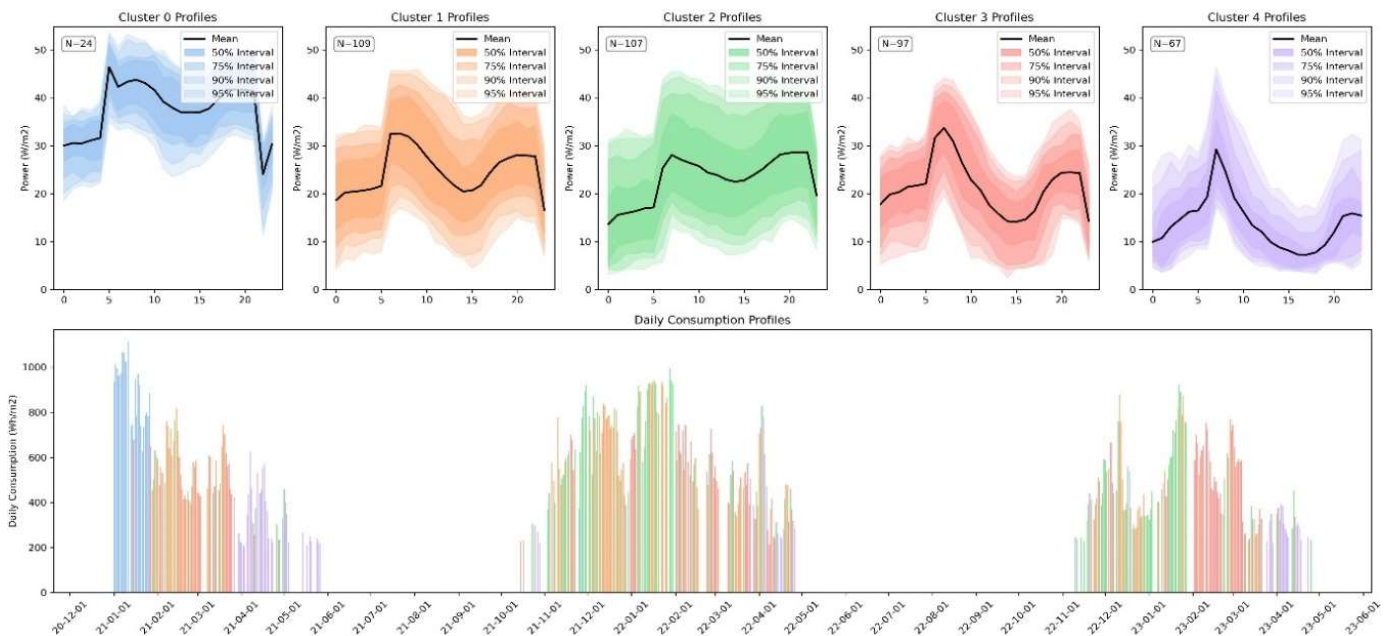


Figure 2: Clustering results in Substation 20. (Upper: Mean profiles and confidence intervals. Lower: Daily consumptions.)

	Cluster 0	Cluster 1	Cluster 2	Cluster 3	SST3
NMBE	0%	-18.7%	9.4%	25.4%	2.5%
CVRMSE	64.5%	84.1%	78.3%	97.1%	73.4%

