

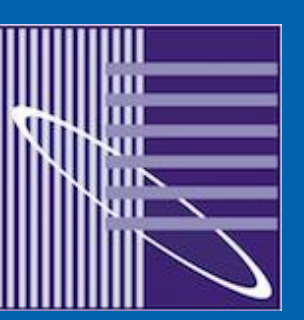
Programme de la conférence

Bordeaux
15-16 mai 2018

Merci de transmettre vos présentations à l'accueil lors de votre arrivée si vous ne l'avez pas fait par mail. Le placement des posters est numéroté. Bonne conférence !

MARDI 15 MAI

9h – 9h30	Accueil Café	
9h30 – 10h30	ORAL A	Confort, qualité de l'air et ventilation naturelle (J.-J. Roux)
Miguel CHEN AUSTIN	<i>I2M</i>	Influence des effets du vent et du tirage thermique sur le taux de renouvellement de l'air d'un bâtiment ventilé naturellement : estimations par simulation aéraulique directe et par validation expérimentale d'une modélisation thermique.
Bassam MOUJALLED	<i>Cerema</i>	Bâtiments démonstrateurs prébat : retour d'expérience et premiers enseignements sur le confort thermique hivernal et estival.
Hugo GEOFFROY	<i>LOCIE</i>	Développement d'une approche performantielle de la qualité de l'air - Impact d'une prise en compte fine des distributions de perméabilité à l'air externe et interne sur la modélisation multizone d'une maison basse consommation.
Blaise RAYBAUD	<i>CEA</i>	Modulation du taux de renouvellement de l'air en milieu intérieur : approche multicritères par logique floue conciliant efficacité énergétique et qualité de l'air intérieur.
10h30 – 11h	Pause	
11h – 12h30	POSTER A (A. Caucheteux & J. Le Dréau)	
Thomas BERTHOU		Simulation à l'échelle du quartier : comparaison inter-modèles et analyse de sensibilité.
Charles-Florian PICARD		Modélothèque « Qualité de l'Air Intérieur » de BuildSysPro : nouveautés et confrontation aux premières mesures du ST5-1 de l'Annexe 68.
Alizée NAVARRO		E2VENT : un module de façade active pour la rénovation de bâtiments résidentiels. Présentation du système intégré de stockage de chaleur.
Camille PAJOT		Analyse de flexibilité électrique des pompes à chaleur d'un quartier résidentiel neuf.
Benoit DELINCHANT		Arrivée massive des capteurs communicants à basse consommation et bas coût au sein des bâtiments : vers de nouveaux services aux occupants.
Yannis MERLET		Couplage de l'optimisation multi-objectif avec la simulation thermique des parcs de bâtiments.
Philippe CHAUVELON		Études expérimentales et numériques d'un Micro-Grid.
Abed Al Waheed HAWILA		Influence of PMV-based control on energy consumption and thermal comfort during heating period in a highly glazed room.
Hugo VIOT		Mise en œuvre d'une solution d'interopérabilité pour la prédiction d'indicateurs de performance énergétique : application à un bâtiment démonstrateur.
Georges COSTANTINE		Etude d'un bâtiment en béton de chanvre : suivi expérimental et validation numérique.
Chi-Kien NGUYEN		Impact des éléments d'architecture d'une pièce sur le comportement d'un jet d'air asymétrique turbulent vertical - Caractérisation expérimentale.
Toan VO MINH		Modélisation du fonctionnement réel d'une pompe à chaleur et de ses défauts de mise en œuvre et d'usage sous forme de réseau de Pétri.
Abdulaziz AFANDI		Outils d'optimisation de la conception multi-objectifs utilisant la programmation visuelle : tests utilisateurs d'acceptabilité.
Myriam HUMBERT		Bâtiments démonstrateurs prébat : retour d'expérience et premiers enseignements sur la performance réelle et sur les écarts calcul/mesure.
Hajar BEN HMIDOU		Développement d'une approche inverse par diagnostic thermique des façades pour une réhabilitation optimale d'un bâtiment résidentiel.
Martin GARCIA PEREZ		Simulation des besoins énergétiques à l'échelle de la ville : Une méthodologie de modélisation adaptée.
Emmanuel ANTCZAK		Etude du comportement hygrothermique d'anas de lin utilisés comme isolant en vrac de combles perdus.
12h30 – 13h45	Repas	
13h45 – 14h30	AG IBPSA (E. Wurtz & L. Mora)	
14h30 – 16h	ORAL B	Outils pour la conception et l'aide à la décision (A. Bastide)
Franck TAILLANDIER	<i>I2M</i>	Li-BIM: un modèle cognitif avancé simulant le comportement de l'occupant et son confort intérieur à partir d'une maquette numérique afin de guider les choix de conception de bâtiments durables BIM.
Nicolas LAUZET	<i>TRIBU</i>	Construction d'un fichier microclimatique urbain utilisable en STD.
Abdou IDRIS OMAR	<i>CETHIL</i>	Définition de potentiels d'utilisation de ressources bioclimatiques pour le rafraîchissement des bâtiments en climat chaud et humide.
Jean-Baptiste VIDEAU	<i>CSTB</i>	Vers une cosimulation multi-physique interactive – le projet COSIMPHI.
Benjamin DELHOMME	<i>I2M</i>	Un outil participatif d'aide à la décision appuyé par un système d'argumentation pour la réhabilitation thermique d'un parc de bâtiments.
16h – 16h30	Pause	
16h30 – 17h30	ORAL C	Systèmes énergétiques innovants (P. Riederer)
Renaud GEOFFROY	<i>LaSIE</i>	Détermination des paramètres sensibles pour la conception de bassin de toit ouvert pour le rafraîchissement passif.
Zakaria AKETOUANE	<i>CRE</i>	Couplage d'une PAC et d'un système de refroidissement d'eau par échanges radiatifs avec le ciel : modélisation et estimation de performances.
Madi KABORE	<i>LaSIE</i>	Etude paramétrique des performances thermiques d'une maison individuelle équipée d'une fenêtre pariéto-dynamique intégrant un vitrage chauffant.
Patricia CARBAJO J	<i>CEA INES</i>	Etude numérique des performances d'un système solaire combiné destiné à la production d'eau chaude sanitaire ainsi qu'au préchauffage de l'air de ventilation dans la maison individuelle.
17h30 – 18h15	CONFERENCE INEF4: Présentation de l'ITE et de deux projets (L. Mora)	
Jérôme LOPEZ	<i>INEF4</i>	NOBATEK/INEF4 - Générateur et accélérateur d'innovations pour le bâtiment durable.
Baptiste DURAND-E	<i>INEF4</i>	Projet STD+ : Outils pour les contrats de performance énergétique.
Hugo VIOT	<i>INEF4</i>	Projet COSYBA: Solutions d'interopérabilité pour la prédiction d'indicateurs de performance.



Un accès wifi est disponible pendant la conférence (actes en ligne). Les identifiants vous ont été envoyés par mail. N'oubliez pas de voter pour le meilleur poster.

Bordeaux
15-16 mai 2018

MARDI 15 MAI (suite)

18h15 – 19h CONFERENCE AICVF: Retours d'expériences de deux solutions solaires (L. Mora)

Introduction par Y. NIOCHE & D CIVIERE

Sébastien ACKERMANN *BASE* Le système Congen'Air

J-François CHAVAGNAC *EKLOR* Le suivi d'installations solaires

19h – 19h45 Cocktail

20h – 23h30 DINER DE GALA

MERCREDI 16 MAI

8h – 8h30 Accueil Café

8h30 – 10h ORAL D Transferts de chaleur et de masse, micro-climat urbain (T. Duforestel)

Ana Gabriela CHAVEZ *LMEE* Développement d'une méthode inverse par modèle réduit pour le suivi sur site des propriétés thermiques de matériaux de construction.

Sarah JURICIC *LOCIE* Impact de la variabilité naturelle des conditions météorologiques sur l'estimation des paramètres : application aux modèles RC.

Thomas BUSSE *LOCIE* Etude des transferts hygrothermiques dans le bois : du matériau au volume d'air.

Thibaut COLINART *Univ Bretagne* Comparaison du comportement hygrothermique de trois systèmes d'isolation thermique par l'extérieur.

Sophie CLAUDE *INSA* Modélisation hygrothermique d'une rénovation prenant en compte le microclimat urbain. Étude de cas du centre-ville médiéval de Cahors (France).

Adnane M'SAOURI E B *ETTE* Etude de l'impact du microclimat urbain proche du bâti par une modélisation intégrée dans le logiciel TRNSYS.

10h – 10h30 Pause

10h30 – 11h30 CONFERENCE de Paul LINDEN : Ventilation in buildings (E. Wurtz)

11h30 – 13h POSTER B (P. Tittlein & T. Berthou)

El Mehdi HAMDANI Calcul trigonométrique du flux solaire reçu par un individu.

Hugo GEOFFROY Mise en place des Contrats de Performances Energétiques pour le parc hôtelier alpin – Le projet CREnHOM, une approche pluridisciplinaire d'une problématique transfrontalière.

Jeff FAHED Etude numérique de l'impact des conditions aux limites microclimatiques générées par les stratégies de refroidissement urbain sur les charges de climatisation Étude de cas d'un quartier méditerranéen à Beyrouth, Liban.

Victor MARTY-JOURJON Proposition d'une méthode générique d'estimation de parcs de bâtiments de bureaux pour la simulation énergétique.

Georgios-Evrystheas KYRIAKODIS Development of a coupling strategy for district energy network and microclimate simulation.

Edouard WALTHER Indicateur de confort P.E.T. : une revue critique.

Farad-Idriss MLANAO Modélisation de l'interaction Toiture-Terrasse Végétalisée - Panneau Solaire Photovoltaïque.

Léa GONDIAN Évaluation de l'influence des occupants sur le confort estival : utilisation de l'analyse de sensibilité.

Frederic WURTZ Vers une optimisation intégrée des bâtiments basée sur un environnement permettant l'interopérabilité des outils numériques.

Yunseok LEE Clustering sous deux espaces pour la modélisation et la segmentation des parcs virtuels de bâtiments pour la gestion et la rénovation énergétique.

Aymeric NOVEL Mise au point de modèles réduits de la consommation énergétique en exploitation des bâtiments pour la contractualisation de Contrats de Performance Énergétique.

Mostafa Akil Application de méthodes de data mining sur les mesures de consommation et de températures dans deux collèges pour la détection d'anomalies de fonctionnement.

Alexis SAUVAGEON Simulation spatiale du confort au vent : influence de la discrétisation angulaire des vents.

Salah KACHKOUCH Evaluation du comportement thermique d'un bâtiment en pisé dans un climat semi-aride.

Aurélien LENOIR Audit énergétique de 23 hôtels à l'île Maurice – mesures électriques et thermiques.

Sihem GUERNOUTI Identification in-situ de la performance thermique d'une paroi : Comparaison de méthodes dans le contexte de bâtiments occupés.

Sergeï AGAPOFF La classification et les bâtiments type au service de la rénovation énergétique des parcs immobiliers.

Assia TALHI Evaluation du confort microclimatique, Apports de la modélisation des radiations solaires.

13h – 14h Repas

14h – 16h ORAL E Optimisation et méthodes pour la garantie de performance (B. Peuportier)

Lou MORRIET *G2Elab* Optimisation multi-acteurs appliquée à la valorisation de chaleur fatale d'un acteur industriel flexible.

Enrico FABRIZIO *ENS* Optimisation de la performance de l'enveloppe des bâtiments : couplage entre performance technico-énergétique et isolation acoustique.

Mija FROSSARD *Mines* Optimisation multicritère et analyse de cycle de vie de bâtiments zéro-énergie.

Jeanne GOFFART *LOCIE* RBD-FAST : une méthode d'analyse de sensibilité rapide et rigoureuse pour la thermique du bâtiment.

Antoine CAUCHETEUX *Cerema* Optimisation des plans de mesures pour la garantie de performance énergétique.

Simon ROUCHIER *Univ Savoie* Comparaison des modélisations déterministe et stochastique pour le calibrage de modèles thermiques simplifiés.

Thomas RECHT *I2M* Méthodologie pour la comparaison des performances simulées et mesurées de maisons à énergie positive.

Simon LIGIER *Mines* Développement d'une méthodologie de garantie de performance énergétique en réhabilitation basée sur la régression quantile multiple.

16h – 16h15 Remise des prix (poster & oral)

16h15 – 16h45 Café de départ

Oral_A	Bouchet-1165-1165	5
Oral_A	CHEN_AUSTIN-1131-1131	13
Oral_A	GEOFFROY-1148-1148	21
Oral_A	RAYBAUD-1146-1146	29
Oral_B	Delhomme-1147-1147	39
Oral_B	IDRIS_OMAR-1140-1140	49
Oral_B	LAUZET-1104-1104	59
Oral_B	MICOLIER-1133-1133	67
Oral_B	VIDEAU-1153-1153	75
Oral_C	AKETOUANE-1136-1136	83
Oral_C	CARBAJO_JIMENEZ-1118-1118	91
Oral_C	GEOFFROY-1102-1102	99
Oral_C	KABORE-1170-1170	107
Oral_D	BENDOUMA-1114-1114	115
Oral_D	BUSSER-1111-1111	123
Oral_D	Chavez-1171-1171	131
Oral_D	CLAUDE-1110-1110	139
Oral_D	JURICIC-1113-1113	147
Oral_D	MSAOURI_EL_BAT-1151-1151	155
Oral_E	CAUCHETEUX-1143-1143	163
Oral_E	FROSSARD-1158-1158	171
Oral_E	Goffart-1116-1116	181
Oral_E	LIGIER-1101-1101	189
Oral_E	MORRIET-1154-1154	197
Oral_E	Recht-1121-1121	205
Oral_E	Rouchier-1100-1100	213
Oral_E	Vallée-1139-1139	221
Poster_A	AFANDI-1144-1144	229
Poster_A	ANTCZAK-1172-1172	237
Poster_A	BEN_HMIDOU-1150-1150	247

Poster_A	CHAUVELON-1142-1142	255
Poster_A	COSTANTINE-1120-1120	263
Poster_A	DELINCHANT-1108-1108	271
Poster_A	DUGUÉ-1105-1105	279
Poster_A	FRAYSSINET-1127-1127	287
Poster_A	GARCIA_PEREZ-1124-1124	295
Poster_A	HAWILA-1145-1145	303
Poster_A	HUMBERT-1166-1166	311
Poster_A	MERLET-1167-1167	319
Poster_A	NGUYEN-1156-1156	327
Poster_A	PAJOT-1109-1109	335
Poster_A	PICARD-1161-1161	343
Poster_A	VIOT-1157-1157	351
Poster_A	VO_MINH-1103-1103	359
Poster_B	AGAPOFF-1159-1159	367
Poster_B	Akil-1169-1169	375
Poster_B	FAHED-1106-1106	383
Poster_B	Geoffroy-1152-1152	391
Poster_B	GONDIAN-1126-1126	399
Poster_B	KACHKOUCH-1107-1107_a	407
Poster_B	KYRIAKODIS-1138-1138	409
Poster_B	LEE-1164-1164	417
Poster_B	LENOIR-1175-1175_a	425
Poster_B	MARTY-JOURJON-1128-1128	435
Poster_B	Mlanao-1135-1135	443
Poster_B	NOVEL-1125-1125	451
Poster_B	RODLER-1155-1155	459
Poster_B	Sauvageon-1122-1122	467
Poster_B	TALHI-1149-1149	477
Poster_B	WALTHER-1115-1115	485

Poster_B	WALTHER-1129-1129	_____	495
Poster_B	WURTZ-1163-1163	_____	503

Bâtiments démonstrateurs Prébat : retour d'expérience et premiers enseignements sur le confort thermique hivernal et estival

Jean-Alain Bouchet^{*1}, Bassam Moujalled², Constance Lancelle³, Myriam Humbert⁴

¹ CEREMA, Direction Méditerranée, Aix-en-Provence F-13290, France

² CEREMA, Direction Centre-Est, l'Isle d'Abeau F-38081, France

³ CEREMA, Direction Ouest, Les Ponts-de-Cé F-49130, France

⁴ CEREMA, Direction Ouest, Saint Briec F-22015, France, France

[*jean-alain.bouchet@cerema.fr](mailto:jean-alain.bouchet@cerema.fr)

RESUME. Depuis 2009, le Cerema assure les suivis-évaluations de la performance énergétique et du confort thermique pour près de 140 bâtiments performants. Pour le confort thermique, 84 opérations ont été évaluées à travers plusieurs indicateurs en tenant compte de la rigueur climatique. Les résultats montrent que le confort thermique hivernal des bâtiments suivis est globalement jugé très satisfaisant par les occupants, en accord avec les mesures, du fait des niveaux d'isolation et la qualité des équipements de chauffage, mais cela se fait dans certains cas au détriment de la consommation de chauffage. Pour le confort thermique estival, les résultats sont plus mitigés. La forte isolation des bâtiments performants n'est pas nuisible au confort d'été mais le rend plus sensible à la qualité de la gestion thermique : l'utilisation des protections solaires et l'ouverture nocturne des fenêtres. Par ailleurs, il apparaît que la méthode de la norme NF EN 15251 sur le confort adaptatif permet une évaluation plus fine du confort thermique en saison chaude que le critère du nombre d'heure à plus de 28°C. Les résultats obtenus apparaissent davantage en phase avec le ressenti des occupants.

MOTS-CLÉS : bâtiment performant, mesure in-situ, confort thermique, confort adaptatif.

ABSTRACT. Since 2009, Cerema has been monitoring and evaluating energy performance and indoor thermal comfort for nearly 140 low energy buildings. Regarding thermal comfort, 84 buildings were evaluated through several indicators taking into account the climatic severity. The results show that the winter thermal comfort of the monitored buildings is generally considered very acceptable by the occupants, in accordance with the measurements results, because of the high insulation levels and the quality of the heating equipment. But this is done in some cases to the detriment of heating consumption. For summer thermal comfort, the results are mixed. The strong insulation of low-energy buildings is not detrimental to summer comfort, but makes it more sensitive to occupants' behaviors: the use of solar protection and the opening of windows at night. Furthermore, it appears that the method of the standard NF EN 15251 on adaptive comfort allows a more refined assessment of thermal comfort in the hot season than the criterion based on the number of hours at more than 28° C. The results obtained appear more in phase with the perception of the occupants.

KEYWORDS: low-energy buildings, in-situ measurements, thermal comfort, adaptive comfort.

1. INTRODUCTION

Dans le cadre programme de recherche et d'expérimentation sur l'énergie dans le bâtiment (PREBAT) lancé en 2005, plus de 200 bâtiments, lauréats des appels à projet Ademe-région « Bâtiments démonstrateurs », ont été instrumentés durant deux ans afin d'identifier leur performance réelle (performance énergétique et confort thermique). Le Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement (Cerema) assure les suivis-évaluations de près de 70 % des bâtiments instrumentés et assure la capitalisation des enseignements de l'ensemble des

200 suivis-évaluations (Cerema 2017). Les bâtiments suivis sont assez diversifiés, avec 70% d'opérations neuves et 56% de bâtiments résidentiels. Ils sont répartis sur tout le territoire métropolitain, et toutes les zones climatiques sont concernées. Tous ces bâtiments sont occupés.

L'évaluation de la performance des bâtiments ne peut se limiter à l'étude de leurs consommations d'énergie : le confort pour l'occupant - et plus largement la qualité d'usage - en constitue un élément important et très largement lié aux consommations. En effet, le confort constitue souvent le mode de perception principal du bâtiment par l'occupant. Or non seulement il peut être différent dans les bâtiments performants, mais il influence les arbitrages opérés pour l'assurer et peut impacter d'une manière plus ou moins importante les consommations d'énergie.

Les bâtiments performants se caractérisent par une enveloppe avec une forte isolation thermique et des surfaces vitrées favorisant les apports solaires avec des systèmes énergétiques sophistiqués faisant appel souvent à plusieurs sources d'énergie. La compréhension du confort thermique dans ces bâtiments est nécessaire à la fois pour la satisfaction des besoins des occupants, mais aussi pour l'atteinte des performances prévues.

En hiver, le confort thermique dans ces bâtiments est généralement assuré grâce aux systèmes de chauffage. Mais ces derniers demandent une attention particulière, car les apports internes et solaires dans des enveloppes fortement isolées conduisent à des besoins thermiques très faibles. L'inertie thermique joue aussi un rôle important dans la régulation des apports internes et solaires en particulier en mi-saison.