Table 2: Validation results at cluster and substation level for substation 3

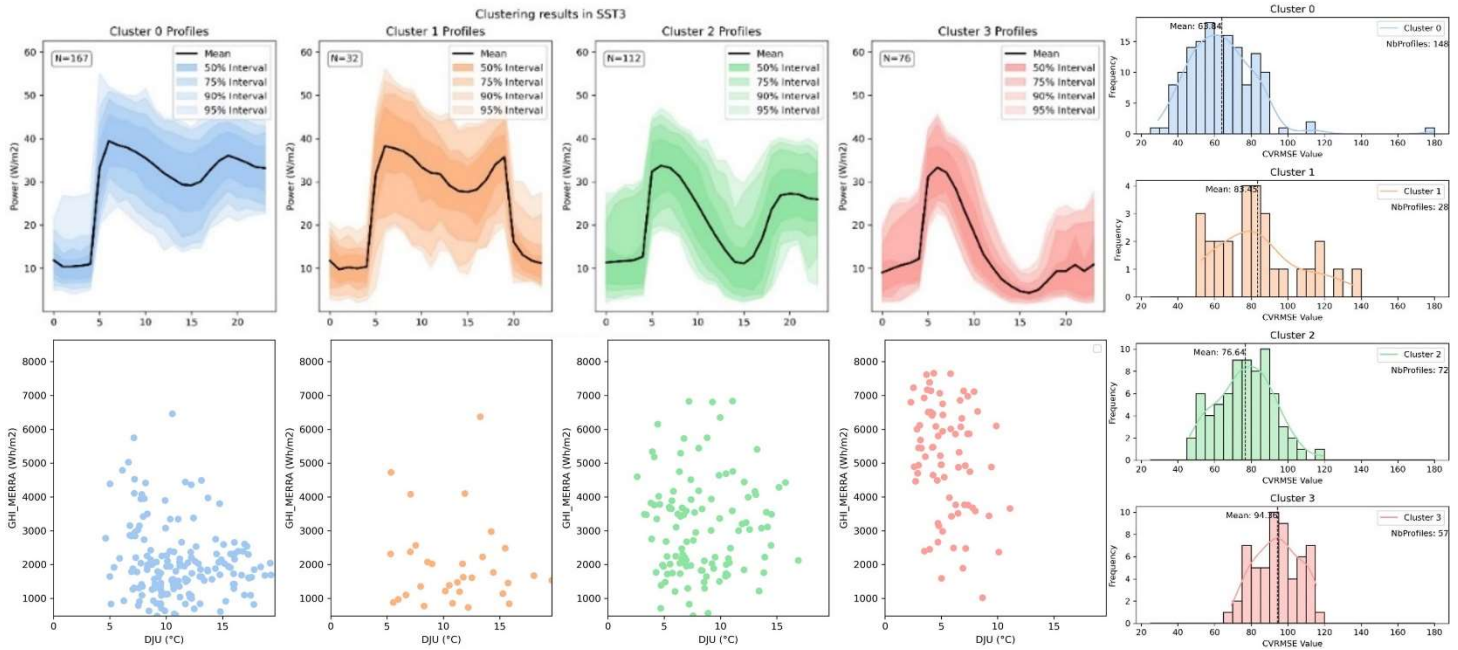


Figure 3: Clustering and validation results in Substation 3 (Upper left 3a: comparison of measured profiles in each cluster; lower left 3b: distribution of profiles in each cluster and related weather conditions; right 3c: distribution of individual level CVRMSE in each cluster).

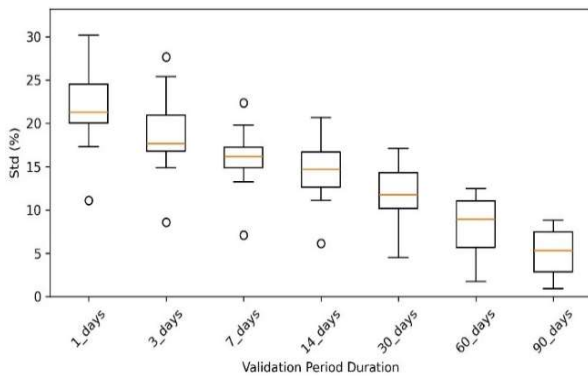


Figure 4: Distributions of STD for NMBE at substation level in 7 sub-samples.

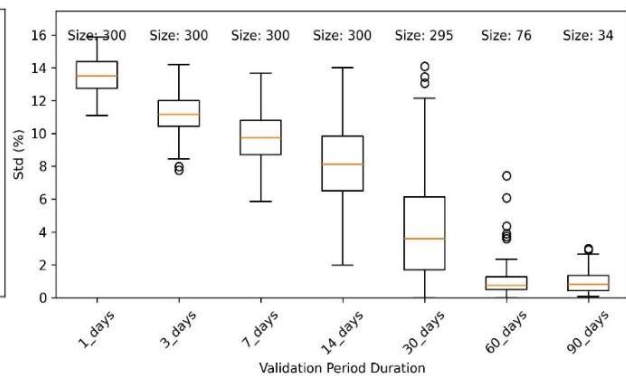


Figure 5: Distributions of STD for CVRMSE at aggregated level in 7 sub-samples.

4. DISCUSSIONS

4.1. CLUSTERING IN UBEM VALIDATION

The clustering results suggest that the presence of specific heating load patterns over a long period is not uncommon, occurring regularly (Substation 3) or uniquely during specific periods (Substation 20). These findings enhance our understanding of actual heating system operation patterns in buildings, and such patterns, with their impacts on simulation and validation results, help explain the causes of validation errors related to inappropriate temperature setpoint parameters. Additionally, deviations in errors across clusters indicate that a classification process in a validation workflow can prevent poorer results from being obscured by the average over a longer validation period.

By analysing the features of clusters without influence of operational patterns, we can particularly associate the deviation of errors across clusters with the model validity under different weather conditions. This analysis can help to deduce the validity domain of the current model and provides insights into model diagnostics. An important conclusion from this case study regarding the

performance of DIMOSIM is that its validity decreases under milder weather conditions with lower heating degree day and higher GHI.

We also find that while the current clustering approach with time series normalization captures minor differences in operational patterns, it does not perfectly differentiate clusters through weather conditions since the distributions overlap (Figure 3b). Therefore, to better study the model validity under various weather conditions, a different clustering approach, such as feature-based clustering or the same approach without normalization, might be more suitable.

In conclusion, a clustering-based approach is valuable in model validation as it provides crucial insights into the causes of validation errors and aids in UBEM diagnostics. However, an appropriate clustering approach should be carefully chosen based on the objectives of the study.

4.2. IMPACTS OF VALIDATION PERIOD DURATION

The analysis clearly demonstrates the significant impact of validation period duration on the variability of validation metrics. Longer periods tend to provide more stable validation outcomes at both the substation and aggregated levels. Moreover, aggregating data across multiple substations tends to mitigate some of the fluctuations observed in individual substations, as evidenced by reduced variability among periods longer than two months (Figure 5). However, such conclusions may not apply universally to all UBEM uses. For instance, the maximal values of variabilities, which may show non-monotone characteristics, deserve more attention in sizing studies.

Based on these findings, we recommend longer validation periods for validating UBEM dynamic outputs. Nonetheless, the choice of validation duration for other use cases or models should also consider the study objectives, data availability, and the modelling approach. Despite better stability achieved with longer periods, the dispersion in samples created by the rolling-origin approach is still significant. Therefore, a multi-period validation approach should be adopted when data is available.

5. CONCLUSION AND PERSPECTIVES

In the current article, a new methodology for the validation of UBEM dynamic outputs is proposed and applied to a case study in Blagnac, France. The proposed methodology incorporates a classification step and multi-period validation that aims to address the uncertainty in validation periods due to specific events. K-means algorithm applied on normalized time series using Euclidean distance is demonstrated to be an adequate method to capture minor difference between thermal load profiles. Clustering results also suggest that a classification process of measured load profiles can be beneficial for model validation. Furthermore, the application of methodology successfully demonstrated that even for long validation periods (monthly or quarterly), it is crucial to consider such uncertainty while validating the performance of a UBEM. Such conclusion is extensible to aggregated level validation.

For future research, we look forward to: (1) expand the validation methodology to a wider range of urban contexts and building types to test its generalizability; (2) use classification results in model calibration; (3) place model calibration in the current methodology while considering additional temporal dimension that could be brought to the sample size, such as lead time; (4) integrate current methodology in a larger validation framework for UBEMs while considering their use cases.

6. BIBLIOGRAPHY

- Ansanay-Alex, Guillaume, Yassine Abdelouadoud, and Pascal Schetelat. 2016. “Statistical and Stochastic Modelling of French Households and Their Energy Consuming Activities.”
- Bourdeau, Mathieu, Philippe Basset, Solène Beauchêne, David Da Silva, David Werner, and Elyes Nefzaoui. 2020. “Classification of Daily Electric Load Profiles of Non-Residential Buildings.”
- COSTIC. 2021. “Services Degrés-Jours Unifiés 2021-2022.”
- CSTB. 2024. “Base de Données Nationale Des Bâtiments.” 2024. <https://bdnb.io/>.
- Fildes, Robert. 1992. “The Evaluation of Extrapolative Forecasting Methods.” *International Journal of Forecasting*. Vol. 8.
- Garreau, Enora, Yassine Abdelouadoud, Eunice Herrera, Werner Keilholz, G E Kyriakodis, Vincent Partenay, and Peter Riederer. 2021. “District MOdeller and SIMulator (DIMOSIM) – A Dynamic Simulation Platform Based on a Bottom-up Approach for District and Territory Energetic Assessment.” *Energy and Buildings* 251 (March).
- Hedegaard, Rasmus Elbæk, Martin Heine Kristensen, Theis Heidmann Pedersen, Adam Brun, and Steffen Petersen. 2019. “Bottom-up Modelling Methodology for Urban-Scale Analysis of Residential Space Heating Demand Response.” *Applied Energy* 242 (March): 181–204.
- Jaeger, Ina De. 2021. “On the Impact of Input Data Uncertainty on the Reliability of Urban Building Energy Models.”
- Jensen, Soren Ostergaard. 1995. “Validation of Building Energy Simulation Programs: a Methodology.” *Energy and Buildings* 22: 133–44.
- Lefort, Lucie. 2022. “Methodological Developments for the Validation of Urban Building Energy Models.”
- Oberkampf, William L, and Christopher J Roy. 2013. “Model Validation Fundamentals.” In *Verification and Validation in Scientific Computing*, 371–408. Cambridge University Press.
- Oraiopoulos, A, and Howard B. 2022. “On the Accuracy of Urban Building Energy Modelling.” *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 158 (March): 111976.
- Pack, David J. 1990. “In Defense of ARIMA Modeling.” *International Journal of Forecasting*.
- Prataviera, Enrico, Jacopo Vivian, Giulia Lombardo, and Angelo Zarrella. 2022. “Evaluation of the Impact of Input Uncertainty on Urban Building Energy Simulations Using Uncertainty and Sensitivity Analysis.” *Applied Energy* 311 (March): 118691.
- Tashman, Leonard J. 2000. “Out-of-Sample Tests of Forecasting Accuracy: An Analysis and Review.” *International Journal of Forecasting*.
- Tavenard, Romain, Johann Faouzi, Gilles Vandewiele, Felix Divo, Guillaume Androz, Chester Holtz, Marie Payne, Roman Yurchak, Marc Rußwurm, Kushal Kolar, and Eli Woods. 2020. “Tslearn, A Machine Learning Toolkit for Time Series Data.” *Journal of Machine Learning Research* 21: 1–6.

Application d'une méthodologie d'évaluation environnementale adaptée à un projet d'aménagement urbain

Aurore Wurtz*^{1, 2, 3}, Thomas Recht^{1, 2}, Laurent Mora^{1, 2}

¹ Univ. Bordeaux, CNRS, Bordeaux INP, I2M, UMR 5295, F-33400, Talence, France

² Arts et Metiers Institute of Technology, CNRS, Bordeaux INP, Hesam Université, I2M, UMR 5295, F-33400 Talence, France

³ Navier, Ecole des Ponts, Univ Gustave Eiffel, CNRS, Marne-la-Vallée, France

*aurore.wurtz@enpc.fr

RÉSUMÉ.

L'écoconception des bâtiments répond aux enjeux climatiques actuels en minimisant les impacts environnementaux de l'ensemble du cycle de vie des bâtiments. À l'échelle du projet d'aménagement urbain d'autres activités génèrent des impacts, comme la mobilité quotidienne. Une méthode d'évaluation environnementale multisectorielle est développée et appliquée à un îlot du campus de l'université de Bordeaux. La performance environnementale des bâtiments est évaluée suite à une simulation thermique dynamique, tandis que le calcul des impacts de la mobilité repose sur des données collectées à partir d'enquêtes récentes. Les résultats montrent qu'à performance énergétique égale, la rénovation d'un bâtiment est préférable à sa démolition car une reconstruction engendre des impacts plus importants liés à la structure. Cette évaluation environnementale, couvrant également la mobilité quotidienne, offre aux décideurs une vision d'ensemble des principaux postes d'émissions de gaz à effet de serre de l'îlot et des préconisations adaptées.