En revanche, la forte isolation thermique de ces bâtiments en été exige une attention particulière pour le confort d'été dans les bâtiments non-climatisés. En effet, celle-ci permet de réduire les échanges de chaleur avec l'extérieur pour garder la chaleur dans le bâtiment en hiver, et conserver la fraîcheur en été tant qu'il fait plus frais dedans. Cependant, en cas de forts apports internes et solaires non maîtrisés et d'une aération insuffisante du bâtiment, cela devient un inconvénient dès que la température intérieure devient importante et contribue à des situations de surchauffe portant préjudice au confort thermique dans le bâtiment.

Dans cet article, les résultats des campagnes d'évaluation du confort thermique sont présentés pour un panel de 84 bâtiments démonstrateurs. Dans un premier temps, la méthode d'évaluation est présentée en se focalisant sur les indicateurs de confort et de contrainte climatique retenus. Ensuite nous présentons les résultats sur le confort perçu par les usagers, le confort évalué par des indicateurs, la sensibilité des résultats à la contrainte climatique et à la gestion thermique d'été.

2. METHODOLOGIE

L'évaluation du confort thermique nécessite la prise en compte des différentes variables influant sur le confort. L'ambiance thermique est caractérisée par quatre grandeurs physiques (la température de l'air, la température de rayonnement, l'humidité et la vitesse de l'air). Ces variables réagissent avec l'activité et la vêtue du corps humain pour établir son état thermique et constituent ensemble les six paramètres de base des échanges thermiques entre l'homme et son environnement. Mais au-delà de ces variables, la perception thermique d'un environnement peut être influencée par des variables physiologiques, psychologiques et sociologiques ; l'acclimatation peut altérer les sensations

thermiques, ainsi que les comportements, l'accoutumance et les attentes des occupants dans leurs cadres de vie (Moujalled 2007).

Afin d'évaluer le confort thermique, les températures d'air et les humidités relatives ont été mesurées avec un pas de temps horaire dans plusieurs locaux de chaque bâtiment ainsi qu'à l'extérieur. Les mesures ont été réalisées sur une période d'un à deux ans. Elles sont accompagnées de questionnaires à destination des occupants. La température de globe n'a pas été mesurée. Cependant, compte tenu des performances élevées des parois opaques et vitrées, nous pouvons considérer que la température d'air mesurée est assez proche de la température opérative.

La méthode d'évaluation adoptée se base sur la norme NF EN 15251 (AFNOR 2007). Cette norme spécifie les critères de confort selon quatre catégories d'ambiance intérieure : la première catégorie (Catégorie I) correspond au niveau le plus élevé de confort pour les espaces occupés par des personnes très sensibles et fragiles. La deuxième catégorie (Catégorie II) correspond à un niveau normal de confort à utiliser pour les bâtiments neufs et les rénovations. La troisième catégorie correspond à un niveau modéré à utiliser pour les bâtiments existants. Les ambiances thermiques en dehors des critères des trois catégories précédentes sont classées en catégorie IV.

Pour notre étude, la catégorie de confort à privilégier est la catégorie II correspondant aux bâtiments neufs. La catégorie III peut également être tolérée, mais la catégorie IV doit être la plus évitée. La norme recommande de limiter le dépassement des limites de la catégorie à un seuil maximal de 5 % des heures d'occupation. Ainsi pour chaque bâtiment, nous avons calculé le nombre d'heures d'occupation dans chaque catégorie. La catégorie de confort du bâtiment est celle pour laquelle les mesures ne dépassent pas les limites de la catégorie pendant de plus de 5% des heures d'occupation.

2.1. EVALUATION DU CONFORT THERMIQUE HIVERNAL

Pour le confort hivernal, les critères de confort thermique des bâtiments chauffés de la norme NF EN 15251 ont été utilisés. Ils sont définis d'une manière similaire à ceux de la norme NF EN ISO 7730 (AFNOR 2006). En complément, une méthode a été développée pour estimer la température de consigne de chauffage pratiquée en se basant sur la mesure de la température intérieure pendant les heures de fonctionnement du chauffage et les heures d'occupation identifiées par enquête. Cette méthode n'est pas présentée dans cet article.

2.2. EVALUATION DU CONFORT THERMIQUE ESTIVAL

En été, la norme NF EN 15251 définit les conditions de confort pour les bâtiments non climatisés en se basant sur la notion du confort adaptatif pour tenir compte du phénomène d'adaptation des usagers aux conditions extérieures de la période météorologique vécues. Cette adaptation conduit en effet à la prise en compte des conditions climatiques des journées précédentes pour apprécier le niveau de confort d'un espace non climatisé dans lequel il y a peu de contraintes vestimentaires. Il est important de considérer les conditions de température extérieure pour apprécier de manière relative le confort d'un bâtiment non climatisé (AFNOR 2007). En effet, plus il fait chaud longtemps, plus les occupants s'habituent à une température élevée ; et plus la température extérieure est élevée durant les derniers jours, plus une température élevée est acceptée à l'intérieur des locaux. Cependant, l'adaptation à une séquence chaude a été plafonnée à 2°C, comme l'illustre la figure 1.

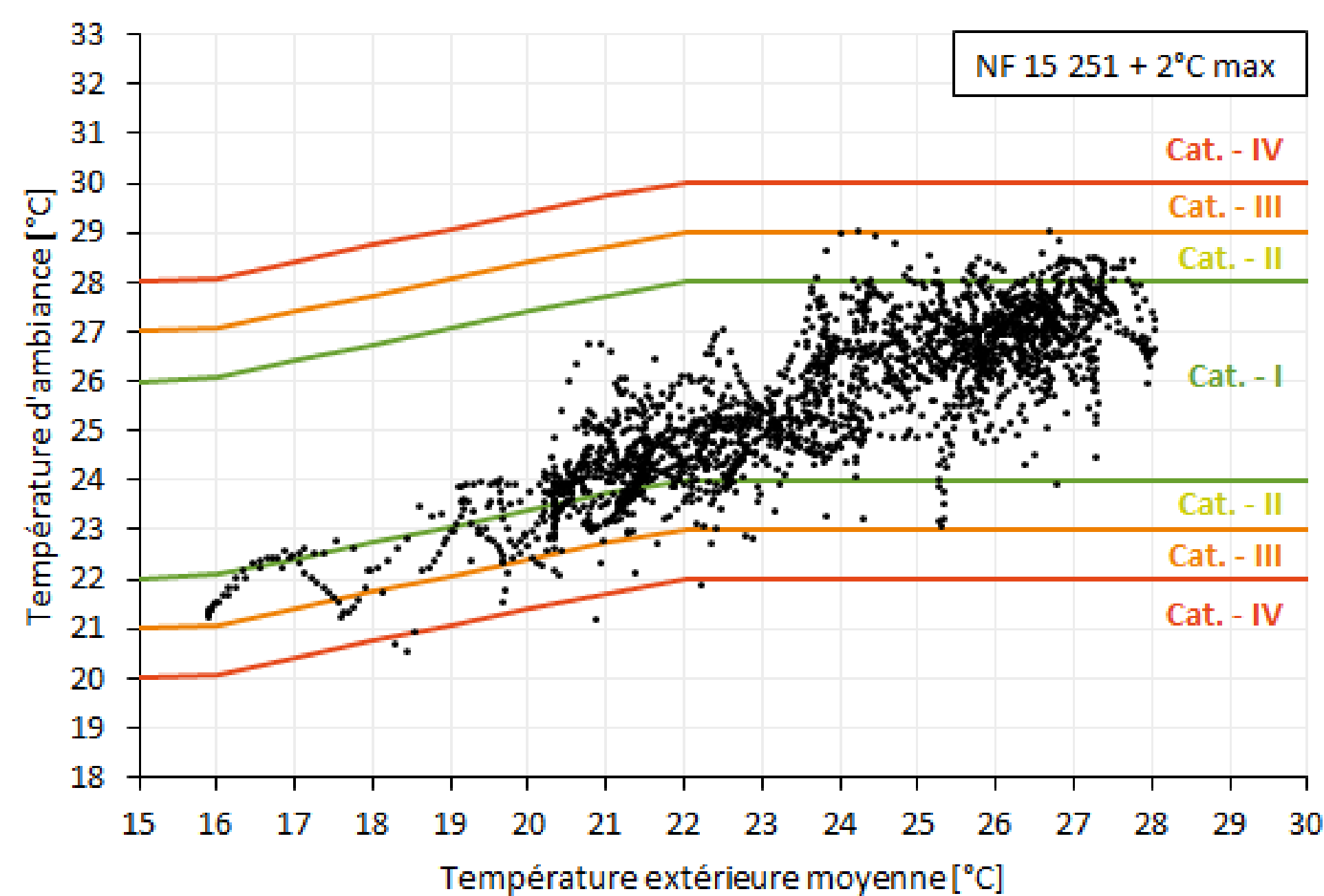


Figure 1 : Les plages de confort adaptatif selon les quatre catégories avec plafonnement à 2°C de l'adaptation à la température extérieure.

Ainsi pour chaque bâtiment, sa catégorie de confort adaptatif est déterminée comme décrit ci-avant. En complément, un deuxième indicateur a été calculé. Il s'agit de la fréquence cumulée des températures lorsque la température intérieure est supérieure à 28 °C (nombre d'heures à plus de 28 °C). Cet indicateur, plus répandu, est calculé à titre comparatif.

L'analyse du confort thermique estival est réalisée par zone climatique d'été définie dans la réglementation thermique française : zones a, b, c et d (Cerema 2017). La zone « a » est la zone moins chaude au nord de la France, et la zone « d » la plus chaude au sud de la France (le pourtour méditerranéen et la Corse).

Enfin, les Degrés-Jours base 24 (DJ24) ont été calculés pour tenir compte de la contrainte climatique. Cet indicateur est déterminé par le cumul sur l'ensemble de la saison estivale de l'écart entre la température extérieure moyenne journalière mesurée sur le site et 24°C lorsqu'il est positif.

3. RESULTATS

3.1. CONFORT HIVERNAL

Globalement, les mesures ainsi que les enquêtes réalisées auprès des occupants dans les bâtiments suivis montrent que le confort thermique en hiver est jugé très satisfaisant pour une large majorité des cas : 80 % de résidentiels (37 sur 46) et 74 % de non résidentiels (23 sur 31). Pour quelques bâtiments du panel (cinq logements collectifs en locatif social et sept non résidentiels, principalement des bâtiments publics), les avis varient en fonction des usagers de sorte que les témoignages unanimes d'inconfort sont rares (9 % des réponses en résidentiel, soit quatre opérations, principalement des maisons individuelles en locatif social, et une école en tertiaire). Cependant, dans certains bâtiments, les usagers font appel à des systèmes d'appoint pour atteindre le confort (10 opérations résidentielles sur 46, et seulement 3 opérations en tertiaire sur 30).

Il est important de noter que les températures de consigne pratiquées dans certains cas étaient plus élevées de 0 à 3 °C que la température de confort utilisée dans les calculs conventionnels de la réglementation thermique. Cela se traduit par des surconsommations de chauffage ; des augmentations de l'ordre de 0 à 11 kWh_{ep}/m².an pour l'habitat et de 0 à 5 kWh_{ep}/m².an pour les bureaux (Cerema, 2017).

3.2. CONFORT ESTIVAL

Nous présentons d'abord les retours des enquêtes obtenues sur 74 opérations (43 individuelles et 31 non résidentiels). Sur les 43 bâtiments résidentiels, le confort d'été est jugé agréable pour 25 bâtiments, soit près de 60% de l'échantillon. Dans sept autres bâtiments (16%), le ressenti des usagers est plus mitigé, certains jugeant l'ambiance confortable et d'autres plus inconfortable. Enfin pour onze bâtiments (26%), il existe un sentiment d'inconfort généralisé.

Pour les 31 bâtiments non résidentiels, le confort d'été est jugé agréable dans 19 bâtiments (61% de l'échantillon), alors que 4 bâtiments présentent un ressenti mitigé (13%), et enfin 8 bâtiments (26%) un sentiment d'inconfort généralisé.

3.2.1. Analyse du nombre d'heures à plus de 28 °C

La figure 2 présente la répartition des nombres d'heures à plus de 28 °C par zone climatique et par type de bâtiment. Nous observons d'abord que la répartition des bâtiments par zone climatique est disparate, avec dans les zones c et d moins de dix bâtiments, ce qui limite l'exploitation statistique des résultats.

Les bâtiments non résidentiels présentent globalement un niveau de confort satisfaisant avec moins 50 heures à plus de 28°C pour la quasi-totalité des bâtiments.

En résidentiel, près de la moitié des bâtiments présente moins de 50 heures à plus de 28 °C (27 bâtiments sur 55), et pour 80% des bâtiments le dépassement est limité à 5% des heures d'occupation (220 heures). Onze bâtiments résidentiels présentent un dépassement de plus de 5% des heures d'occupation, mais ces dépassements sont constatés dans toutes les zones climatiques. Par ailleurs les bâtiments résidentiels en zones a et b (avec 16 et 24 bâtiments respectivement), présentent des résultats très hétérogènes au sein de la même zone climatique avec des valeurs médianes proches des 1^{ers} quartiles, et des moyennes proches des 3^{èmes} quartiles, et des valeurs maximales comparables à celles des zones c et d. La problématique de l'inconfort thermique en saison chaude n'est pas spécifique à la zone méditerranéenne (zone d).

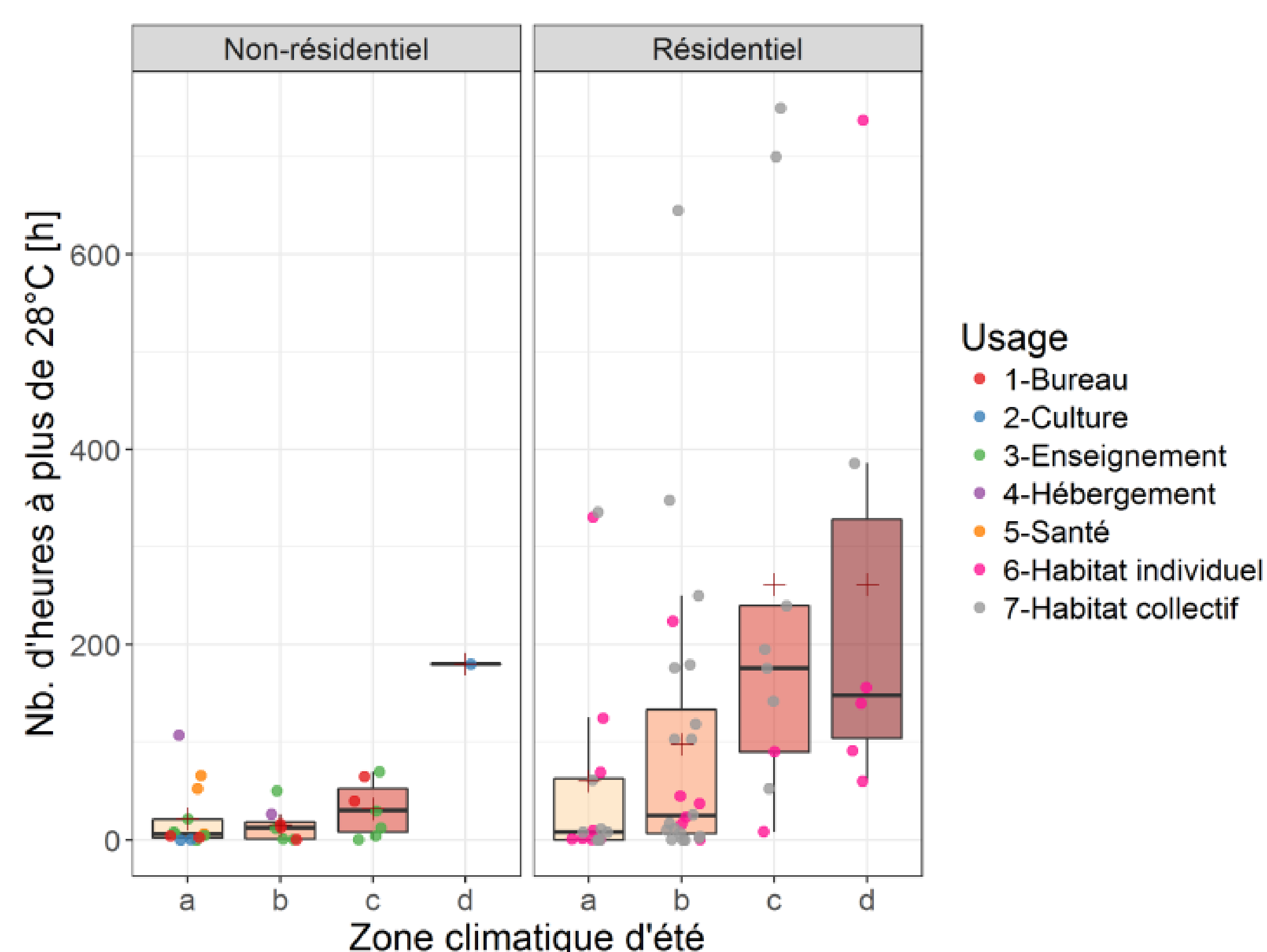


Figure 2 : Evaluation du confort d'été selon le nombre d'heures à plus de 28°C.

La figure 3 présente les résultats en tenant compte de la rigueur climatique caractérisée par les DJ24. Comme observé précédemment, la majorité des bâtiments sont en zones a et b.

Les DJ24 présentent des variations importantes pour une même zone climatique, hormis la zone méditerranéenne mais pour laquelle l'échantillon n'est que de cinq bâtiments. A l'instar des zones climatiques, les nombres d'heures à plus de 28 °C sont très hétérogènes pour le même niveau de rigueur climatiques avec des valeurs maximales comparables entre les différents niveaux de rigueur climatique.

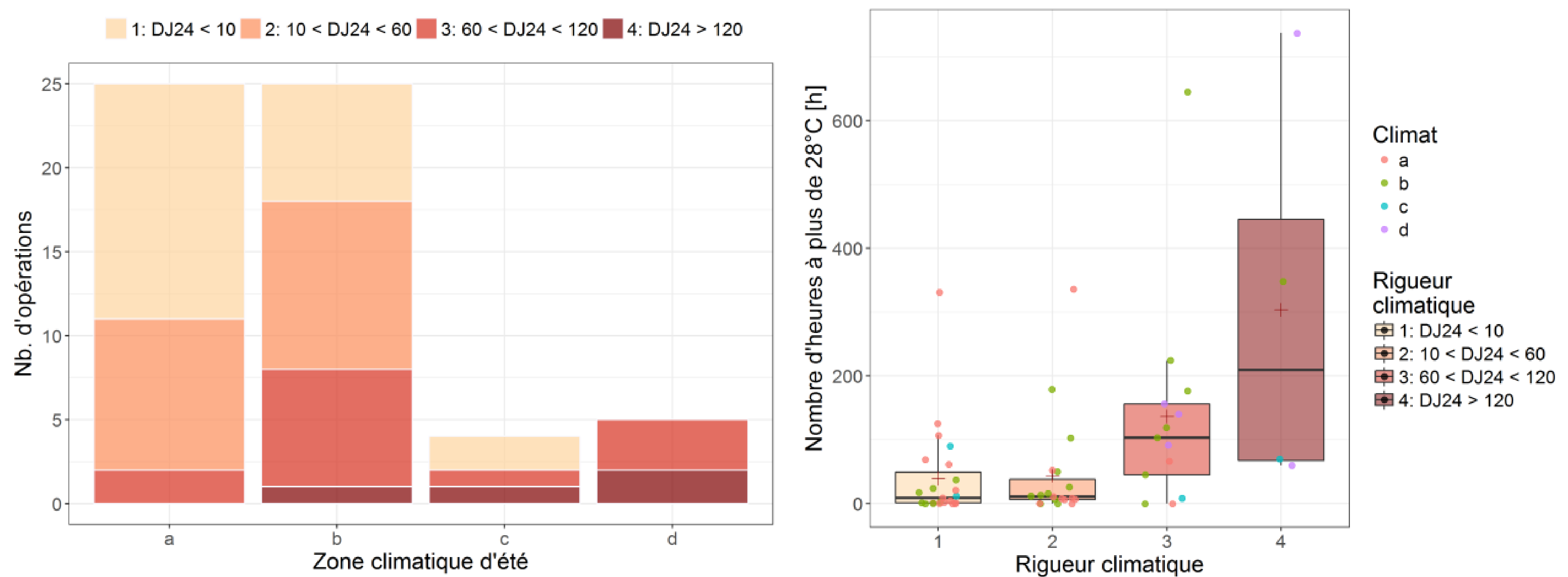


Figure 3 : Répartition des bâtiments par zone climatique selon la rigueur climatique (à gauche) et variations du nombre d'heures à plus de 28 °C selon la zone et la rigueur climatique (à droite).

3.2.2. Analyse selon les catégories du confort adaptatif

La figure 4 présente la répartition des classes de confort adaptatif des bâtiments par zone climatique et par type de bâtiment, ainsi qu'une comparaison entre catégories de confort et nombres d'heures à plus de 28 °C. Comme précédemment, la répartition des bâtiments par zone climatique est disparate, avec dans les zones c et d moins de dix bâtiments.

Les bâtiments non résidentiels présentent globalement un niveau de confort très satisfaisant avec la quasi-totalité des bâtiments en catégorie I correspondant au niveau le plus élevé de confort, et aucun bâtiment en catégorie IV (inconfort). Ces résultats sont cohérents avec ceux observés ci-avant moyennant le nombre d'heures à plus de 28 °C. Cependant, les deux indicateurs ne révèlent pas de situation d'inconfort thermique contrairement aux résultats des enquêtes.

Pour les bâtiments résidentiels, plus de la moitié sont en catégorie I (24 bâtiments sur 42), trois en catégorie II et six bâtiments en catégorie III. Enfin neuf bâtiments sont en catégorie IV correspondant à l'inconfort thermique. Comme précédemment, les bâtiments situés en catégorie IV sont répartis dans toutes les zones climatiques. Ces résultats confirment que la problématique de l'inconfort thermique en saison chaude n'est pas spécifique à la zone méditerranéenne.

La comparaison des catégories de confort adaptatif aux nombres d'heures à plus de 28 °C montre des résultats mitigés. Pour la catégorie I, tous les bâtiments quelle que soit leur destination d'usage présentent un nombre d'heures à plus de 28 °C inférieurs à 50. Le nombre de bâtiments dans les catégories II et III est relativement faible. Cependant le nombre d'heures à plus de 28 °C des bâtiments

deux catégories est assez proche et ne permet pas de les différencier. Enfin c'est pour les bâtiments de la catégorie d'inconfort IV que les résultats sont les plus disparates. Ils varient entre un minimum de 12 heures à plus de 28 °C pour un habitat collectif en zone b et un maximum de 737 heures pour un habitat individuel en zone d.

En cumulant les catégories I et II, 27 bâtiments résidentiels présentent un niveau satisfaisant de confort (64%). Six bâtiments se trouvent en catégorie III avec un niveau modéré de confort (14%) et neuf en catégories IV d'inconfort (22%). Pour une taille d'échantillon comparable, les résultats des enquêtes coïncident avec ces résultats. Les résultats obtenus par l'application de la norme NF EN 15 251 apparaissent donc davantage en phase avec le ressenti des occupants. Cette méthode adaptative du confort thermique en saison chaude est plus fine que le critère du nombre d'heures dont la température intérieure est supérieure à 28 °C car elle prend en compte les conditions extérieures.

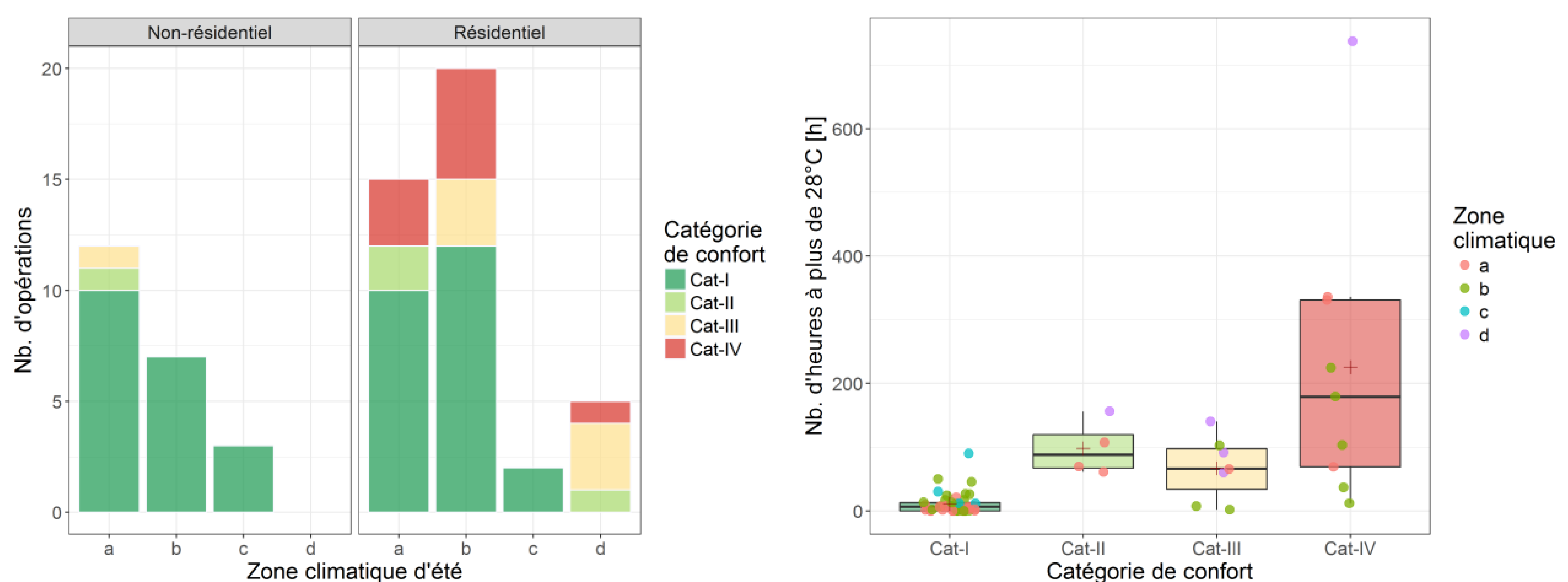


Figure 4 : Répartition des catégories de confort adaptatif par zone climatique et par type de bâtiment (à gauche), variation du nombre d'heures à plus de 28°C par catégorie de confort.

3.2.3. Variation du confort d'été selon la gestion thermique

Afin d'analyser la variation de la température au sein d'un même bâtiment, la figure 5 présente sur la gauche une comparaison du nombre d'heures maximal à plus 28 °C en fonction du nombre minimal dans plusieurs espaces d'un même bâtiment. Nous observons en particulier pour les habitats collectifs des variations importantes avec des valeurs maximales plus de deux fois plus élevées que les valeurs minimales, et donc des niveaux de confort variables au sein d'un même bâtiment. Ces différences peuvent s'expliquer par la position des logements dans le bâtiment et leur exposition, les moyens à disposition des occupants pour la gestion thermique de leurs logements, et surtout les pratiques des occupants (ouverture des fenêtres, utilisation des protections solaires, ...). En effet, dans les bâtiments performants, les logements sont plus sensibles à la gestion thermique d'été du fait du niveau de confinement des apports internes et solaires par les parois opaques plus isolées.

La figure de droite montre que les températures baissent peu la nuit. Elles sont relativement stables en été en particulier en bâtiment collectif d'habitation du fait de l'inertie, mais aussi d'une ventilation thermique d'été souvent faible en zones a et b.

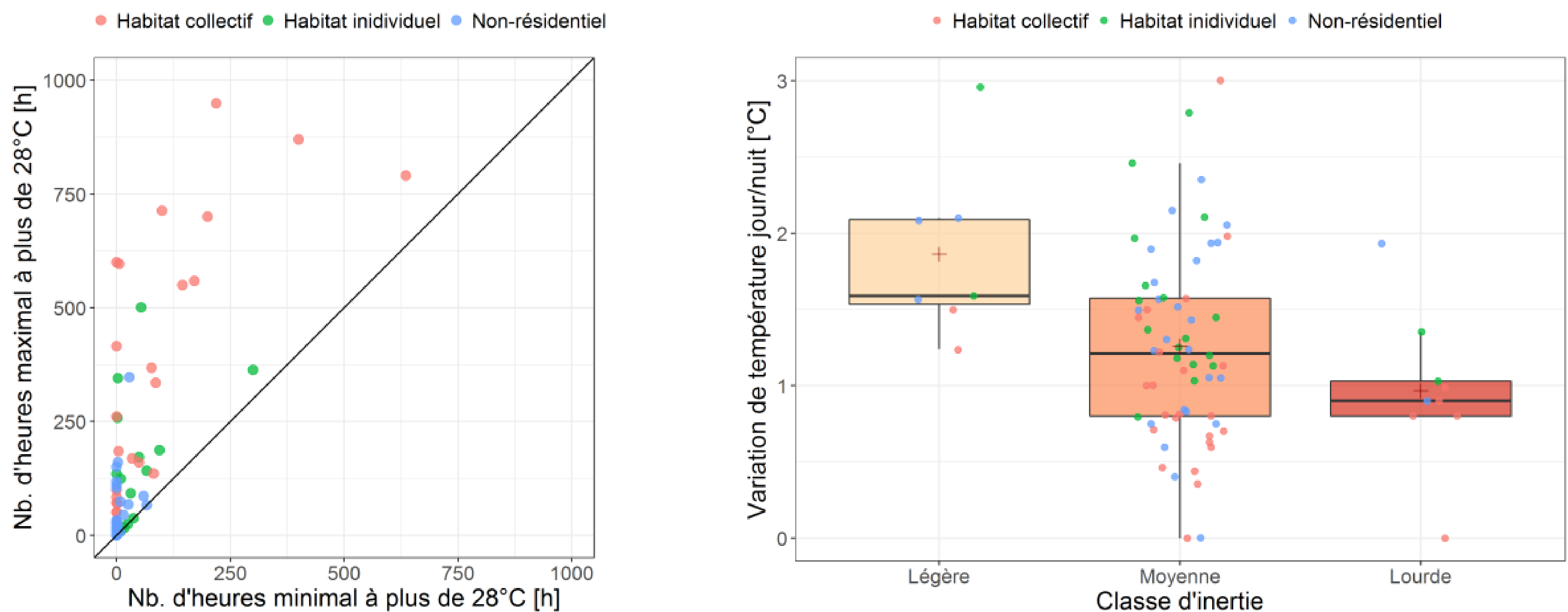


Figure 5 : Variation de la température au sein du même bâtiment moyennant le nombre d'heures à plus de 28°C (à gauche), et variation de température jour/nuit en fonction de l'inertie (à droite).

4. CONCLUSIONS

Pour le panel de 84 bâtiments performants suivis, les résultats montrent que le confort thermique hivernal est globalement jugé très satisfaisant par les occupants, en accord avec les mesures, du fait des niveaux d'isolation et la qualité des équipements de chauffage. Pour le confort thermique estival, les résultats sont plus mitigés. Les résultats des enquêtes montrent un inconfort généralisé ressenti dans près du quart des bâtiments résidentiels et non résidentiels. Concernant les indicateurs, en résidentiel, la méthode du confort adaptatif de la norme EN 15251 présente des résultats légèrement plus proches des enquêtes que le nombre d'heures à plus de 28°C. Cependant la comparaison entre les deux indicateurs montre des situations opposées pour un même bâtiment. D'une manière générale, les situations d'inconfort d'été sont observées dans les différentes zones climatiques sans que ça soit spécifique à la zone méditerranéenne. La forte isolation des bâtiments performants n'est pas nuisible au confort d'été mais le rend plus sensible à la qualité de la gestion thermique (l'utilisation des protections solaires et l'ouverture nocturne des fenêtres). Cette étude sera poursuivie l'année prochaine en élargissant le panel de bâtiment, et permettra ainsi d'approfondir l'analyse des indicateurs.

5. REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient l'ADEME et le ministère en charge de la construction pour leur soutien financier ainsi que tous ceux qui ont contribué à cette étude.

6. BIBLIOGRAPHIE

- AFNOR. 2006. NF EN ISO 7730 - 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.
- AFNOR. 2007. NF EN 15251 - Critères d'ambiance intérieure pour la conception et évaluation de la performance énergétique des bâtiments couvrant la qualité de l'air intérieur, la thermique, l'éclairage et l'acoustique.
- Cerema. 2017. Bâtiments démonstrateurs à basse consommation d'énergie PREBAT 2012-2016. France: Cerema.
- Moujalled, Bassam. 2007. « Modélisation dynamique du confort thermique dans les bâtiments naturellement ventilés ». Thèse de Doctorat, Villeurbanne, France: INSA de Lyon.

Influence des effets du vent et du tirage thermique sur le taux de renouvellement de l'air d'un bâtiment ventilé naturellement : estimations par simulation aéraulique directe et par validation expérimentale d'une modélisation thermique

Miguel Chen Austin^{*1,6}, Alain Sempey^{1,2,3}, Denis Bruneau^{2,4,5}, Laurent Mora^{1,2,3}

¹ Université de Bordeaux, I2M, UMR 5295, F-33400 TALENCE, France

² CNRS, I2M, UMR 5295, F-33400 TALENCE, France

³ Arts et Métiers ParisTech, I2M, UMR 5295, F-33400 TALENCE, France

⁴ ENSAP de Bordeaux, F-33405 TALENCE, France

⁵ GRECCAU, EA 7482, ENSAP Bordeaux, 33405 TALENCE, France

⁶ Universidad Tecnológica de Panamá, Ciudad de Panamá, Panamá

*miguel.chen@u-bordeaux.fr, miguel.chen@utp.ac.pa

RESUME. Le présent travail vise à déterminer l'influence de l'effet du vent sur le renouvellement d'air d'un bâtiment naturellement ventilé en période estivale en Aquitaine ; ce bâtiment possède une distribution « non-standards » de ses ouvrants. Une métrologie installée, en termes de mesures du flux thermique et de température, associée à une modélisation thermique mono-zone amène à une estimation du taux de renouvellement d'air du bâtiment considéré. Ce taux est d'autre part estimé par modélisation directe sous le logiciel COMTAM, en prenant en compte de façon différenciée les deux effets du vent et du tirage thermique, ainsi que les données issues d'essais d'infiltrométrie. Une analyse comparative des résultats obtenus avec ces deux modélisations amène à conclure que l'effet du vent joue un rôle non dominant dans le cas où les ouvrants sont fermés, et qu'une combinaison des deux effets se présente dans le cas contraire.

MOTS-CLÉFS. Ventilation naturelle, effet du vent, simulation aéraulique.

ABSTRACT. This work aims to determine the influence of wind effects on the air exchange rate of a naturally ventilated building located in the Aquitaine region. This building has a non-standard distribution of its natural ventilation openings. An experimental study has allowed the estimation of the building air exchange rate by a single-zone thermal model. This air exchange rate was also determined by a single-zone airflow model using CONTAM software, considering individually the influences of wind and thermal buoyancy effects, along with data from air-tightness tests. A comparative analysis of the results of these two models led to conclude that wind effects play a non-dominant role in the case where openings remained closed and that a combination of these two effects takes place otherwise.

KEYWORDS. Natural ventilation, wind effects, airflow simulation.

1 INTRODUCTION

En physique du bâtiment, l'estimation locale de l'effet du vent sur le taux de renouvellement naturel de l'air reste compliquée dans des bâtiments ayant des dispositifs architecturaux « non-standards ». Ces dispositifs, faisant partie de l'enveloppe du bâtiment et étant soit des ouvrants soit des façades entières avec une morphologie « non-standards », rendent difficile la prise en compte précise des effets du vent sur l'estimation instantanée du renouvellement de l'air d'une pièce. La raison réside dans le besoin de connaître les valeurs des coefficients de pression à l'extérieur du bâtiment et des coefficients de décharge de ses ouvrants, qui ne se trouvent pas toujours dans la littérature, pour leurs prises en compte dans l'utilisation des outils de simulation aérodynamique numérique.

Une plateforme expérimentale à l'échelle 1, ayant notamment une distribution des ouvrants et une morphologie de maison « non-standards », est utilisée dans le présent travail. Cette plateforme d'essais, installée sur le site de l'IUT de l'Université de Bordeaux, est issue d'un prototype de bâtiment BEPos, dénommée Sumbiosi, réalisé par un consortium rassemblé autour du campus de Bordeaux dans le cadre de sa participation à la compétition interuniversitaire Solar Decathlon Europe 2012. Elle a notamment été conçue de façon à favoriser le stockage passif d'énergie diurne en hiver et le déstockage semi-passif d'énergie nocturne en été. Trois éléments principaux permettent a priori ces fonctions de stockage et déstockage passif d'énergie : une dalle de forte masse thermique située du côté de la façade Sud vitrée du bâtiment, des protections solaires fixes et mobiles, et des ouvrants pilotables sur les façades Sud, Nord et en shed. La méthodologie employée, afin d'étudier l'influence de l'effet du vent sur le taux du renouvellement de l'air de cette plateforme, est décrite dans les sections suivantes.

2 DÉBIT D'AIR À TRAVERS UNE OUVERTURE

2.1 RELATION THÉORIQUE DÉBIT-PRESSION

En utilisant l'équation de Bernoulli qui relie la vitesse d'un écoulement induite par une différence de pression à travers une ouverture, une relation théorique débit-pression s'exprime comme suit : $\dot{V} = A\sqrt{(2\Delta P)/\rho}$. Dans cette équation, \dot{V} représente le débit en m^3s^{-1} et A est l'aire de passage en m^2 . Cette expression est valide sous l'hypothèse d'un écoulement développé en régime turbulent et ne prend pas compte des effets de friction liés à la morphologie de l'ouverture. S'il est nécessaire de les prendre en compte, ces effets sont usuellement groupés dans un paramètre dénommé coefficient de décharge C_D , qu'il suffit d'inclure au produit du deuxième membre de l'équation précédente. Plusieurs études se sont intéressées à la dépendance de ce coefficient avec la pression, pour différents types d'ouvrants (Heiselberg et al., 2000).

2.2 RELATION RÉELLE DÉBIT-PRESSION

L'expression la plus générale pour décrire le débit d'un écoulement entraîné par une différence de pression à travers une ouverture (ou plus généralement un orifice), est : $\dot{V} = \mathcal{C}(\Delta P)^n$. Dans cette équation, \mathcal{C} est dénommé coefficient de débit d'air et s'exprime en $m^3s^{-1}Pa^{-n}$. Il dépend de la surface et de la forme de l'ouverture, et prend aussi en compte les effets de friction. L'exposant n est dénommé exposant de l'écoulement. Il varie normalement entre 0,5 (pour un écoulement en régime turbulent) et 1 (pour un écoulement en régime laminaire) (Ghiaus et Allard, 2005).

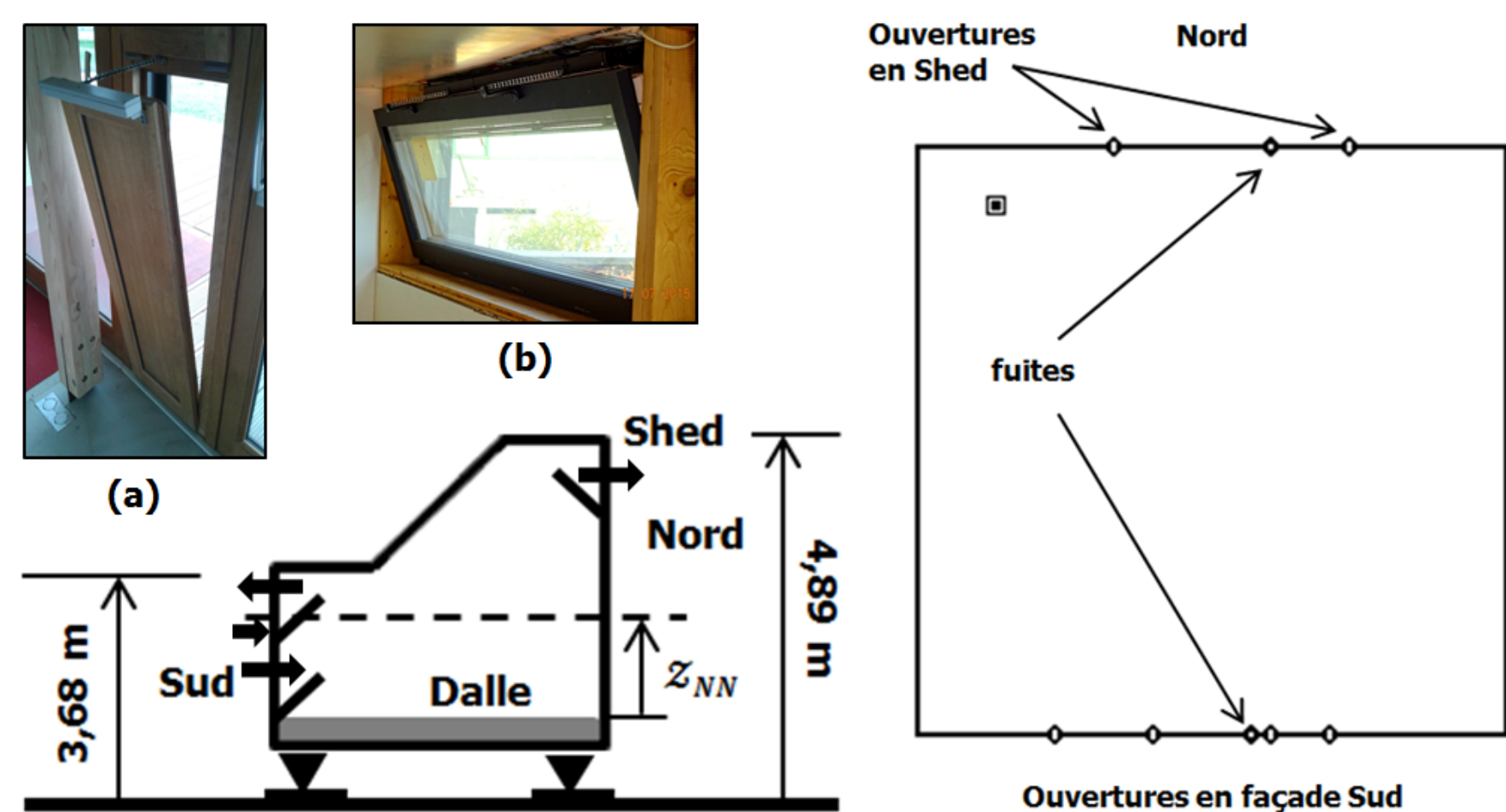


FIGURE 1. A droite : ouvrants de ventilation naturelle en (a) façade Sud $1,19 \times 0,35 \text{ m}$ et (b) shed $0,55 \times 2,22 \text{ m}$ et modèle monozone de la plateforme (en bas). A gauche : sketch de la plateforme sur CONTAM.