MOTS-CLÉS : Analyse de cycle de vie, aménagement urbain, îlot

ABSTRACT.

Eco-design of buildings responds to current climate issues by minimising the environmental impact of the entire life cycle of buildings. At the scale of the urban development project, other activities generate impacts, such as daily transport. A multi-sector environmental assessment method has been developed and applied to a block on the campus of the University of Bordeaux. The environmental performance of the buildings is assessed using dynamic thermal simulation, while the calculation of the impact of mobility is based on data collected from recent surveys. The results show that, for the same energy performance, it is preferable to renovate a building rather than demolish it, since reconstruction generates greater structural impacts. An environmental assessment of daily mobility has also been carried out, giving decision-makers an overall view of the main greenhouse gas emission sources for the block and the appropriate recommendations.

KEYWORDS: Life cycle assessment, urban planning, district

1. INTRODUCTION

L'urgence climatique impose la réduction des émissions de gaz à effet de serre et, plus généralement, de l'ensemble des impacts environnementaux des différents secteurs économiques. Des méthodes d'évaluation environnementale fiables et adaptées sont nécessaires afin d'évaluer les projets et formuler des recommandations aux différentes parties prenantes.

Le secteur du bâtiment représente 45 % de la consommation d'énergie finale en France (ADEME 2018), et constitue un poste important d'émissions de gaz à effet de serre. Outre les impacts environnementaux associés au cycle de vie des bâtiments, ces derniers engendrent également des activités comme la mobilité quotidienne, l'entretien des espaces verts, la gestion des déchets *etc.* Il est ainsi pertinent d'évaluer le bâtiment dans son contexte urbain (Lotteau et al., 2017).

L'évaluation environnementale des quartiers et des villes est une problématique complexe, nécessitant d'adapter des méthodes et de recueillir des données à différentes échelles. Dans le contexte de l'aménagement d'un quartier, la question se pose sur l'intérêt de rénover ou de démolir les bâtiments pour en reconstruire de nouveaux plus performants. La méthode de l'analyse de cycle de vie est adaptée pour répondre à cette question de par ses aspects multicritère et multi-étape, qui permettent d'éviter un déplacement de pollution d'une étape du cycle de vie à une autre ou d'une catégorie d'impact à une autre. Bien que cette méthode soit de plus en plus appliquée à l'écoconception des bâtiments, des lacunes subsistent et doivent être comblées pour réduire les impacts environnementaux, notamment dans le cadre des études centrées sur l'ACV en rénovation et des bâtiments de bureaux (Hussien et al., 2023).

Cette communication présente une méthode d'évaluation environnementale multisectorielle d'un projet d'aménagement urbain. Les impacts environnementaux du cycle de vie des bâtiments neufs et rénovés ainsi que de la mobilité quotidienne sont évalués, dans le but de fournir une aide à la décision.

2. METHODOLOGIE

Les trajets de mobilité quotidienne sont estimés à partir du traitement de données d'enquêtes locales. Cette méthode quantifie les déplacements liés à la mobilité quotidienne au sein de l'agglomération et détermine la part modale de la population. Afin d'adopter une démarche cohérente entre les deux secteurs étudiés, les impacts environnementaux sont quantifiés selon une démarche attributionnelle, c'est-à-dire dans un contexte défini à un instant donné, qui correspond à l'année de réalisation de l'enquête. Les approches consécutives et prospective n'ont pas été considérées du fait des données disponibles concernant la mobilité quotidienne.

L'évaluation environnementale des bâtiments est également réalisée selon une approche attributionnelle avec la même temporalité que l'évaluation de la mobilité. Différents scénarios de rénovation sont étudiés et comparés avec la démolition suivie d'une reconstruction plus performante du bâtiment. Les impacts liés à la structure sont estimés à partir d'une étude basée sur des données réelles, qui évalue les quantités de béton, d'acier et de bois présents dans les fondations et la superstructure selon le type de bâtiment.

L'évaluation environnementale du projet est réalisée par la méthode de l'analyse de cycle de vie (ACV) qui considère l'ensemble des étapes du cycle de vie, de l'extraction des matières premières pour la fabrication des produits jusqu'à l'élimination des déchets, en passant par l'usage des bâtiments et des transports. Différents aspects méthodologiques sont précisés ci-après.

2.1. BATIMENTS

2.1.1. Outils de modélisation et de simulation

Le modèle physique COMFIE (Peuportier et Sommereux 1990) de la suite Pleiades est utilisé pour la simulation thermique des bâtiments. La consommation d'énergie est calculée, elle comprend le chauffage, la climatisation, l'eau chaude sanitaire, la ventilation, l'éclairage, l'usage des appareils

électroménagers *etc.* Ces consommations ainsi que l'inventaire des matériaux et équipements du bâtiment sont ensuite transmis au moteur de calcul EQUER, qui réalise l'ACV des bâtiments et évalue différents indicateurs environnementaux. Le calcul s'appuie sur la base de données environnementale internationale *ecoinvent* (version 3.4).