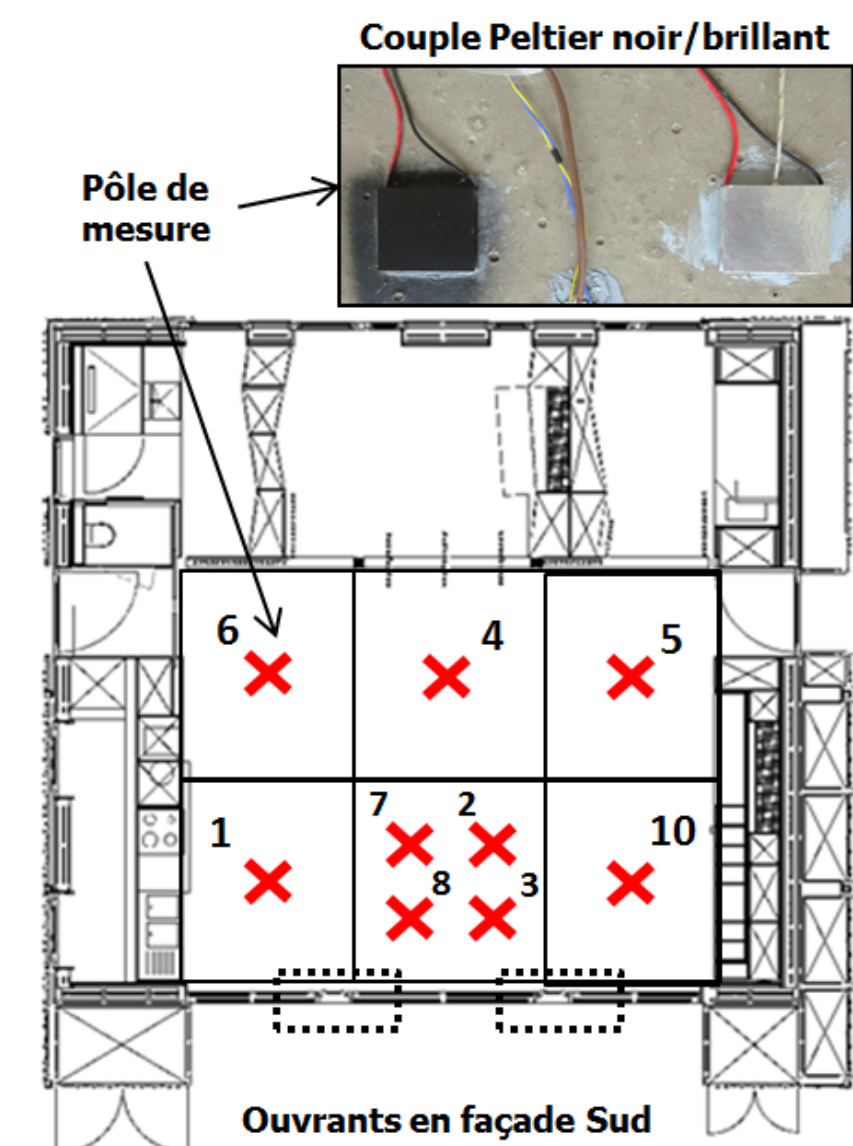


FIGURE 2. Distribution de la métrologie installée (petite croix rouges) : neuf pôles de mesures de température et de flux de chaleur en surface de dalle.

3 MÉTHODOLOGIE

3.1 PRÉSENTATION ET MODÉLISATION AÉRAULIQUE DU BÂTIMENT

La plateforme expérimentale comporte un volume intérieur total d'environ 210 m^3 avec une surface au sol d'environ 67 m^2 ; sa hauteur maximale est d'environ 5 m par rapport au terrain. Cette plateforme a été modélisée comme un bâtiment monozone avec deux hauteurs différentes pour les façades Sud et Nord (cf. fig.1, en bas à gauche). Dans notre cas, les seuls ouvrants actifs lors de la mise en place d'une ventilation naturelle nocturne, sont ceux en façade Sud et en shed. La modélisation aéraulique est effectuée sous l'hypothèse que seul l'espace ouvert interne au bâtiment est ventilé. Ainsi, notre modèle sous COMTAM est composé d'un volume d'environ 158 m^3 et une surface de plancher d'environ 46 m^2 (cf. fig.1, à droite). Ce modèle requiert la détermination des caractéristiques aérauliques des ouvrants en chacune des façades. La procédure suivie pour la détermination de ces caractéristiques est détaillée dans la section suivante.

3.2 CARACTÉRISTIQUES AÉRAULIQUES DES OUVRANTS

3.2.1 COEFFICIENT DE DÉCHARGE DES OUVRANTS

Une expression reliant le coefficient de décharge avec la différence de pression peut être obtenue à partir des équations précédentes, cf. §2.1 et §2.2 :

$$C_D = \frac{\mathcal{C}}{A} \left(\frac{\rho}{2}\right)^{1/2} (\Delta P)^{n-1/2} \quad [-] \quad (1)$$

où A représente les surfaces libres de l'ouverture au passage de l'air, usuellement dénommée aire effective de l'ouvrant (A_{eff}). Une façon de calculer cette aire, pour le type d'ouverture dit basculante d'axe horizontale ou « ouvrant à soufflet » (cf. fig.1 (a) (b)) peut être en prenant compte l'angle d'ouverture ϕ comme suit (Krzaczek et al., 2015) :

$$A_{eff} = \sqrt{\frac{1}{\frac{1}{(zw)^2} + \frac{1}{[2z \sin(\frac{\phi}{2}) + z^2 \sin \phi]^2}}} \quad [m^2] \quad (2)$$

dans lequel les dimensions (hauteur z et largeur w) de l'ouverture apparaissent. Ainsi, il suffit de connaître les valeurs de z , w , ϕ , \mathcal{C} et n , pour déterminer le coefficient de décharge C_D . Dans notre cas : les deux premières sont intrinsèques à la plateforme (cf. fig.1), et pour la troisième on a pris 20° , ce qui correspond à une ouverture maximale des ouvrants. La détermination de \mathcal{C} et n est détaillée dans la section suivante ; on utilisera l'indice v pour faire référence aux ouvrants et l'indice l pour les infiltrations.

3.2.2 DÉTERMINATION DE \mathcal{C} ET n POUR CHAQUE OUVRANT

Des essais d'infiltrométrie ont été effectués pour déterminer ces coefficients \mathcal{C} et n pour chaque ouvrant. Ici, on s'intéresse aux ouvrants (i) en façades Sud (\mathcal{C}_{Sud} et n_{Sud}), et (ii) en shed (\mathcal{C}_{shed} et n_{shed}). Avant tout, il faut constater trois points importants : (a) Les infiltrations sont toujours présentes dans chaque essai, (b) ces essais n'ont pas été effectués le même jour ; par conséquent un essai d'infiltrométrie a été mené chaque jour avant de procéder à la mesure de \mathcal{C}_v et n_v pour tel ouvrant ou tel groupe d'ouvrants, permettant ainsi une estimation adéquate de ce coefficient et de cet exposant, et (c) la façade Sud et le shed ont quatre et deux ouvrants respectivement, qui s'ouvrent sur chaque façade simultanément ; ainsi par exemple, le coefficient \mathcal{C}_{Sud} inclut l'ensemble des quatre ouvrants de la façade Sud et \mathcal{C}_{Sud} pour un seul ouvrant requerrait l'en diviser par quatre.

Une fois les essais d'infiltrométrie effectués un jour donné, on obtient une loi débit-pression pour chacun des points précédents (i) et (ii), de la façon suivante : à chaque fois qu'on effectue ces essais, on obtient une loi comme ceci :

$$\dot{V}_{l+v} = \mathcal{C}_{l+v}(\Delta P)^{n_{l+v}} \quad [m^3 s^{-1}] \quad (3)$$

où \dot{V}_{l+v} représente le débit d'air total à travers l'ensemble des infiltrations plus les ouvrants. Le débit à travers seuls les ouvrants (\dot{V}_v) s'obtient alors par différence entre le débit d'air de l'ensemble (\dot{V}_{l+v}) et le débit d'infiltrations (\dot{V}_l) : $\dot{V}_v = \dot{V}_{l+v} - \dot{V}_l$, c'est à dire $\dot{V}_v = \mathcal{C}_{l+v}(\Delta P)^{n_{l+v}} - \mathcal{C}_l(\Delta P)^{n_l}$. On écrit alors ce débit à travers les ouvrants seuls comme suit, de façon à identifier \mathcal{C} et n :

$$\dot{V}_v = \mathcal{C}_v(\Delta P)^{n_v} \quad [m^3 s^{-1}] \quad (4)$$

Dans la section suivante sont détaillés les essais d'infiltrométrie, permettant par la suite la détermination des valeurs de \mathcal{C} et n , pour les différents ouvrants de la plateforme.

3.2.3 ESSAIS D'INFILTROMÉTRIE

Dans le domaine de bâtiment les essais d'infiltrométrie (ou essais de perméabilité à l'air) sont destinés à la détermination du débit de fuites dit naturel, suivant les procédures recommandées par les normes européenne EN 13829 et EN 12831 ; la première de celles-ci se sert de la mesure d'un débit d'air permettant la mise en dépression ou en surpression du bâtiment ou d'une pièce d'intérêt de celui-ci ; la seconde consiste en une mesure du taux de renouvellement de l'air pour une différence de pression de 50 Pa entre l'intérieur et l'extérieur du bâtiment (souvent dénommé n_{50}). Ces essais ont été effectués avec deux portes soufflantes, en utilisant les logiciels TECTITE Express 4.1 et TECLOG3. Ils permettent, grâce à des mesures effectuées sur plusieurs journées correspondant à différentes météorologies en termes de vents, de déterminer le coefficient \mathcal{C}_l et l'exposant n_l dans l'expression $\dot{V}_l = \mathcal{C}_l(\Delta P)^{n_l}$.

Après le traitement des résultats des essais d'infiltrométrie, les valeurs suivantes ont été obtenues pour les infiltrations : 0,08611 et 0,58 pour \mathcal{C}_l et n_l , respectivement. En employant la procédure décrite précédemment (cf. §3.2.1 et §3.2.2), les valeurs suivantes ont été obtenues pour les ouvrants en façade Sud et en shed : 0,3231 et 0,6744 pour \mathcal{C}_{shed} et \mathcal{C}_{Sud} , respectivement, et 0,5241 et 0,5251 pour n_{shed} et n_{Sud} , respectivement. Ainsi, pour les coefficients de décharge on a obtenu une moyenne de : $0,33 \pm 0,005$ et $0,44 \pm 0,01$ pour $C_{D_{shed}}$ et $C_{D_{Sud}}$, respectivement. Ces résultats seront utilisés pour compléter le modèle monozone construit sur le logiciel CONTAM détaillé dans la section suivante.

3.3 SIMULATION AÉRAULIQUE SUR CONTAM

CONTAM est un logiciel qui résout l'équation de la conservation de la masse en régime permanent, permettant ainsi la connaissance de la différence de pression et du débit d'air associé à travers chacun des ouvrants ouverts, et le débit d'air global associé d'un bâtiment. L'utilisation

de ce logiciel revêt l'intérêt de pouvoir déterminer une expression simple reliant directement les effets du vent et même du tirage thermique au taux de renouvellement de l'air.

3.3.1 PRISE EN COMPTE DES EFFETS DU VENT ET DU TIRAGE THERMIQUE

Sous CONTAM, la pression relative du vent au niveau d'une façade d'un bâtiment est calculée par l'expression suivante :

$$P = \frac{1}{2} \rho \mathcal{V}_{met}^2 C_h C_p \quad [Pa] \quad (5)$$

où \mathcal{V}_{met} fait référence à la vitesse du vent mesurée à une hauteur libre de 10 m par une station météorologique. Dans l'équation précédente, C_h est dénommé « modificateur de vitesse du vent » et correspond à un coefficient qui prend en compte les effets du terrain où le bâtiment est installé, en termes d'élévation et rugosité ; il est calculé pour chacune des façades du bâtiment, prenant en compte leurs hauteurs correspondantes (\mathcal{Z}_S) et les effets du terrain, au travers de l'expression : $C_{h_S} = A_o^2 (\mathcal{Z}_S / \mathcal{Z}_{met})^{2a}$.

Ici, A_o et a dépendent du type du terrain ; concernant les valeurs de cette paire de paramètres ($A_o ; a$), celle-ci est à choisir par l'utilisateur de CONTAM et peut prendre les valeurs suivantes : (0,35 ; 0,4) pour un terrain urbain, (0,6 ; 0,28) pour un terrain suburbain, et (1 ; 0,15) pour un terrain de type aéroport. Dans notre cas, on a choisi un couple de valeurs correspondant à un terrain de type aéroport. D'autre part, les valeurs des coefficients C_h diffèrent pour les façades Sud (0,7410) et Nord (0,8068) car celles-ci sont de hauteurs différentes.

Dans l'équation (5), le coefficient C_p est le coefficient de pression extérieure qui dépend d'un angle ϕ_{WS} correspondant à la différence entre l'angle d'incidence azimutal du vent ϕ_W et l'angle azimutal de la façade ϕ_S . Les valeurs de ce coefficient C_p sont prises dans la norme EN 1991-1-4 :2005 (Euro code 1) : 0,76 pour 0° et 360° ; -0,856 pour 90° et 270° ; et -0,42 pour 180° . Pour des angles intermédiaires, l'utilisateur à l'option de choisir entre une interpolation linéaire ou polynomiale (nous avons choisi une interpolation polynomiale).

Les effets du tirage thermique sont pris en compte dans le logiciel, en permettant de différencier la température de l'air à l'intérieur et à l'extérieur de la zone, et en permettant la variation de la masse volumique de l'air avec sa température. Toutefois, la température de l'air de chaque zone est considérée comme uniforme dans tout le volume. Ici, les valeurs de températures d'air intérieur et extérieur considérées sont issues d'une campagne de mesures.

3.3.2 REPRÉSENTATION DES INFILTRATIONS ET DES OUVRANTS DE VENTILATION NATURELLE

Le logiciel permet de choisir différents types de modèles décrivant les caractéristiques du flux d'air à travers les ouvertures. Dans notre cas, on a choisi un modèle de loi puissance avec flux unidirectionnel pour les infiltrations (de la forme de l'équation en §2.2), et un autre modèle permettant du flux bidirectionnel pour les ouvrants. Pour le modèle des infiltrations : les dimensions des orifices de fuites sont normalement petites et souvent non mesurables, ce qui rend acceptable l'hypothèse de n'admettre qu'un flux unidirectionnel ; ce choix a juste besoin des données des essais d'infiltrométrie. On a choisi de disposer ces infiltrations sur le pourtour de l'enveloppe du bâtiment, à la mi-hauteur des façades où sont disposés les ouvrants de ventilation naturelle. Pour le modèle des ouvrants : considérant le moment où T_{ia} devient supérieure à T_{oa} , ouvrir permettra à l'axe neutre (\mathcal{Z}_{NN}) de s'établir de façon à permettre du flux bidirectionnel à l'ouvrant supérieur en façade Sud (cf. fig.1, en bas à gauche), due à l'effet du tirage (Li et al., 2007). Sous cette hypothèse CONTAM limite l'exposant n_v à 0,5.

3.4 RENOUELEMENT D'AIR PAR MODÈLE THERMIQUE

Un modèle thermique a été construit dans le but d'estimer le taux de renouvellement de l'air de façon à ce que celui-ci reproduise les résultats expérimentaux en termes de température d'air intérieure et de flux convectif. Ce modèle est basé sur un bilan thermique effectué sur le volume

d'air intérieur au bâtiment, en considérant un stockage d'énergie négligeable par celui-ci ; ce bilan amène à l'expression suivante pour le taux de renouvellement de l'air ach :

$$ach = \frac{3600 [\varphi_{C_D} A_D + \varphi_{C_P} A_P + h_{C_w} A_w (T_w - T_{ia})]}{\rho_{ioa} c_{p_{ioa}} V_{ia} (T_{ia} - T_{oa})} \quad [h^{-1}] \quad (6)$$

Dans l'équation précédente, le numérateur contient trois termes correspondant aux échanges convectifs φ_C entre l'air intérieur (indice ia) et les surfaces imperméables l'entourant : la dalle (indice D), le plafond (indice P), et l'ensemble de parois autres (indice w , vitrage inclus). Au dénominateur, V_{ia} représente le volume de la pièce, l'indice ioa indique la moyenne entre l'air intérieur et extérieur, et l'indice oa correspond à l'air extérieur. Dans cette équation (6), les valeurs des grandeurs φ_{C_D} , φ_{C_P} , h_{C_w} , T_{ia} et T_{oa} sont issues de l'expérience, T_w restant ainsi la seule inconnue. De façon à déterminer l'unique inconnue de l'équation (6), c'est-à-dire la température moyenne des parois autres que le plancher et le plafond, T_w , on définit la température moyenne radiative ambiante T_{surr} incidente sur la surface de la dalle comme étant la somme pondérée des températures de surfaces environnantes (plafond, parois autres que le plafond et la dalle) (Herin, 1988) :

$$T_{surr}^4 = \mathcal{F}_{P \rightarrow D} T_P^4 + \mathcal{F}_{w \rightarrow D} T_w^4 \quad [K^4] \quad (7)$$

où $\mathcal{F}_{P \rightarrow D}$ et $\mathcal{F}_{w \rightarrow D}$ représentent respectivement les facteurs de forme entre le plafond et la dalle, et le facteur de forme entre l'ensemble des parois et la dalle. $\mathcal{F}_{P \rightarrow D}$, 0,3706, a été déterminé à l'aide d'un abaque (Çengel, 2003). La valeur de $\mathcal{F}_{w \rightarrow D}$, 0,6294, a été obtenue en utilisant les théorèmes classiques de réciprocité et de somme unitaire pour une enceinte fermée. La température T_{surr} a été mesurée à l'aide d'une caméra infrarouge. Ainsi, la température de surface moyenne T_w de l'ensemble de parois autres que la dalle et le plafond est déterminée par l'expression (7).

Des campagnes de mesures ont été effectuées pendant les périodes estivales de 2016 et 2017. Les flux thermiques ont été estimés par l'utilisation de modules Peltier, distribués dans la plateforme, revêtues avec de surfaces à émissivités contrastées (cf. fig.2), ceci à l'aide d'un modèle permettant la distinction des flux convectif et radiatif proposé par (Chen Austin et al., 2016). La stratégie de ventilation adoptée lors de ces campagnes a consisté à ouvrir les ouvrants de ventilation naturelle lorsque la valeur de T_{ia} était supérieure à T_{oa} (notamment pendant la période nocturne), les occultations solaires restant fermées en permanence.

4 RÉSULTATS ET ANALYSE

4.1 RÉSULTATS DE SIMULATIONS AÉRAULIQUES

Les résultats des simulations aérauliques, concernant l'effet du vent, sont présentés sur les figures 3 et 4. Ici, les termes \mathcal{V}_{met} , ϕ_{WS} et ach_W sont relatifs à l'effet du vent (EV), et les termes $(T_{ia} - T_{oa})/T_{oa}$ et $ach_{\Delta T}$, sont relatifs à l'effet du tirage thermique (ETT). Les résultats sont sans surprise car ils respectent la relation bien connue entre EV et ETT avec ach . Sans surprise, les valeurs de ach à ouvrants ouverts et ach à ouvrants fermés diffèrent grandement (infiltrations, zone foncée sur les figures 3 et 4).

Sur la figure 3, la variation de ach_W avec la direction relative du vent ϕ_{WS} est présentée : plus ϕ_W s'approche de l'Est ou de l'Ouest, plus ach_W diminue à cause de l'absence d'ouverture sur ces façades Est et Ouest (cf. fig.1, à droite). La valeur de ach_W diffère très peu pour des vents à direction opposée (ϕ_W à 0° ou à 180° , par exemple, ceci étant une conséquence des valeurs très proche du coefficient C_h pour les façades Sud et Nord). Toutefois, les résultats ont montré un même comportement pour différents ϕ_{WS} : une loi puissance d'exposant 1,16 (0,58 fois 2 : voir éq. 5 et éq. en §2.2) pour les infiltrations (ach_{W_l}), et d'exposant 1 pour les ouvrants (ach_{W_v}). Ces lois de puissance diffèrent selon l'angle ϕ_{WS} par un facteur multiplicateur dénommé ici β (points noirs en bas sur la figure 4). La valeur de ce coefficient β dépend de la morphologie du

bâtiment et des ouvertures, ainsi que des coefficients de pression. Ici, on a choisi de représenter la corrélation existant entre β et ϕ_{WS} par une régression de type séries de Fourier (ligne pointillée en bas sur la figure 3, à 5% près).

Les résultats concernant l'effet du tirage thermique ont été obtenus en utilisant les données de températures (T_{ia} et T_{oa}) issues des campagnes de mesures. Pour des ouvrants ouverts, $ach_{\Delta T}$ suit la corrélation $ach_{\Delta T} = 72,7|(T_{ia} - T_{oa})/T_{oa}|^{1/2}$ et pour des ouvrants fermés (infiltrations), $ach_{\Delta T}$ suit la corrélation $ach_{\Delta T} = 3,7|(T_{ia} - T_{oa})/T_{oa}|^{0,58}$. Ces facteurs sont similaires au facteur β , car ils prennent en compte la morphologie du bâtiment et des ouvertures. Ainsi, en connaissant les données météorologiques d'un site, la connaissance de ces facteurs permet dorénavant d'éviter d'avoir recours au logiciel CONTAM afin d'estimer la valeur de ach_W et de $ach_{\Delta T}$.

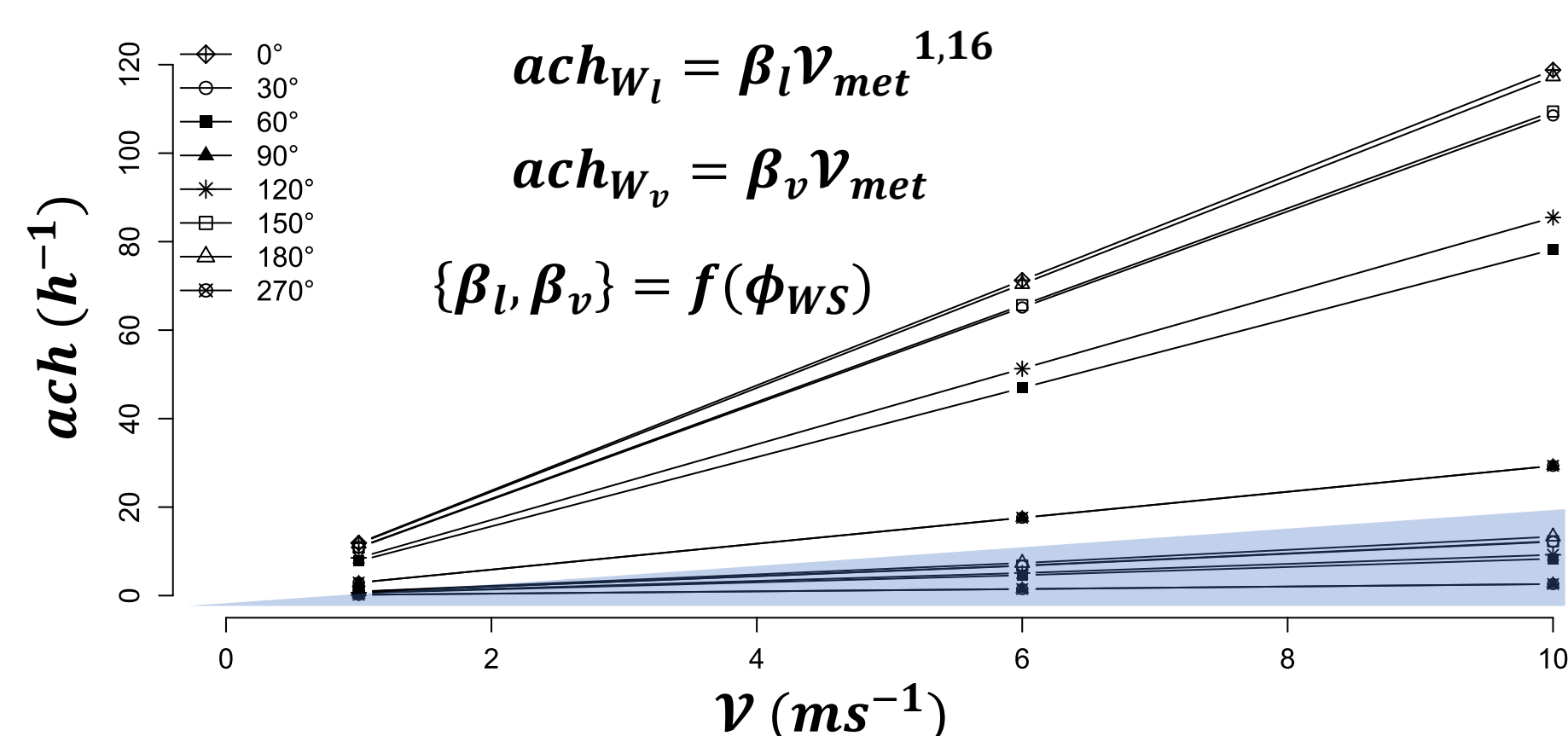


FIGURE 3. Relation entre la vitesse du vent et le taux de renouvellement d'air pour plusieurs angles azimutaux (ϕ_{WS}) : ach_{W_l} infiltrations (zone foncée) et ach_{W_v} ouvrants considérés.

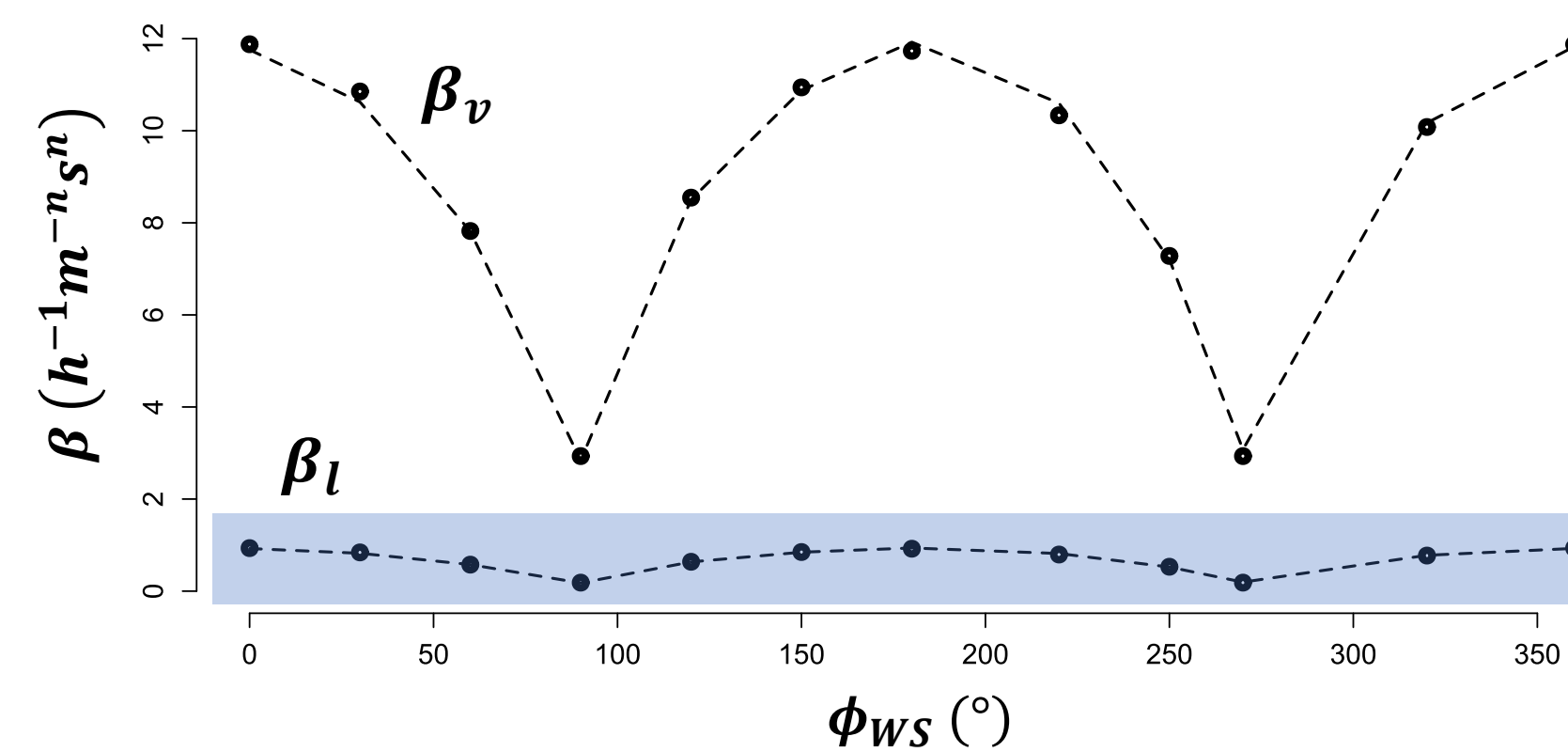


FIGURE 4. Variation du coefficient β en fonction de l'angle ϕ_{WS} (points noirs). ach_{W_l} infiltrations (zone foncée) et ach_{W_v} ouvrants considérés.

4.2 ANALYSE COMPARATIVE ENTRE LES DEUX MODÈLES

Le but de cette analyse est de comprendre séparément les effets du vent et du tirage thermique, et leurs influences sur le taux de renouvellement de l'air de la plateforme. On cherche à déterminer si un des deux effets domine sur l'autre ou le contraire. Les données utilisées pour cette analyse comparative sont ach_W et $ach_{\Delta T}$ (issus du modèle aérodynamique sous CONTAM), et le ach obtenu par calibrage du modèle thermique sur les résultats expérimentaux en température d'air intérieure (dénommé ci-après comme $ach_{(T,\varphi)}$). Ces trois grandeurs ont été estimées pour 4 journées distinctes et les résultats correspondants sont présentés sur les figures 5 et 6 ; les zones foncées représentent les périodes sur lesquelles les ouvrants sont restés ouverts. La figure 5 présente deux de ces journées (15 et 16 août 2016) durant lesquelles la météorologie était nuageuse et non venteuse la nuit, et ensoleillée et venteuse le jour. La figure 6 présente les deux autres journées (27 juillet et 17 août 2016) durant lesquelles la météorologie nocturne et diurne était nuageuse et venteuse.

Les résultats pour $ach_{(T,\varphi)}$ (trait avec petits carrés) montrent une bonne concordance avec les moments d'ouverture et de fermeture des ouvrants : des valeurs hautes sont observées dans le premier cas, en comparaison avec les valeurs observées dans le second cas. Si on observe de plus près, les figures 5 et 6, sur les périodes correspondant aux moments d'ouverture des ouvrants (zones foncées), on remarque que $ach_{(T,\varphi)}$ a un comportement proche de celui du $ach_{\Delta T}$ (trait avec petits ronds). Notons ici qu'en regard des météorologies des 4 jours concernés, un comportement de $ach_{(T,\varphi)}$ combinant $ach_{\Delta T}$ et ach_W semblerait plus plausible (convection mixte) ; ceci nous amène à suggérer que les effets du vent et du tirage thermique ont tendance à être anti-nomiques. En outre, sur les mêmes figures 5 et 6, sur les périodes correspondant aux moments de fermeture des ouvrants, on remarque que $ach_{(T,\varphi)}$ semble avoir un comportement bien proche de celui du $ach_{\Delta T}$, ce qui amène à conclure que à ces instants le renouvellement de l'air de la plateforme est une conséquence du tirage thermique uniquement, même si la météo est venteuse (la météo venteuse n'influençant a priori pas ou peu, via les infiltrations, le renouvellement d'air).

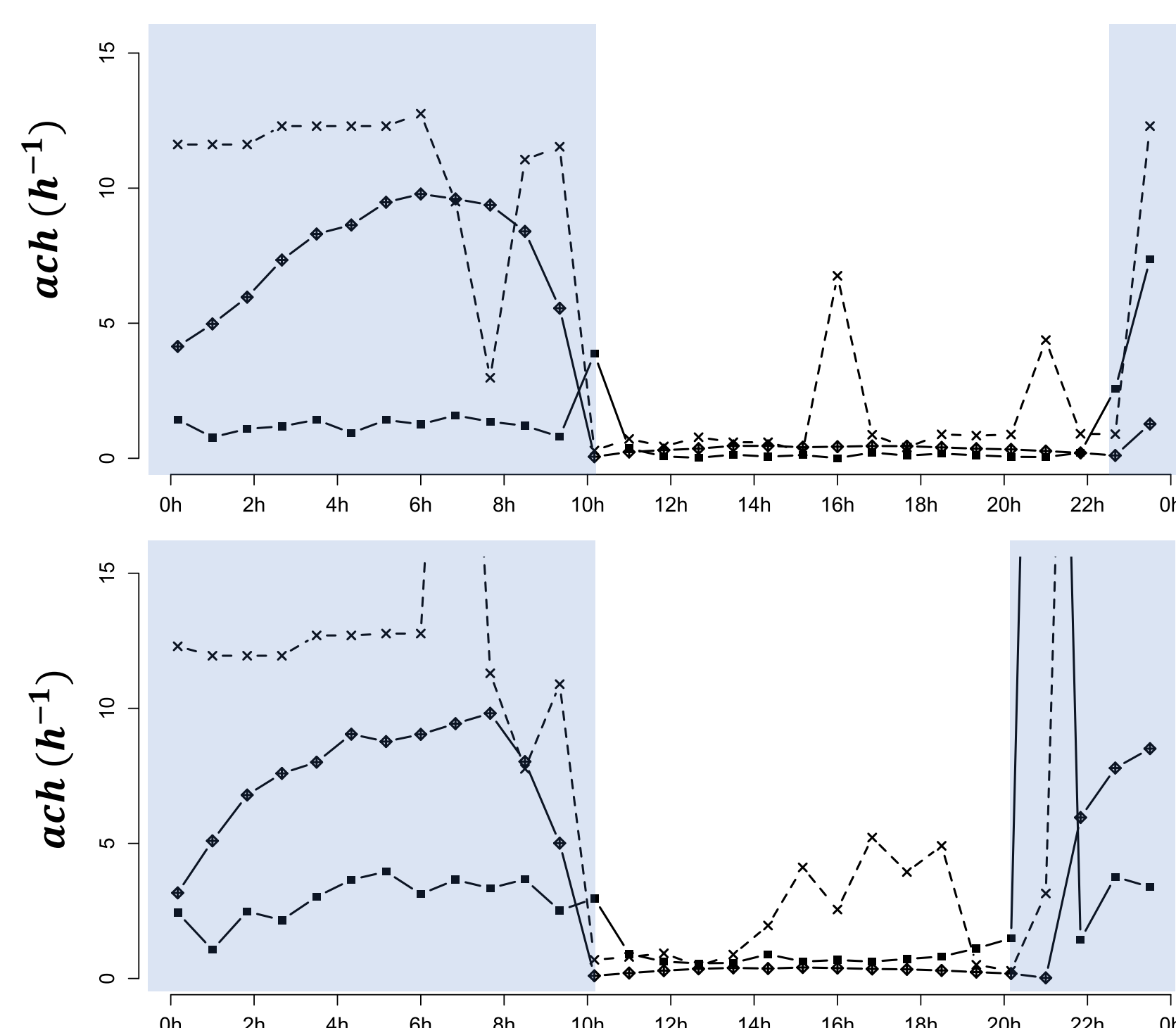


FIGURE 5. Résultats de ach_W (trait pointillé avec petites croix), $ach_{\Delta T}$ (trait avec petits ronds) et $ach_{T,\varphi}$ (trait avec petits carrés), pour les journées du 15 et 16 août 2016. Zones foncées : ouvrants ouverts.

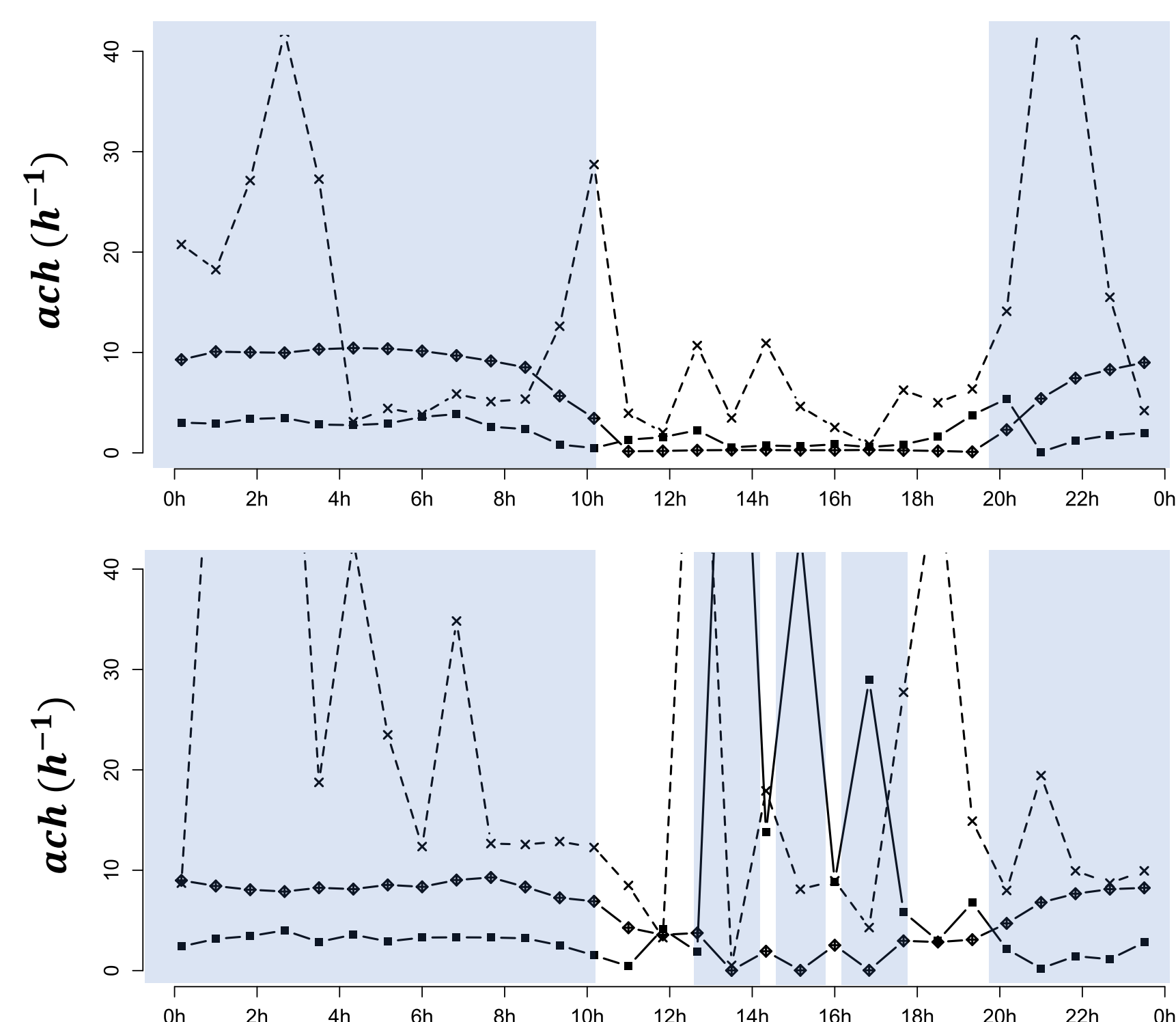


FIGURE 6. Résultats de ach_W (trait pointillé avec petites croix), $ach_{\Delta T}$ (trait avec petits ronds) et $ach_{T,\varphi}$ (trait avec petits carrés), pour les journées du 27 juillet et du 17 août 2016. Zones foncées : ouvrants ouverts.