2.1.2. Cycle de vie de la rénovation

Le cycle de vie du bâtiment peut être divisé en quatre étapes :

- La construction : extraction et transport des matières premières, fabrication et transport des produits de construction, réalisation (sur le chantier en général) ;
- L'utilisation : période durant laquelle le bâtiment est exploité ;
- La rénovation légère : rénovations et réhabilitations effectuées au cours de la vie du bâtiment (remplacement d'équipements, de fenêtres et renouvellement des revêtements) ;
- La fin de vie : déconstruction du bâtiment et traitement des déchets.

Dans le cas d'un projet de rénovation de bâtiment, le cycle de vie est modifié. Ce dernier est représenté Figure 1. Les étapes de construction et d'exploitation du bâtiment initial jusqu'à la date du projet de rénovation ne sont pas considérées dans le cycle de vie ; ces impacts sont alloués au projet initial. Le projet de rénovation prend en compte la production et le transport des matériaux nécessaires à la rénovation ainsi que la fin de vie des matériaux déposés, le chantier de déconstruction et de reconstruction, l'exploitation du bâtiment rénové et sa fin de vie.

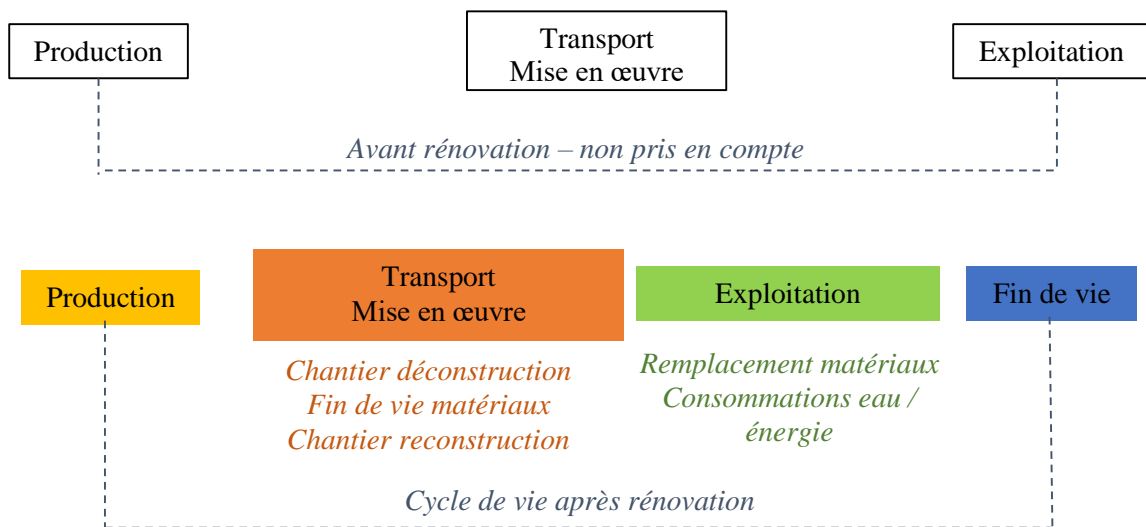


Figure 1 : Cycle de vie d'un projet de rénovation de bâtiment

2.2. TRANSPORTS

Les flux liés à la mobilité quotidienne peuvent être estimés à partir de la simulation numérique ou d'un traitement de données provenant d'enquêtes locales. L'intérêt et la fiabilité du calcul des impacts environnementaux dépendent de la modélisation fine de la population et des habitudes de transport estimées localement. Étant donné la disponibilité des enquêtes récentes sur la mobilité au niveau local, la méthode choisie pour l'évaluation environnementale des transports est le traitement de données. La méthode se divise en trois étapes : la collecte de données, l'estimation des trajets annuels par mode de transport et l'évaluation environnementale.

2.2.1. Collecte de données

Cette première étape consiste à identifier puis étudier toutes les enquêtes locales, en évaluant leur représentativité, récoltant l'ensemble des données exploitables et en faisant des hypothèses sur les données manquantes.

L'analyse des enquêtes permet de définir la part modale du trajet domicile-travail ou domicile-études de chaque catégorie de population qui composera le projet d'aménagement. Pour chaque mode de transport et chaque catégorie de personne, la distance moyenne est également collectée ou calculée selon les données accessibles.

2.2.2. Détermination du nombre de personnes par bâtiment

Au sein d'un projet d'aménagement urbain, les bâtiments comprennent généralement différents usages tels que le résidentiel collectif, les bureaux et les commerces. Les surfaces allouées à ces usages sont définies dès les premières phases du projet. Par la suite, une estimation du nombre de personnes est nécessaire pour calculer le nombre de trajets effectués. Dans les bâtiments de bureaux, une surface utile de 12 m² par personne est considérée. Une surface de 32,5 m² par personne est considérée dans les logements collectifs, moyenne basée sur l'année 2013 (INSEE 2017).

Selon l'INSEE (INSEE 2010; 2021), un commerce de proximité comprend en moyenne 2,6 salariés. En 2016, entre 70 et 80 % du total des points de vente étaient des commerces indépendants isolés, soit un magasin de proximité d'une surface inférieure à 120 m². En moyenne, on suppose alors 2,6 salariés pour 120 m² de commerces.