5 CONCLUSION

Un modèle par simulation aéraulique directe sur le logiciel CONTAM et un modèle thermique renseignés à partir de mesures de flux de chaleur et de températures diverses, ont été construits dans le but (i) de comprendre, séparément, les effets du vent et du tirage thermique sur le taux de renouvellement de l'air, (ii) et de déterminer qui des deux effets domine sur l'autre pour différentes configurations d'ouverture-fermeture des ouvrants de ventilation naturelle, sous des conditions météorologiques différentes. Une analyse comparative amène à conclure que l'effet du tirage thermique domine sur l'effet du vent quand les ouvrants sont fermés, mais qu'un effet combiné semble être le plus plausible en cas d'ouverture de ces ouvrants.

RÉFÉRENCES

- Chen Austin, M., Sempey, A., Bruneau, D., Mora, L., Sommier, A., et Vogt-Wu, T. (2016). Stockage/déstockage d'énergie sensible et ventilation naturelle en bâtiment : une approche expérimentale à l'échelle 1. In *Congrès SFT 2016*.
- Ghiaus, C. et Allard, F. (2005). *Natural Ventilation in the Urban Environment : Assessment and Design*. Earthscan.
- Heiselberg, P. K., Svidt, K., et Nielsen, P. V. (2000). Windows : measurements of air flow capacity. *Indoor Environmental Engineering*, R0040(115).
- Herin, P. (1988). *Conception et caractérisation de capteurs de flux radiatif et convectif : application aux mesures « in situ »*. PhD thesis. Université de Lille Flandres Artois.
- Krzaczek, M., Florczuk, J., et Tejchman, J. (2015). Field investigations of stack ventilation in a residential building with multiple chimneys and tilted window in cold climate. *Energy and Buildings*, 103 :48 – 61.
- Li, R., Pitts, A., et Li, Y. (2007). Buoyancy-driven natural ventilation of a room with large openings. In *IBPSA 2007 : Building Simulation*.
- Çengel, Y. A. (2003). *Heat Transfer : A Practical Approach*. McGraw-Hill.

Développement d'une approche performantielle de la qualité de l'air - Impact d'une prise en compte fine des distributions de perméabilité à l'air externe et interne sur la modélisation multizone d'une maison basse consommation

Hugo Geoffroy*¹, Gaëlle Guyot^{1,2}, Michel Ondarts¹, Evelyne Gonze¹, Monika Woloszyn¹

¹ Univ. Grenoble-Alpes, Univ. Savoie Mont Blanc, CNRS, LOCIE,
73 000 Chambéry, France.

² Cerema Direction Centre-Est,
46 rue St Théobald, F-38080, L'Isle d'Abeau, France.

*hugo.geoffroy@univ-smb.fr

RESUME. Cet article propose d'étudier l'impact de la distribution de la perméabilité à l'air d'enveloppe et des parois intérieures, sur la performance en qualité de l'air intérieur (QAI) obtenue. Il repose sur les prémices d'une approche performantielle mettant en œuvre le formaldéhyde avec trois niveaux d'émission (faible, moyenne, élevée). Cette approche utilise la modélisation multizone (CONTAM) et comme indicateurs de performance, la concentration moyenne par pièce ainsi que le pourcentage de temps de dépassement de la valeur limite (ELV) de $9 \mu\text{g.m}^{-3}$. Ce travail a permis de mettre en évidence que l'ELV était largement dépassée pour les scénarios d'émission élevées et moyens, que ce soit pour la ventilation double-flux ou la ventilation simple-flux auto-réglable, respectant les débits réglementaires. Et ce, dans respectivement 100% et 90% du temps en double-flux et 100% en simple-flux. L'impact de distributions fines de la perméabilité à l'air sur les concentrations est plus important en simple-flux qu'en double-flux (resp. 52% et 18% d'écart maximal entre les différentes distributions).

MOTS-CLÉS : modélisation multizone, qualité de l'air intérieur, perméabilité à l'air

ABSTRACT. This article proposes to study the impact of envelope and internal partition walls airleakage distributions, on the indoor air quality (IAQ) performance. It is based on a preliminary performance-based approach using formaldehyde with three emission levels (low, medium, high). This multizone modelling (CONTAM) approach uses as performance indicators, the average concentration per room as well as the percentage of time of exceeding the limit value (ELV) of $9 \mu\text{g.m}^{-3}$. This work allowed to highlight that the ELV was largely exceeded for the high and medium emission scenarios, whether for balanced ventilation or exhaust-only ventilation, complying with the regulatory flow rates. And this, respectively in 100% and 90% of the time for balanced ventilation, and 100% for exhaust-only ventilation. Impacts on concentrations of detailed external and internal airleakage distributions are higher with exhaust-only ventilation than with balanced ventilation (52% and 18% of maximal variation between the different distributions, respectively).

KEYWORDS: multizone modelling, indoor air quality, airleakage

1. INTRODUCTION

Adequate air change rates are necessary in order to ensure a good indoor air quality, including a proper humidity level in buildings. On the other side, building energy performance requires to rethink the ventilation and the air change rates, because of their impact on thermal losses. In this context, envelope airtightness treatment becomes crucial, especially for low energy dwellings. Indeed, envelope air leakage entails thermal losses, but also modifies theoretical voluntary airflows circuits in building.

The present paper is a part of a PhD thesis developing a performance-based approach for ventilation in low-energy dwellings, integrating indoor air quality. Such an approach implies a more precise quantification of airflows in the dwellings, and between the rooms, in order to avoid global and/or local situations with high pollutant or humidity levels. As airtightness is recognized as an essential issue for low energy dwellings, it is nowadays often included in energy-performance (EP) calculations, often through single zone models with uniform air leakage. Because more consideration is often given to energy performance than to indoor air quality issues, air leakage through internal partitions is often disregarded. Thus, additional studies are needed to check these current assumptions. Therefore, in the present study impact of air leakage through building envelope and through internal partitions on inside formaldehyde concentrations has been investigated.

2. METHODS

2.1. STUDIED HOUSE

The studied building is a 2 stories-low-energy brick house equipped with a balanced ventilation system, located near Chambéry, France. A measurement campaign was conducted in order to quantify and finely describe envelope and internal partitions airleakage (Gaëlle Guyot et al. 2016). Envelope airtightness is $n_{50}=1.5 \text{ h}^{-1}$ (1) and internal partitions were measured as rather airtight, with a median value of $q_{50}=0.8 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}.\text{m}^{-2}$, (2).

$$n_{50} = \frac{C_L * (50)^n}{V} \quad (1)$$

$$q_{50} = \frac{C_L * (50)^n}{A} \quad (2)$$

Where C_L is the airleakage coefficient [$\text{m}^3.\text{h}^{-1}.\text{Pa}^{-n}$]; n is the airflow exponent [-]; A is the area of the measured wall [m^2]; 50 is a 50Pa reference pressure difference across the building envelope or across the measured wall, V is the building heated volume [m^3].

2.2. MODELLING STUDY

Formaldehyde concentrations were investigated using numerical modelling with CONTAM software (Walton et Emmerich 1994). We used a multizone model for the dwelling (each room is one zone), with a 1h time step and over the heating season duration (from October 15th to April 14th), with meteorological data of a typical year in Lyon (ASHRAE IWEC Weather file, 2001). The wind at the building is calculated from the weather data using a 0.3287 modifier factor, resulting from a power law used with factors from a suburban area and a 8.5 m-elevation of the house. The pressure coefficients from the EN 15242 (CEN 2007) are used, supposing no barrier, i.e +0.5 on the upwind

facades and -0.7 on the downwind facades. The inside temperature is supposed to be 20°C during the heating period.

2.3. AIRLEAKAGE DISTRIBUTION

Four cases of detail in modelling airleakage were simulated and compared: airtight envelope (case a), evenly distributed envelope airleakage (case b), non-evenly envelope airleakage (case c) and non-evenly external and internal airleakage (case d). With case a, we calculate airflows due to mechanical ventilation only. Cases b, c and d use experimental data on airleakage performed on this low energy house.

In order to further study, the impact of internal partition airleakage, we defined and compared four other cases taking into account measured values and input values proposed in (Guyot et al., 2016) for heavy and wood structures.

Cases	Envelope airtightness	Internal partition walls airleakage
Case a (theoretical)	without	without
Case b	Evenly distributed	without
Case c	Non evenly distributed	without
Case d	Non evenly distributed (measured on the heavy structure house)	Non evenly distributed (measured on the heavy structure house)
Case d2	Non evenly distributed (measured on the heavy structure house)	Non evenly distributed (Input values from Guyot et al 2016) for a heavy structure: $q_{50, median} = 1,2$ $m^3.m^{-2}.h^{-1}$ Inter quartile range (q_{50}) = $3 m^3.m^{-2}.h^{-1}$
Case d3	Non evenly distributed (measured on the heavy structure house)	Non evenly distributed (measured on a wood structure house)
Case d4	Non evenly distributed (measured on the heavy structure house)	Non evenly distributed (Input values from Guyot et al 2016) for a wood structure: $q_{50, median} = 6$ $m^3.m^{-2}.h^{-1}$ Inter quartile range (q_{50}) = $12 m^3.m^{-2}.h^{-1}$

Table a: Description of airleakage distributions cases, from Guyot et al., 2016.

2.4. VENTILATION SYSTEM

The ventilation system is supposed to provide regulatory airflows: 135 m³/h for a 6 rooms-house, with 2 bathrooms (30 m³/h) and 2 toilets (15 m³/h). This accounts for a dwelling air change rate (ACR) of 0.4 h⁻¹. Regulation requires that kitchen exhaust should be able to switch from a base speed of 45 m³/h to a peak speed of 135 m³/h. We studied two types of constant airflow ventilation: exhaust-only and balanced ventilation. Extract airflows are the same in both cases. With balanced ventilation, each bedroom is equipped with a supply vent providing 19,3 m³/h, the living room with two. With exhaust-only ventilation, this seven supply vents are replaced by self-regulating trickle vents with a 22 m³.h⁻¹ module.

2.5. OCCUPATION SCENARII

We used data from the French national campaign on IAQ of dwellings from 2005 (Zeghnoun, Dor, et Grégoire 2010). In the present study, we used the following occupation scenarii for the 5 occupants.

Occupant	In living-room + open kitchen	In bathroom	In bedroom
N°1 and 2 (bedroom 1)	7h-8h30 12h-14h 19h-21h (5h30-duration)	6h20-7h (bathroom n°2)	21h-6h20 (9h20 duration)
N°3 (bedroom 2)	6h20-8h30 12h-14h 19h-20h20 (5h30-duration)	20h20-21h (bathroom n°2)	21h-6h20 (9h20 duration)
N°4 (bedroom 3)	6h20-8h30 12h-14h 19h-19h40 20h20-21h (5h30-duration)	19h40-20h20 (bathroom n°2)	21h-6h20 (9h20 duration)
N°5 (bedroom 4)	6h20-8h30 12h-14h 19h-20h20 (5h30-duration)	20h20-21h (bathroom n°1)	21h-6h20 (9h20 duration)

Table b: Occupancy schedules.

2.6. FORMALDEHYDE EMISSION SCENARII

Formaldehyde (HCHO) is a common VOC interesting to survey in dwellings for many reasons. Firstly, this pollutant is nearly always measured in homes (100% of the French dwellings), and it's also a quasi-only inside production (until 10 times superior than the outside) due to huge quantity of indoor emitting materials, furniture and products (Kirchner et al. 2006). Secondly, this substance is recognized as having a large range of health impacts, depending on the concentration and the acute and chronic exposures (AFSSET 2007; CIRC 2006; INERIS 2010). As a result, several studies identified formaldehyde among the pollutant of concerns in dwellings (Kirchner et al. 2007; Koistinen et al. 2008; WHO 2010; Logue et al. 2011a; Borsboom et al. 2016).

Emission rates measured directly at the dwelling scale are rarely found in the literature (Hodgson et al., 2000; Sherman and Hodgson, 2002), and especially in low-energy dwellings considered as representative of the French dwellings. We proposed to use a simplified method, based on a mass balance (3) to calculate formaldehyde average emission rates adapted from (Hodgson et al. 2000; Sherman et Hodgson 2002), using measurements campaign from the (G. Guyot et al. 2017), as further described in (Geoffroy 2017). We defined a low-emission class: 4,5 $\mu\text{g}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$; a middle-emission class: 12,0 $\mu\text{g}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$; and a high-emission class: 23,6 $\mu\text{g}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$. Then, we used a continuously emitting model for formaldehyde emission.

$$V \cdot \frac{dC}{dt} = C_{ext} \cdot Q_{log} + g - C_{int} \cdot Q_{log} \quad (3)$$

Where V is the volume of the room [m^3]; $\frac{dC}{dt}$ is the variation of concentration over the time [$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{s}^{-1}$]; C_{int} is the interior concentration [$\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$]; C_{ext} is the exterior concentration [$\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$]; Q_{log} is the ventilation volume airflow [$\text{m}^3\cdot\text{s}^{-2}$], and g is the generation rate [$\mu\text{g}\cdot\text{s}^{-1}$].

2.7. IAQ METRICS USING FORMALDEHYDE

In this study, we focused on long-term exposure, because of the lack of data at the building scale on rates for short-term emissions. We decided to use the reference exposure limit value (ELV) set to the minimum one used through the world, i.e. $9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ for formaldehyde (USA-California) as proposed by (Cony Renaud Salis et al. 2017). We selected also as performance metrics related to formaldehyde: average concentration, ratio between average concentration and ELV and percentage of time with concentration over the ELV. They were calculated in each zone of the dwelling over the heating period.

3. RESULTS

3.1. EXHAUST-ONLY VENTILATION

We plotted the average formaldehyde concentration in each zone of the house obtained with the highest formaldehyde emission rate, for the four levels of detailed airleakage data (cases a, b, c and d, *Figure 1*) and for the four levels of internal partition airleakage (cases d, d2, d3 and d4, *Figure 2*). The house accounts for four bedrooms (BR), two bathrooms (Bath), two toilets (WC), a mezzanine (Mezz), an open kitchen on living room (K+LR) and a hall.

Whatever the case, the concentration stays in the range $17,3\text{-}36,6 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, thus $1,9\text{-}4,1$ times the ELV, exceeding it during more than 99,9% of the time.

Taking into account envelope airleakage accounts for a maximal 50,0% difference (case b/ case a). Taking into account a non-evenly distributed airleakage accounts for a maximal 52,4% difference (case c/case b). Taking into account internal partitions airleakage accounts for a maximal 3,0% (case d/case c). This impact can be stronger with higher values of airleakage, with a maximum difference of 19,9% (Hall), and higher than 16,5% in BR1 and BR4 (*Figure 2*).

For the medium formaldehyde emission, average concentrations are in the range $10,2\text{-}19,9 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. i.e. between 1,1 and 2,2 times the ELV, exceeding it more than 99% of the time.

For the minimum formaldehyde emission, average concentrations are in the range $5,6\text{-}9,25 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, thus $0,6\text{-}1,03$ times the ELV. This exceeding average concentration occurs only in the WC2 in the d2 case and in BR1 in the d3 case. Depending the studied cases, Bath2, WC2, BR1 and Mezz are zones with concentrations over the ELV more than 30% of the time, even if their average concentration is below the ELV. We can also notice than only in the case d3, a bedroom (BR1) concentration is higher than the ELV, but 70% of the time. For cases d, d2 and d4, the average concentration in BR1 is $8,4 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, with an exceeding time of respectively 0,04;0,24;3,6 %.

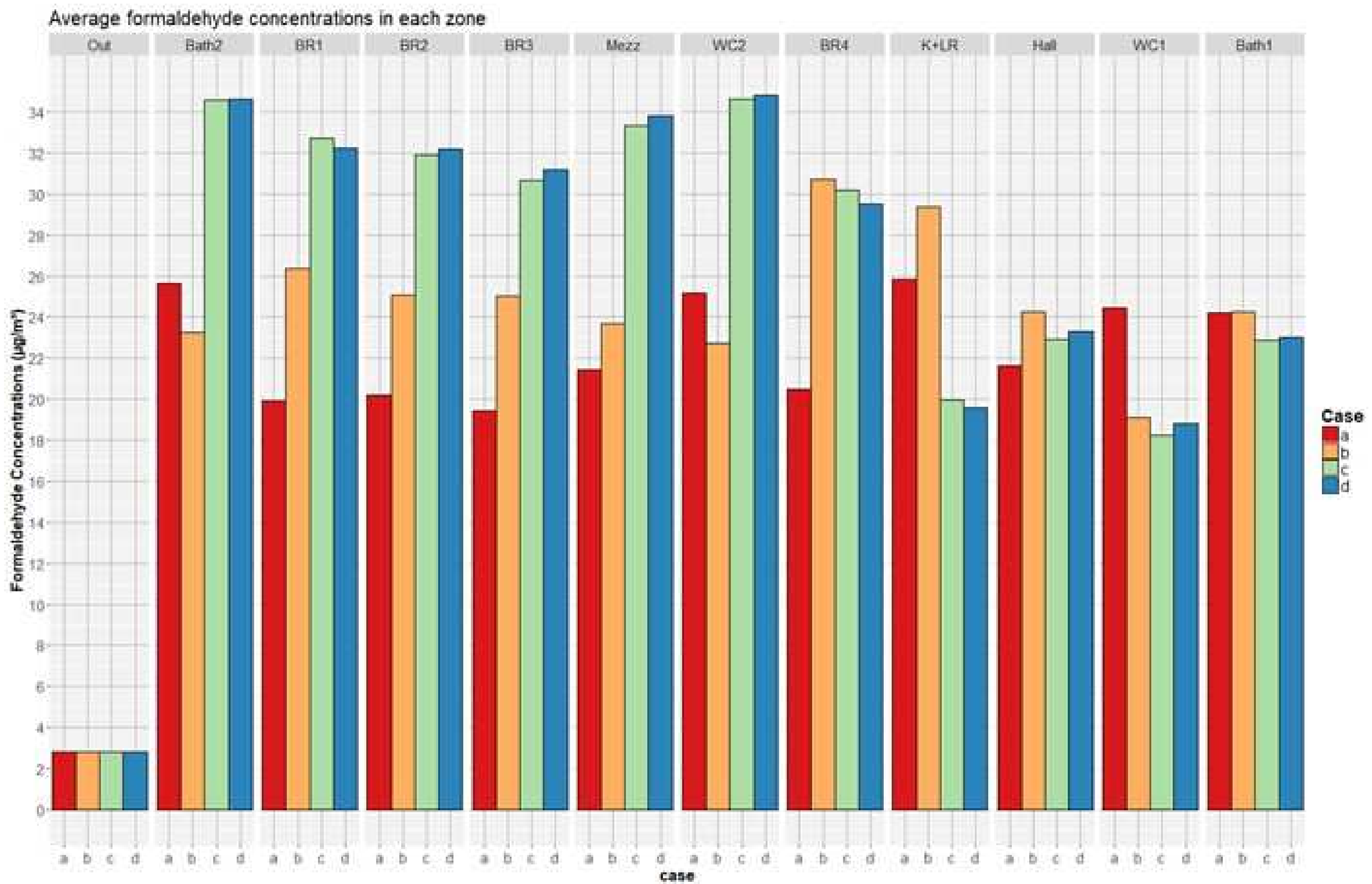


Figure 1: Impact of detailed airleakage data - strongest emission – exhaust-only ventilation

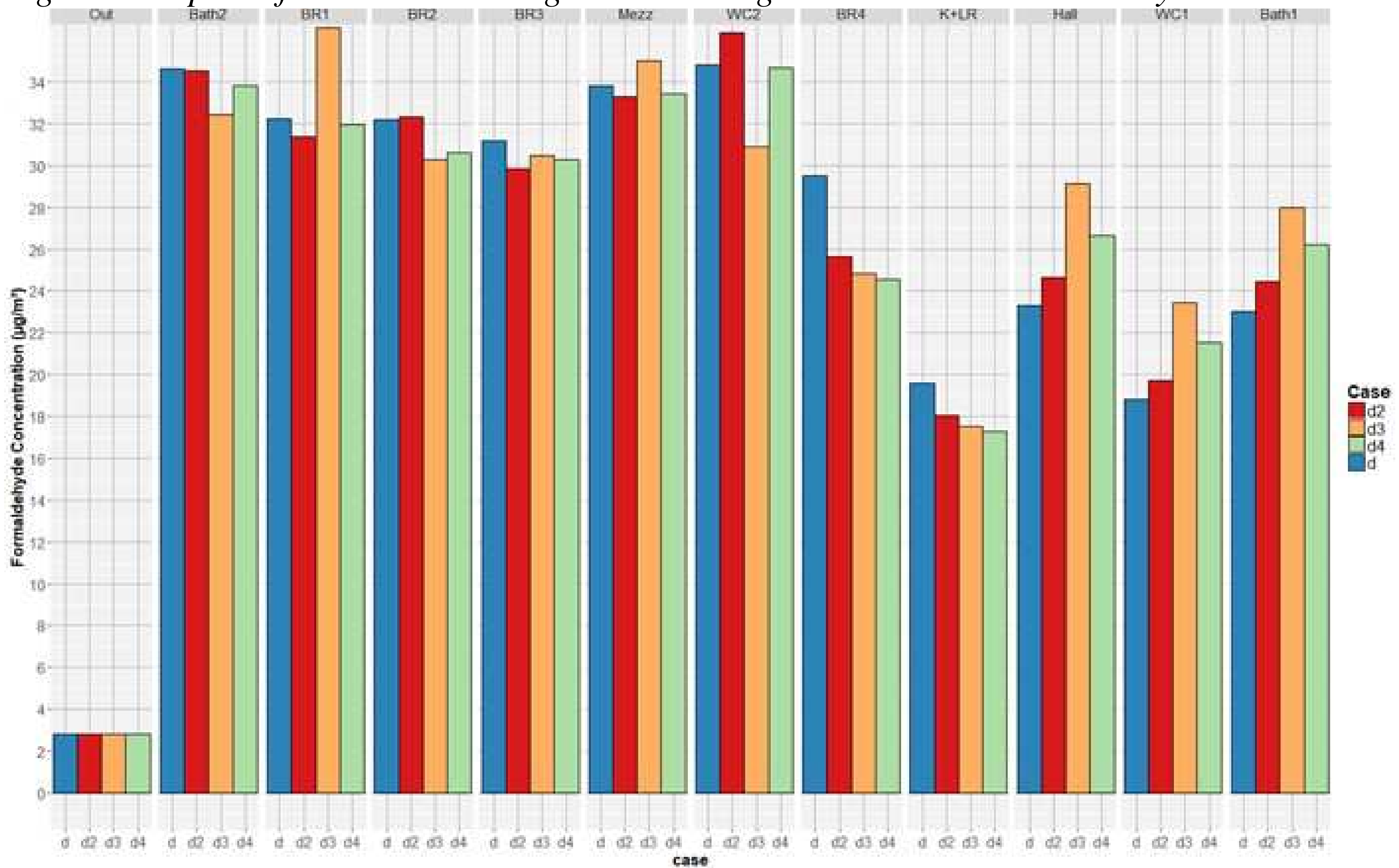


Figure 2: Impact of internal partition airleakage - strongest emission – exhaust-only ventilation

3.2. BALANCED VENTILATION

For the highest emission the concentration is in the range 17,1-26,9 µg.m⁻³, thus 1,9-3,0 higher than the ELV, during more than 99,9% of the time.

Taking into account a detailed airleakage distribution accounts for a maximal 17,6% difference (case b/ case a), a maximal 5,8% difference (case c/case b), a maximal 1,4% (case d/case c). Impact of

internal partition airleakage can be slightly stronger with higher values of airleakage (cases d2, d3 and d4), with a maximum difference of 3,4%.

For the medium formaldehyde emission, average concentrations are in the range 10,1-15,0 $\mu\text{g.m}^{-3}$, thus 1,1-1,7 higher than the ELV, exceeding it more than 90% of the time.

For the minimum formaldehyde emission, average concentrations are in the range 5,5-7,4 $\mu\text{g.m}^{-3}$, thus 0,6-0,8 times the ELV. The concentration stays under the ELV in every rooms 100% of the time.

4. DISCUSSION

Results analysis shows firstly that whatever the case and whatever the ventilation system, average formaldehyde concentrations are higher than the selected threshold of 9 $\mu\text{g.m}^{-3}$, except for the lower emission rate of 4,5 $\mu\text{g.h}^{-1}.\text{m}^{-2}$. We must here specify that the French regulatory threshold is higher: 30 $\mu\text{g.m}^{-3}$ since January 2015, but must become 10 $\mu\text{g.m}^{-3}$ in 2023. Moreover, emission rates have been here estimated on a little sample including only 10 houses. Performing the calculation on a larger sample could lead to different emission rates and thus different results.

We also observe that balanced ventilation gives lower concentrations than the equivalent exhaust-only ventilation providing the same exhaust airflow of 135 $\text{m}^3.\text{h}^{-1}$. For instance, for the lower emission rate, ELV is never exceeded with the balanced ventilation whereas it is exceeded in four zones more than 30% of the time with the exhaust-only ventilation, including a room for 70% of the time. We can outline here that such a ventilation system is never used on new French low-energy house. Instead, humidity demand-controlled exhaust-only ventilation is used, performing around 30% lower ventilation rates.

In this studied house, we can also observe that using a non-evenly distributed envelope airtightness can have a strong impact (up to 52%) on formaldehyde concentrations with an exhaust-only ventilation but also an impact (up to 18%) with balanced ventilation. With an exhaust-only ventilation system, impacts of using internal partitions airleakage can reach 20%. With a balanced ventilation impact is very light (up to 3%), because of the lower pressure differences between zones. This suggests also that impact of modelling doors undercut might be light with such a ventilation system, since we can get the same order of magnitude in size of the path between an undercut and a leak on internal partition (Gaëlle Guyot et al. 2016).

5. CONCLUSION AND PERSPECTIVES

We studied impacts of a detailed envelope airleakage distribution and of internal partition airleakage data on the ventilation performance of a low-energy house. We used a multizone modelling approach performed with three levels of emissions (4,5-12,0 and 23,6 9 $\mu\text{g.m}^{-3}$), to calculate IAQ metrics based on formaldehyde. The selected metrics are average concentration in each zone, ratio with the limit value (ELV) of 9 $\mu\text{g.m}^{-3}$, and time of exceeding concentration. We studied two types of ventilation: exhaust-only and balanced ventilation, providing the total regulatory airflow of 135 $\text{m}^3.\text{h}^{-1}$ required for this house.

We showed that formaldehyde concentrations were rarely under the ELV, except for the lower emission scenario with the balanced ventilation system.

This seems relevant to use detailed data on envelope airtightness. Indeed, gaps on average formaldehyde concentrations can reach 52% with exhaust-only ventilation and 18% with the equivalent balanced ventilation. Taking into account detailed data on internal partitions airleakage

seems worthwhile with an exhaust-only ventilation system but non useful with balanced ventilation systems.

Such results must be confirmed with the on-going modelling study on other metrics based on formaldehyde (including the exposure) and other parameters (PM_{2,5}, humidity, CO₂).

As a general perspective, we need to get more emission rates in the literature on formaldehyde but also on other pollutants of concern as particle matter, at a house scale.

6. REFERENCES

- AFSSET. 2007. « Valeurs guides de qualité d'air intérieur - Le formaldéhyde ». <https://www.anses.fr/fr/system/files/AIR2004etVG002Ra.pdf>.
- Borsboom, W., W. De Gids, J. Logue, M. Sherman, et P. Wargocki. 2016. « TN 68: Residential Ventilation and Health ». AIVC Technical Note 68. http://www.aivc.org/sites/default/files/TN68_Heath%26Ventilation.pdf.
- CIRC. 2006. « Formaldehyde - Summary of Data Reported and Evaluation ». <http://monographs.iarc.fr/ENG/Monographs/vol88/mono88-6E.pdf>.
- Cony Renaud Salis, Louis, Marc Abadie, Pawel Wargocki, et Carsten Rode. 2017. « Towards the Definition of Indicators for Assessment of Indoor Air Quality and Energy Performance in Low-Energy Residential Buildings ». *Energy and Buildings* 152 (octobre): 492-502. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.07.054>.
- Geoffroy, H. 2017. « Vers une meilleure prise en compte de la qualité de l'air intérieur et de la santé dans les logements basse consommation: Développement d'une approche performantielle de la ventilation ». Mémoire de fin d'étude du MASTER II GI3ER. Université La Rochelle.
- Guyot, G., A. Bailly, Anne-Marie Bernard, Gabrielle Perez, Claire-Sophie Coeudevez, Suzanne Déoux, S. Berlin, et al. 2017. « Ventilation performance and indoor air pollutants diagnosis in 21 French low energy homes ». *International Journal of Ventilation*.
- Guyot, Gaëlle, Jérémy Ferlay, Evelyne Gonze, Monika Woloszyn, Pierre Planet, et Thibaud Bello. 2016. « Multizone air leakage measurements and interactions with ventilation flows in low-energy homes ». *Building and Environment* 107 (octobre): 52-63. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.07.014>.
- Hodgson et al. 2000. « Volatile Organic Compound Concentrations and Emission Rates in New Manufactured and Site-Built Houses ». <http://cyber.sci-hub.cc/MTAuMTAzNC9qLjE2MDAtMDY2OC4yMDAwLjAxMDAwMzE3OC54/hodgson2000.pdf>.
- INERIS. 2010. « Formaldehyde ». <http://www.ineris.fr/substances/fr/substance/getDocument/2791>.
- Kirchner, Séverine, et al. 2006. « Observatoire de la qualité de l'air intérieur - Campagne nationale Logements - Etat de la qualité de l'air dans les logements français ». Rapport final. CSTB.
- . 2007. « État de la qualité de l'air dans les logements français ». *Environnement, Risques & Santé* Vol. 6 (4): 11 p.
- Koistinen, K., D. Kotzias, S. Kephelopoulos, C. Schlitt, P. Carrer, M. Jantunen, S. Kirchner, et al. 2008. « The INDEX Project: Executive Summary of a European Union Project on Indoor Air Pollutants ». *Allergy* 63 (7): 810–819. <https://doi.org/10.1111/j.1398-9995.2008.01740.x>.
- Logue, J. M., T. E. McKone, M. H. Sherman, et B. C. Singer. 2011a. « Hazard Assessment of Chemical Air Contaminants Measured in Residences ». *Indoor Air* 21 (2): 92-109. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2010.00683.x>.
- Sherman, M. H., et A. T. Hodgson. 2002. « Formaldehyde as a basis for residential ventilation rates ». *Lawrence Berkeley National Laboratory*, avril. <http://escholarship.org/uc/item/2mm48667#page-2>.
- Walton, G N, et S J Emmerich. 1994. « CONTAM93: a multizone airflow and contaminant dispersal model with a graphic user interface ». *Air Infiltration Review* 16.
- WHO. 2010. « WHO Guidelines for indoor air quality : selected pollutants ». Bonn, Germany: World Health Organization Regional Office for Europe. http://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0009/128169/e94535.pdf.
- Zeghnoun, Abdelkrim, Frédéric Dor, et A. Grégoire. 2010. « Description du budget espace-temps et estimation de l'exposition de la population française dans son logement ». *Institut de veille sanitaire-Observatoire de la qualité de l'air intérieur*. Disponible sur: www.air-interieur.org. http://www.oqai.fr/userdata/documents/298_InVS_OQAI_BET_Logements_2010_Internet.pdf.

Modulation du taux de renouvellement de l'air en milieu intérieur : approche multicritère par logique floue conciliant efficacité énergétique et qualité de l'air intérieur.

Blaise Raybaud*^{1,2}, Franck Alessi¹, Aurélie Fouquier¹

¹ Univ Grenoble Alpes, CEA, LITEN, DTS, INES, F-38000 Grenoble, France

² INSA Toulouse, Option Génie Mathématiques et Modélisation (GMM)

adresse de l'entité,

*blaise.raybaud@cea.fr

RESUME. L'étanchéité des nouveaux bâtiments, pour limiter les fuites thermiques, a généré une détérioration de la Qualité de l'Air Intérieur (QAI). Les techniques actuelles de ventilation mécanique se font principalement à l'aide d'un ventilateur fonctionnant de manière permanente à régime constant. Bon nombre d'études montrent que ces stratégies de ventilation ne permettent pas d'allier efficacité énergétique et qualité de l'air intérieur. Les concentrations en polluants, nocifs pour la santé des occupants, dépassent alors régulièrement les seuils sanitaires conseillés. Les méthodes de modulations de la ventilation, telles que l'Hygro-B ou Demand Control Ventilation, s'avèrent également incomplètes pour atteindre ces objectifs. Nos travaux présentent une méthode efficace, basée sur une approche multicritère, confrontant les concentrations de plusieurs polluants tels que le dioxyde de carbone, le formaldéhyde, ou encore les composés organiques volatiles totaux. Dans ce cadre, un algorithme reposant sur la théorie de la logique floue a permis de concilier parallèlement les objectifs d'efficacité énergétique et la qualité de l'air intérieur. Par ailleurs, un troisième objectif visant à limiter le nombre d'intermittences dans le fonctionnement du ventilateur est pris en compte dans l'algorithme de pilotage de la ventilation mécanique. Il s'agit ici de préserver le mécanisme de ventilation d'une usure prématurée ainsi que de limiter les nuisances sonores dans l'habitat. Sur un autre aspect, notre étude montre également qu'une ventilation présentant des phases d'arrêt temporaire ne va pas nécessairement à l'encontre d'une bonne QAI et permet d'améliorer l'efficacité énergétique liée à la ventilation.

MOTS-CLÉS : Qualité de l'Air Intérieur (QAI), Efficacité Energétique (EE), Ventilation mécanique.

ABSTRACT. In cold and temperate climates, buildings are more and more insulated and their airtightness increases a lot. However, whereas those aspects are extremely beneficial in terms of energy efficiency, they affect a lot the indoor air quality (IAQ). Recently, sanitary problems emerge and weaken both the occupant and the building health. One potential solution to improve the IAQ consists in controlling the mechanical ventilation regarding pollutants measures. Nevertheless, whereas the regulation of some ventilation systems occurs according to the CO₂ concentration or the humidity, it remains quite rare to control the ventilation on different IAQ criteria. Moreover, ventilation strategies focused on IAQ considerations are unpopular by the fact that they are associated to a greater energy consumption. A mechanical ventilation strategy driven by several IAQ criteria (TVOC, formaldehyde and CO₂) while taking into account energy performance aspects is proposed here. A simple rule based algorithm has been tested in a numerical environment. However, despite a proven efficiency of the system considering all IAQ indicators and the energy feature, a material limitation appeared with the resulting fan intermittency of the rule based strategy. In order to overcome this issue, one has proposed a second ventilation algorithm based on a mathematical approach called "fuzzy logic". Tested in a numerical environment and compared with the rule-based algorithm, the fuzzy logic strategy allows to reduce drastically the fan intermittency while maintaining the ventilation performance considering all IAQ and energy efficiency aspects. Following this design numerical phase, the objective of this work is to deploy the solution at scale one, in an experimental dwelling.

KEYWORDS : Indoor Air Quality (IAQ), Energy Efficiency (EE), mechanical ventilation (HVAC)

1. INTRODUCTION

Les nouveaux bâtiments étant de plus en plus étanches afin de limiter les pertes thermiques, cela a entraîné une diminution du taux de renouvellement d'air par transfert naturel. Les concentrations en

polluants ont augmenté à l'intérieur des bâtiments (Dassonville, Mandin et Kirchner 2014). Ces concentrations élevées sont problématiques de par les risques sanitaires qu'elles présentent à l'occupant. Des méthodes pour préserver la Qualité de l'Air Intérieur (QAI) ont alors vues le jour. Les stratégies par ventilation mécanique ou naturelle font partis des méthodes principalement utilisées (Abdul Afram 2014). La ventilation mécanique est aujourd'hui la stratégie majoritairement utilisée, adoptée en France avec un débit compris entre 0,3 et 0,5 vol.h⁻¹ (CSTB 2014). Cependant, si ces stratégies permettent de conserver une bonne efficacité énergétique du bâtiment, elles ne permettent pas de garantir un niveau de QAI suffisant (Foucquier, et al. 2017). Plusieurs stratégies plus élaborées, en particulier à partir de mesures de concentration de CO₂ (Alexander, et al. 2015) ont été mises au point et testées pour subvenir à ce manque. Les résultats obtenus restent toutefois insuffisants car ces méthodes ne proposent pas un pilotage de la ventilation sur des indicateurs recouvrant la globalité de la QAI, mais restent limitées à un indicateur d'occupation (Figure 1 et Figure 2). Une stratégie complémentaire est donc de regarder la concentration en CO₂ couplée à au moins un autre polluant révélateur du niveau de QAI dans le bâtiment. Cependant, les sources et natures physiques de pollution dans le bâtiment sont diverses, (Dassonville, Mandin et Kirchner 2014). Certaines récentes études (Foucquier, et al. 2017) ont montrées la nécessité de piloter la ventilation à partir d'au moins deux indicateurs, un portant sur l'occupation (le CO₂) et un autre ciblant la pollution non associée à l'occupation. Dans cette étude nous avons fait le choix de cibler la pollution chimique. L'indicateur COVT (Composés Organiques Volatils Totaux) est apparu comme l'indicateur le plus judicieux pour répondre à nos besoins car il permet une quantification globale de la pollution chimique dans le bâtiment, indépendamment de sa source. Cela permet de dissocier la ventilation associée à l'aspect sanitaire de la ventilation associée à l'aspect préservation du bâtiment.

L'épuration de l'air intérieur se fait par un apport d'air frais extérieur, qui, si c'est le cas, n'est que rarement modulé sur un autre critère que le CO₂. Une régulation simultanée sur différents critères de QAI sans négliger la préservation énergétique (Arefeh, Jonn Are et Sture 2015) du bâtiment est encore plus rare, bien que récemment des études aient abordé la problématique (Foucquier, et al. 2017).

La publication d'Adam Rackes (Adams 2014) présente par exemple une stratégie de pilotage de la ventilation sur une journée, effectuée à partir de mesures effectuées à la fois sur le CO₂ et sur les COVT. Cette stratégie de pilotage comprend également un objectif énergétique en cherchant à limiter les consommations énergétiques liées à la ventilation. De la même façon, C.Y.H. Chao et J.S. Hu (C.Y.H. Chao 2003) ont mené des essais expérimentaux, dans un amphithéâtre chinois, de pilotage de la ventilation à partir de mesures CO₂, et de radon (ce dernier étant un COV)¹. Cependant, les stratégies de pilotage de ventilation à partir de critères QAI restent impopulaires car idéologiquement associées à une augmentation du besoin énergétique. C'est pourquoi notre étude considère un objectif énergétique à respecter. Dans une étude précédente (Foucquier, et al. 2017), des résultats satisfaisants avaient été obtenus conciliant QAI et efficacité énergétique. Cependant, le grand nombre d'intermittences observées a fait craindre une usure prématurée du matériel et un inconfort, notamment sonore, pour l'occupant. Un troisième objectif visant à limiter ce nombre d'intermittences est donc considéré ici.

1. SIMULATIONS DE L'ENERGETIQUE DU BATIMENT

Le logiciel EnergyPlus a été choisi pour modéliser le comportement d'une maison individuelle sur une période donnée. Le modèle aéraulique dans le bâtiment n'est pas modélisé. Il est couplé à un logiciel

¹ COV : Composé Organique Volatil

de calculs mathématiques, Matlab, dans lequel est implémenté la stratégie de ventilation testée. EnergyPlus permet de modéliser dans l'habitat l'émission en CO₂ mais aussi un autre polluant au choix, dont les propriétés d'émissions sont à spécifier, puis de suivre leurs évolutions en concentration. Le logiciel propose notamment de prendre en compte la composition matérielle des murs dans le modèle de diffusion des polluants, ce qui présente le désavantage d'impliquer un grand nombre de données difficilement récupérables. Il est alors plus simple de modéliser l'émission des polluants par émission constante dans chaque pièce. Cette méthode présente l'avantage de ne nécessiter que peu de données et un temps de calcul moins important. Nous avons donc fait le choix de ce modèle pour la suite de l'étude. La Figure 1 et la Figure 2 présentent une évolution des concentrations en CO₂ et COVT lorsque l'on effectue un pilotage tout ou rien uniquement sur la concentration en CO₂ (Figure 1) ou sur les COVT (Figure 2).