3. RESULTATS

3.1. BATIMENTS

3.1.1. Cas d'étude

L'université de Bordeaux prévoit l'aménagement d'un îlot de bâtiments situé sur le campus de Talence à proximité d'un arrêt de tramway, comprenant la construction d'environ 11000 m² de bâtiments et la rénovation d'un bâtiment existant répartis en logements collectifs, bureaux et commerces. L'université a la volonté de s'inscrire dans une démarche exemplaire en termes de performance environnementale mais n'a pas encore les compétences en interne pour intégrer l'écoconception à chaque phase du projet. Ce dernier étant en phase d'étude de faisabilité, il est utilisé comme cas d'étude pour le développement d'une méthode d'évaluation environnementale à l'échelle de l'îlot. La perspective proposée par la direction de l'aménagement urbain de l'université de Bordeaux est présentée sur la Figure 2 dans laquelle seuls les bâtiments jaunes sont concernés par l'opération.

Le bâtiment existant qui sera rénové est composé de murs en brique avec 10 cm d'isolation dans les façades est et ouest, sans isolant dans les autres façades, et de béton non isolé en plancher et toiture. Les fenêtres sont en simple vitrage et la ventilation est simple flux. La température de consigne en hiver est de 19 °C, le taux de ventilation est estimé à 0,86 vol/h auquel s'ajoute une hypothèse d'infiltration de 0,30 vol/h étant donné que le bâtiment a été construit en 1959.



Figure 2: Perspective d'aménagement de l'îlot

La simulation ACV considère le mix électrique de l'année 2020 communiqué par RTE, et un mix énergétique correspondant au réseau de chaleur local composé de 85 % de géothermie et de biomasse, et de 15 % de gaz. Les pertes du réseau de chaleur sont estimées à 10 %. La durée de vie du bâtiment est supposée de 100 ans.

3.1.2. Études paramétriques

Plusieurs hypothèses de rénovation du bâtiment ont été définies afin de répondre aux enjeux économiques de l'université. Une variante économique considère l'ajout de 15 cm de laine de verre à l'intérieur des murs. Une autre variante comprend 20 cm dans les murs et le plancher, et 30 cm en toiture en plus de l'installation de menuiseries double vitrage. Enfin, une variante dite exemplaire consiste en une isolation par l'extérieur (ITE) avec un isolant biosourcé, l'installation de fenêtres double vitrage ($U=1,7 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$) et un bardage bois. Ces variantes sont rappelées dans le Tableau 1.

Tableau 1: Propositions de rénovation

Isolation par l'intérieur	Exemplarité	ITI - économique
20 cm d'isolant dans les murs, 30 cm d'isolant en toiture Menuiseries double vitrage	ITE – Laine de bois (30 cm dans les murs, 40 cm en toiture) Menuiseries double vitrage Bardage bois	Laine de verre (10 cm dans les murs, 15 cm en toiture)

L'hypothèse d'une démolition suivie d'une reconstruction de l'immeuble est également considérée. Le bâtiment neuf est conçu en ossature bois, avec de la laine de bois et un bardage bois pour les murs extérieurs. Le plancher est composé de béton et de polyuréthane, tandis que la toiture est composée de laine de bois, de béton armé, et de poutres en bois pour l'ossature.

3.1.3. Aide à la décision pour un projet de rénovation

Les résultats présentés dans la Figure 3, exprimés en m^2 de surface utile, indiquent les différents niveaux de performance de la rénovation du bâtiment comprenant des logements collectifs, bureaux et commerces, en ce qui concerne les émissions de gaz à effet de serre (GES). Les performances énergétique et environnementale du bâtiment augmentent proportionnellement avec les différents niveaux de rénovation. Seul le cas de la démolition suivie d'une reconstruction en ossature bois diffère ; à même performance énergétique, ce scénario a plus d'impact sur le changement climatique que la rénovation dite exemplaire du bâtiment. En effet, l'étape d'utilisation est similaire, mais la construction d'un bâtiment neuf ajoute de nombreux matériaux structurels qui n'atteignent pas un bilan carbone neutre malgré l'utilisation d'une ossature bois.

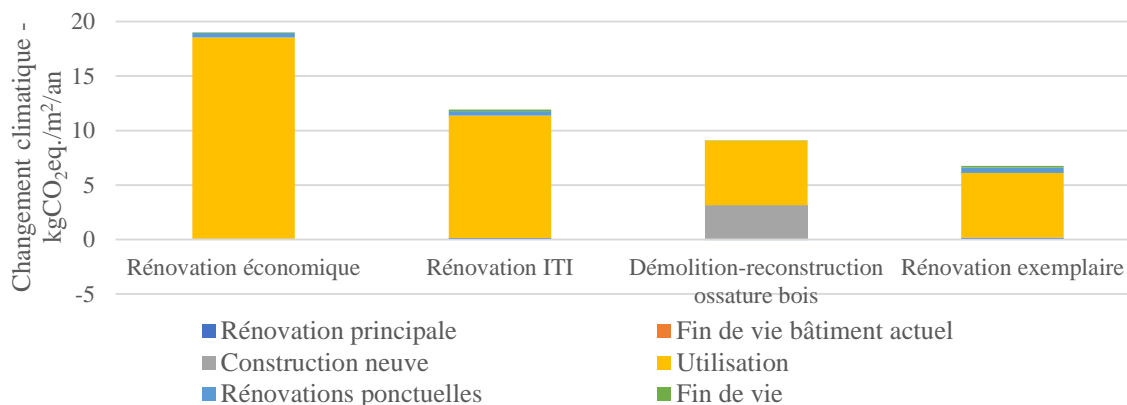


Figure 3: Émissions de gaz à effet de serre des alternatives de rénovation

3.2. TRANSPORTS

Quatre enquêtes mobilité ont été considérées dont deux ciblant les étudiants de l'université, une visant le personnel du campus, et une réalisée par Bordeaux Métropole auprès de la population bordelaise. L'enquête menée auprès des personnels a enregistré un fort taux de participation, tandis qu'une seule des deux enquêtes étudiantes a été considérée comme représentative après analyse de la méthode appliquée. L'enquête de Bordeaux Métropole a été réalisée auprès des ménages.

3.2.1. Estimation des trajets domicile-travail ou lieu d'études

Les données recueillies au sein des enquêtes, associées aux hypothèses sur la surface par type d'usage, permettent d'établir la part modale selon l'usage, comme présenté Figure 4. Cela nécessite différentes hypothèses, par exemple le *coliving* est apparenté à des résidences étudiantes, et ainsi la mobilité est similaire à celle d'un étudiant moyen de l'université. Concernant le *coworking*, qu'il s'agisse de la location ponctuelle (indépendants, *free-lance*, etc.) ou à moyen/long terme, l'hypothèse d'une mobilité quotidienne équivalente à celle d'un salarié du campus est adoptée. Pour les commerces, qui comprennent également des salariés, la mobilité est supposée identique à celle des salariés de l'université. Quant aux appartements familiaux, ils correspondent à un ménage moyen issu de l'enquête Bordeaux Métropole. Le programme prévoit la répartition des surfaces suivante : 17 % de *coliving*, 38 % de *coworking*, 12 % de commerces et 33 % d'appartements familiaux.

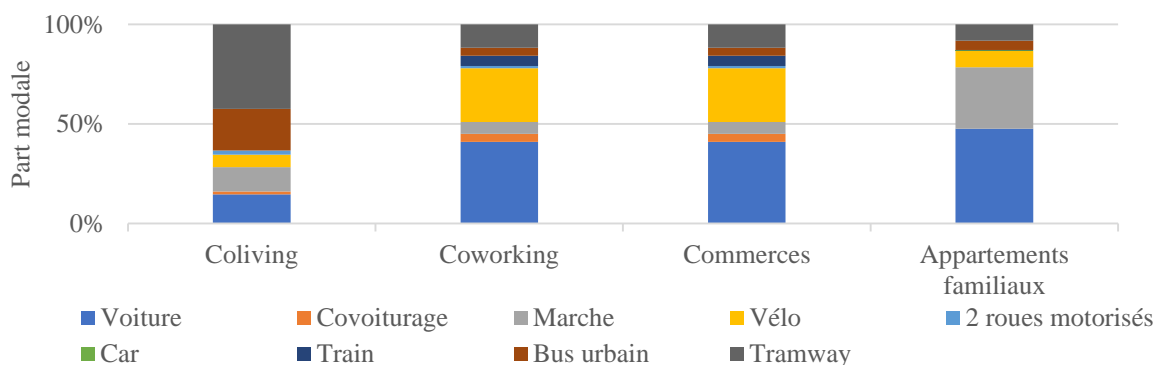


Figure 4 : Part modale selon l'usage

La distance moyenne par mode et selon l'activité a été estimée à partir des données des enquêtes et de calculs complémentaires. En moyenne, elle s'élève à 8,7 km par jour. La Figure 5 (à gauche) illustre le nombre de personnes par usage, défini à partir des hypothèses présentées en partie 2.2.2.

Enfin, la distance totale annuelle de l'îlot par mode et par usage est calculée. L'agrégation de ces données est illustrée sur la Figure 5 (à droite), permettant de connaître la part modale de l'îlot à partir du nombre de kilomètres parcourus en un an.

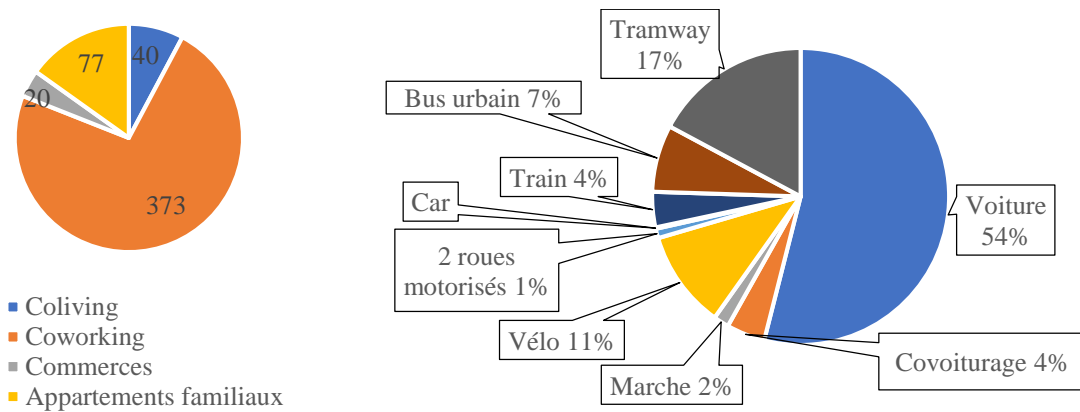


Figure 5: Nombre de personnes par usage (à gauche) et part modale moyenne de l'îlot (à droite)

3.2.2. Évaluation environnementale de la mobilité quotidienne

L'analyse environnementale des transports a uniquement été réalisée pour l'indicateur du changement climatique afin de faciliter l'application de cette méthodologie. L'impact de chaque mode de transport au cours de son cycle de vie ainsi que des infrastructures a été calculé par De Bortoli (2021), et l'ensemble des valeurs environnementales proviennent de cet article. Il s'agit de données calculées à partir du réseau parisien, qui sont cohérentes avec le contexte bordelais. Les émissions de gaz à effet de serre par m² de bâtiment selon le mode de transport sont présentées Figure 6.

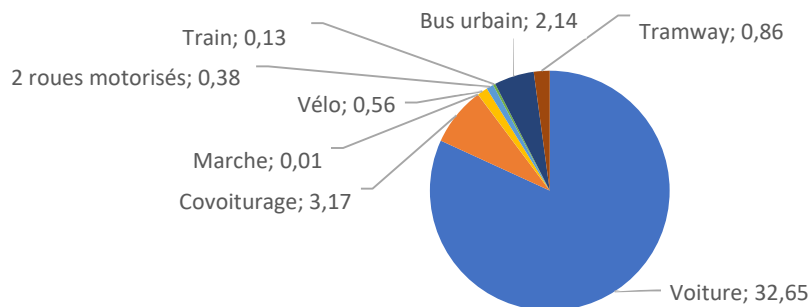


Figure 6: Répartition des émissions de GES liées à la mobilité quotidienne (kg CO₂ eq./m²/an)

4. DISCUSSION

La méthodologie a été appliquée à l'ensemble du projet d'aménagement, soit un bâtiment rénové et deux bâtiments neufs. Seuls les travaux portant sur le bâtiment rénové ont été présentés ici car la performance environnementale des bâtiments neufs est imposée par la RE2020. Une étude complémentaire a montré l'influence du comportement des occupants sur le confort estival, ainsi que l'influence de certaines hypothèses sur les résultats environnementaux, telles que la durée de vie du bâtiment, la prise en compte de bois certifié et le traitement des déchets en fin de vie.

Ces travaux visent à illustrer une démarche cohérente d'évaluation environnementale entre deux secteurs qui sont très rarement étudiés ensemble. Cependant, cette méthode présente des limites en matière d'aide à la décision, ne permettant pas d'évaluer les conséquences de la décision correspondant

à l'exécution du projet, ni de s'inscrire dans une démarche prospective, en raison de la difficulté d'obtenir des données prospectives concernant la mobilité quotidienne.

La collecte de données peut être chronophage car elle requiert la coopération de nombreux acteurs différents, mais elle est indispensable. En complément, différentes hypothèses doivent être faites sur la base de recherches récentes et de l'analyse des données à disposition. La méthode peut être appliquée à d'autres cas d'étude, mais les résultats en matière de transports varient significativement en fonction de la population et de l'usage des bâtiments.

La méthode d'analyse de cycle de vie a été réalisée uniquement avec l'indicateur de changement climatique dans cette étude, mais elle est applicable pour l'ensemble des indicateurs. Cette approche multisectorielle nécessiterait alors un questionnement concernant les catégories d'impact les plus pertinentes à présenter aux décideurs.

5. CONCLUSION

Cet article présente une méthodologie pour évaluer l'impact environnemental de deux secteurs distincts d'un projet d'aménagement urbain : les bâtiments et la mobilité quotidienne. L'étude de cas montre que la rénovation complète d'un bâtiment est préférable à sa démolition puis reconstruction, sous certaines conditions (performance énergétique égale, longue durée de vie, réalisation sans faille *etc.*). L'évaluation environnementale des transports peut mener à des préconisations sur l'intérêt de modifier la flotte de véhicules ou de proposer une aide pour la mobilité douce par exemple. Cette analyse sert d'aide à la décision auprès d'un gestionnaire immobilier, permettant de définir les actions prioritaires à entreprendre.

6. REMERCIEMENTS

Cette étude a été financée par la région Nouvelle Aquitaine dans le cadre de l'équipe de recherche commune GP2E entre l'université de Bordeaux et l'ITE Nobatek/INEF4.

7. BIBLIOGRAPHIE

ADEME, « Les chiffres clés du bâtiment – Edition 2018 »

Bortoli, A. de. 2021. « Environmental Performance of Shared Micromobility and Personal Alternatives Using Integrated Modal LCA ». *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 93.

Hussien, A, Abdeen Saleem, A, Mushtaha, E, Jannat, N, Al-Shammaa, A, Bin Ali, S, Assi, S and Al-Jumeily, D (2023) « A statistical analysis of life cycle assessment for buildings and buildings' refurbishment research ». *Ain Shams Engineering Journal*, 14 (10). ISSN 2090-4479.

INSEE 2010 « Le commerce de proximité ». 1292. INSEE Première.

INSEE 2017 « Insee Références, édition 2017 ». Fiches. Confort, qualité et défauts.

INSEE 2021 « Le commerce de proximité : des pôles plus florissants en périphérie qu'en centre-ville ». 1858. INSEE Première.

Lotteau, M., P. Loubet, et G. Sonnemann. 2017. « An Analysis to Understand How the Shape of a Concrete Residential Building Influences Its Embodied Energy and Embodied Carbon ». *Energy and Buildings* 154: 1-11.

Peuportier, Bruno, et Isabelle Blanc Sommereux. 1990. « Simulation Tool with Its Expert Interface for the Thermal Design of Multizone Buildings ». *International Journal of Solar Energy* 8 (2): 109-20.