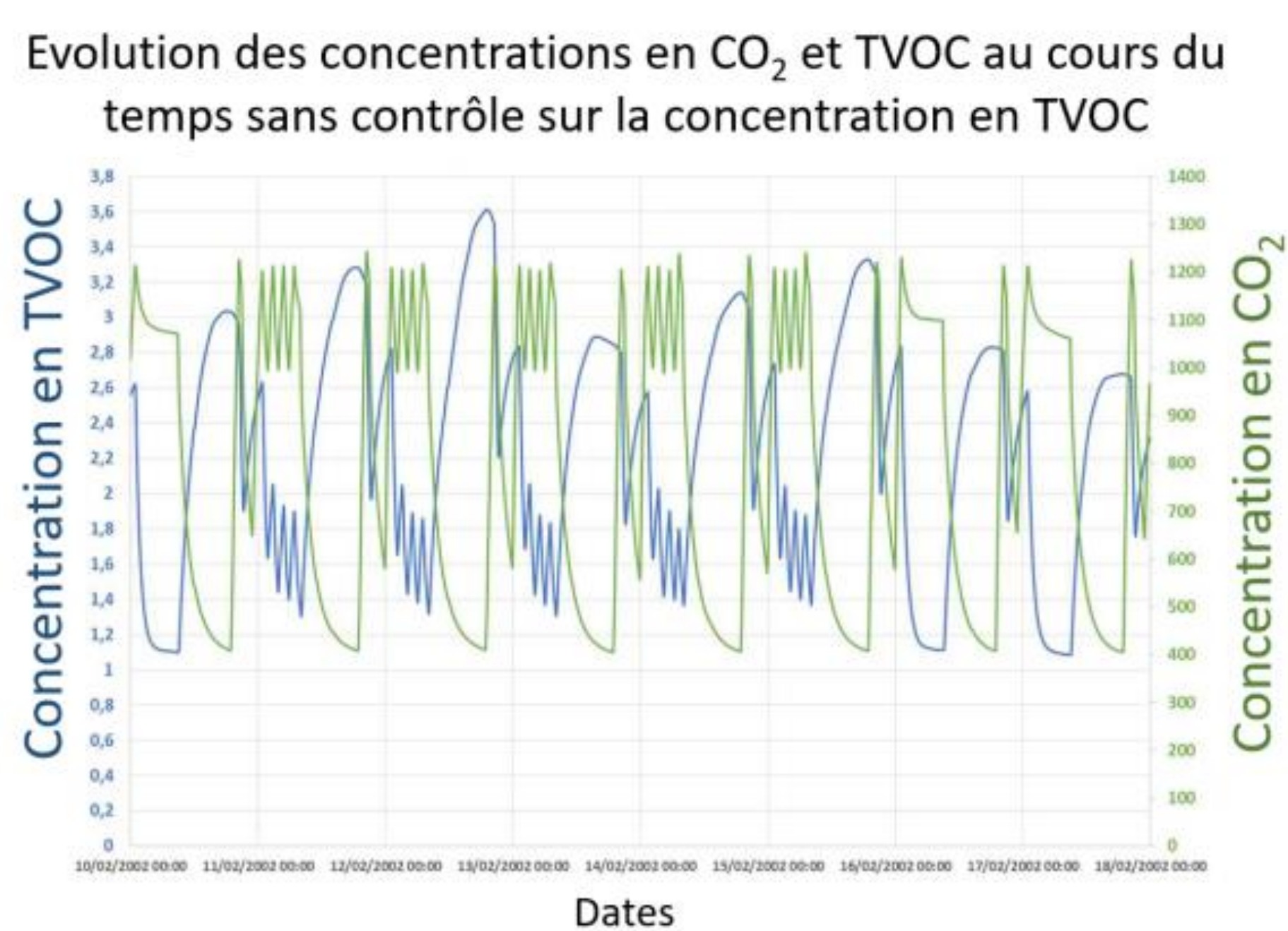


Figure 1

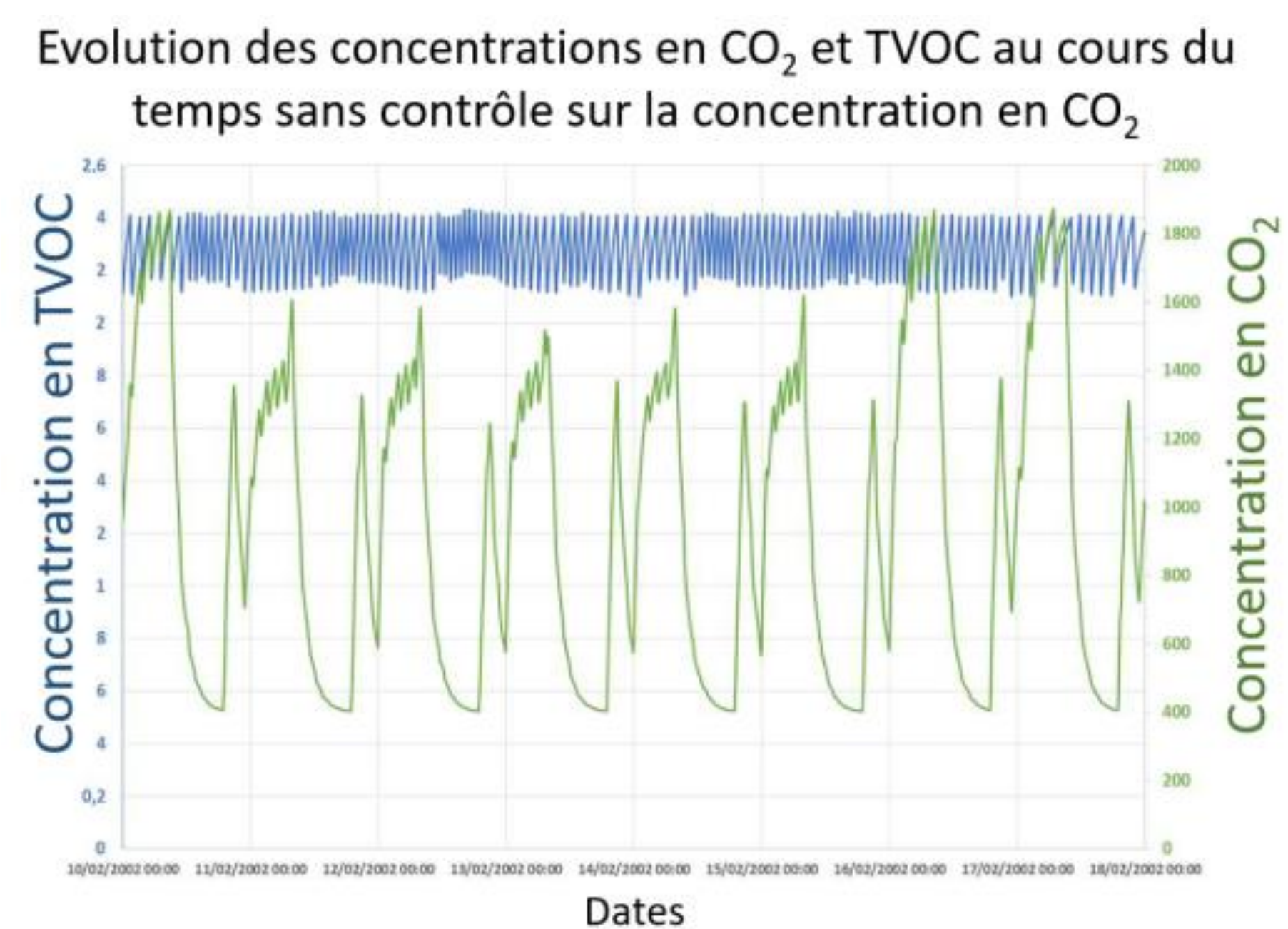


Figure 2

Ces résultats montrent tout l'intérêt d'un pilotage effectué simultanément sur plusieurs polluants. Ni le pilotage effectué à partir d'un unique contrôle sur les COVT (Figure 2) ni celui effectué à partir d'un unique contrôle sur le CO₂ (Figure 1) ne permettent de maintenir la QAI sous des critères sanitaires donnés. L'impossibilité de coder directement un tel algorithme dans EnergyPlus justifie le choix de faire appel à un logiciel de calcul qui permet d'obtenir et d'injecter à chaque pas de temps de la simulation, à l'aide d'un protocole de communication, le débit calculé dans EnergyPlus. La plateforme de communication développée par DOE (Department Of Energy) appelée BCVTB (Building Control Virtual Test Bed) est utilisée (Figure 3).

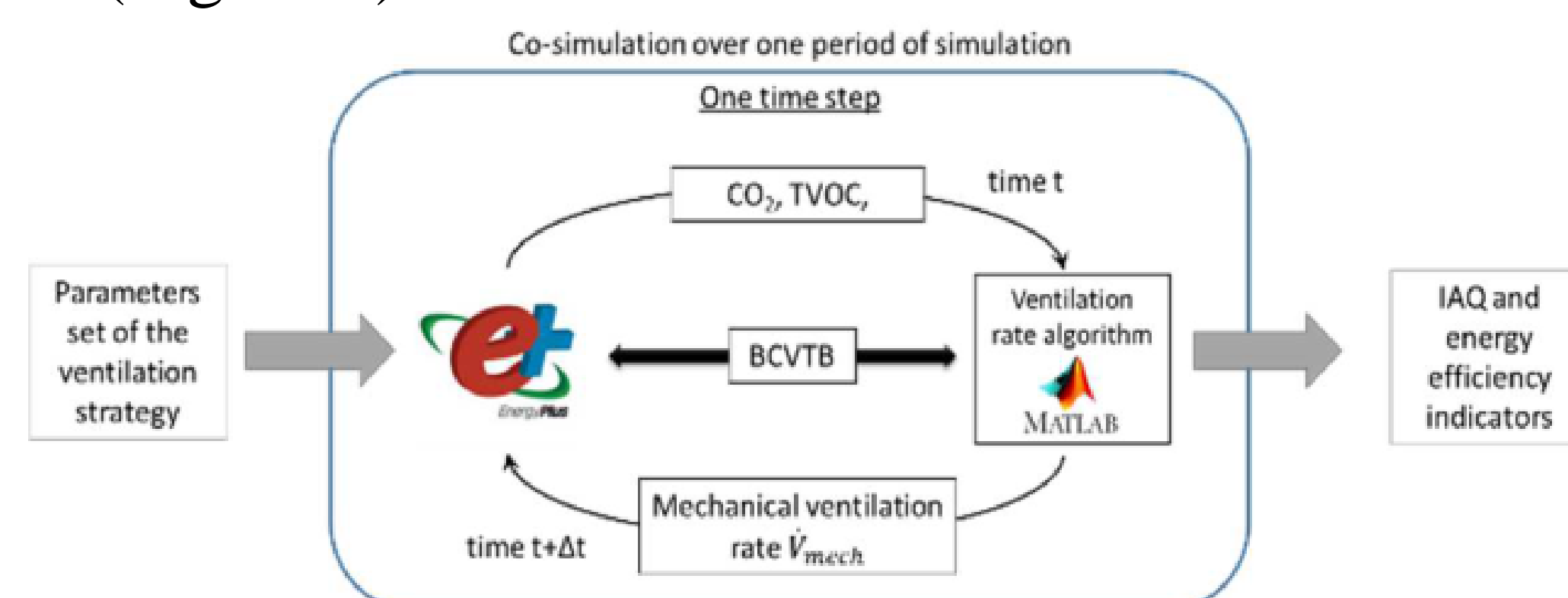


Figure 3 : Schéma de la méthodologie de co-simulation.

Le bâtiment étudié correspond à une maison plain-pied de 100m² composée de 8 pièces, à haute efficacité énergétique. L'étude se focalise plus particulièrement sur une chambre individuelle de 10m², comportant deux murs bien isolés et des façades orientées sud et ouest. Les simulations sont effectuées sur le mois de février afin de générer une demande en chauffage. Le pas de temps est de 1min. Le climat de Bordeaux a fait l'objet de cette étude. Le taux d'émission de CO₂ choisi est de 20L/personne/heure (ANSI/ASHRAE 2007), le planning d'occupation dans la chambre étant fourni Figure 4.

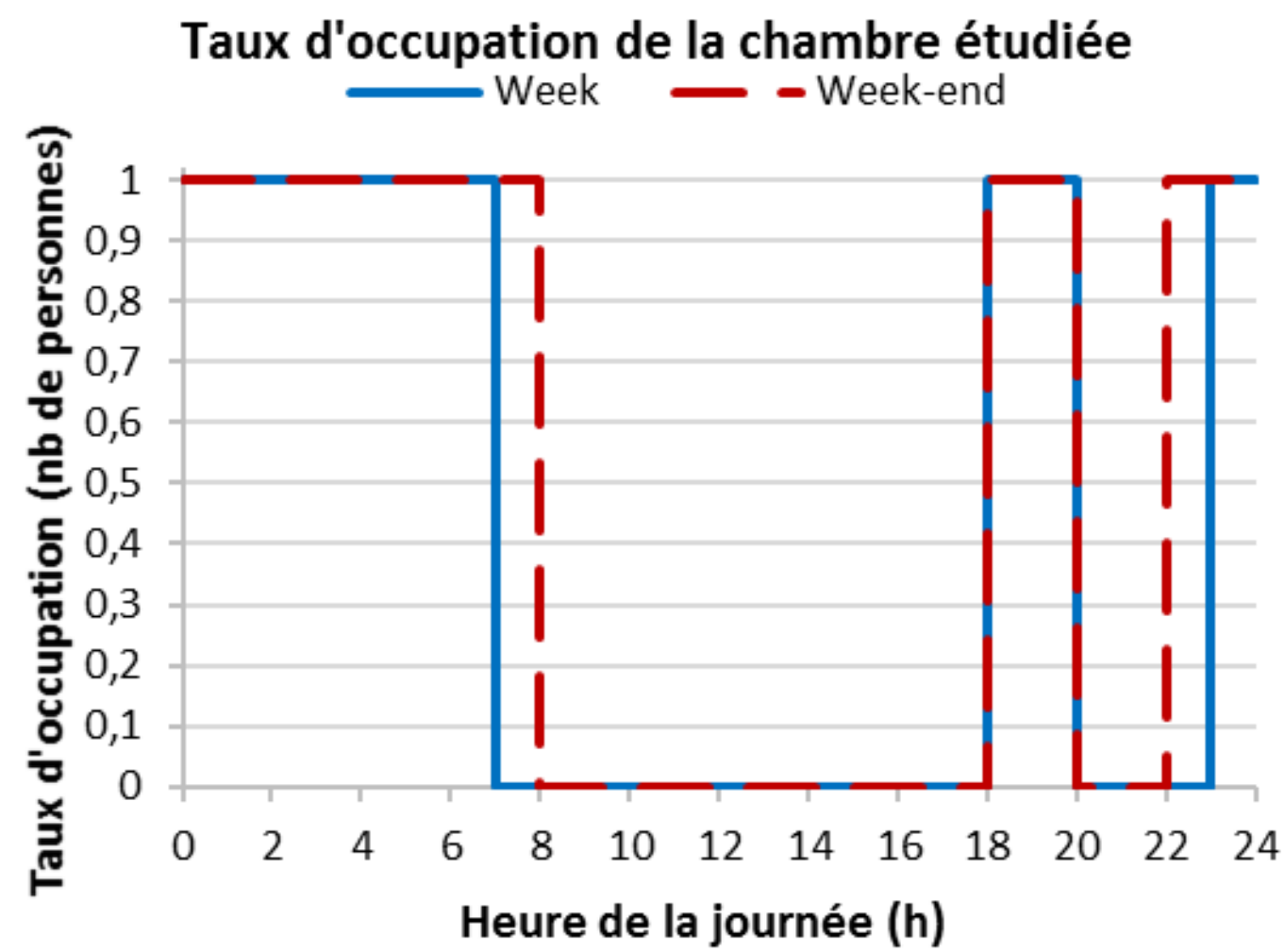


Figure 4

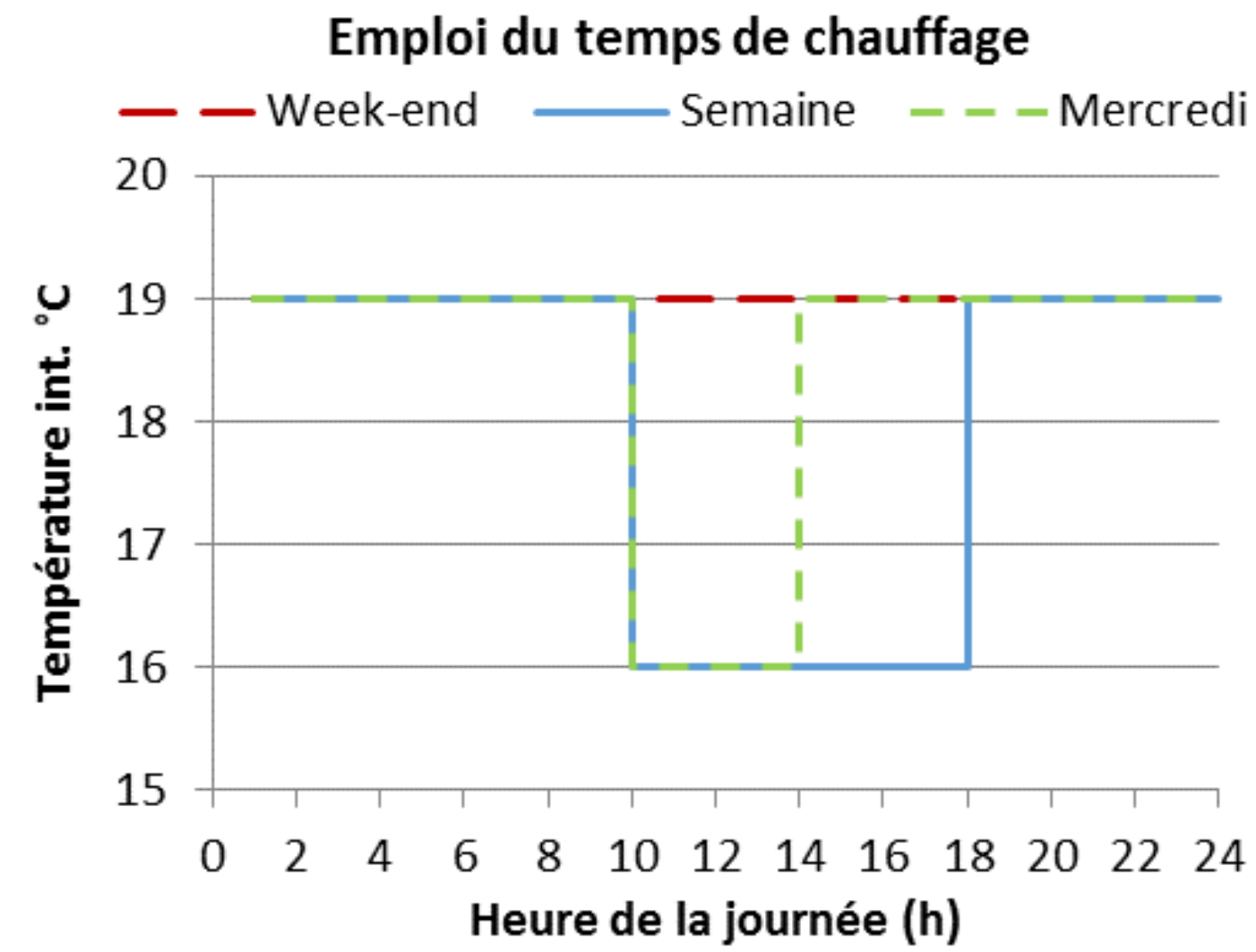


Figure 5

Concernant le taux d'émission en COVT, il est directement issu de la catégorie A+ des logements français et est fixé à $1250 \mu\text{g}/\text{m}^2/\text{h}$ pour les plafonds et sols et à $500 \mu\text{g}/\text{m}^2/\text{h}$ pour les murs (Journal officiel de la République française du 13 Mai 2011 2011). L'émission en COVT est choisie constante au cours du temps dans l'ensemble des pièces de la maison. Un des objectifs étant l'évaluation énergétique du système de ventilation, la consommation électrique liée au chauffage est également calculée. Les radiateurs sont choisis électriques et les températures de consignes fixées selon le planning présenté Figure 5. Les ventilateurs utilisés sont choisis particulièrement performants et on suppose qu'ils permettent de moduler le débit de ventilation entre 0 et 1 vol/h. Pour chaque polluant, la ventilation sera modulée à partir d'un critère sanitaire. On fixe ces derniers à 1200 ppm pour le CO_2 et à 2,4 ppm pour les COVT (Sabah Ahmed Abdul-Wahab 2015).

2. L'ALGORITHME DE PILOTAGE DE LA VENTILATION

L'algorithme utilise une méthode de régulation par logique floue, régulièrement utilisée comme moyen de régulation dans le bâtiment (Pervez Hamed Shaikh 2014). Les variables d'entrées sont des mesures de concentrations effectuées sur chaque polluant étudié, la variable de sortie correspond au débit d'air entrant idéal à chaque pas de temps. La méthode de régulation s'inspire du cahier technique rédigé par Schneider (F. Chevrier 1998). A chaque polluant i est attribué un nombre Nb_{appart}^i de fonctions d'appartenances. Chacune de ces fonctions d'appartenance est associée à une « gamme » de concentration pour un polluant et sert à quantifier l'influence de ce dernier sur le débit résultant final. On note $\mu_{i,j}$ la fonction d'appartenance associée à la $j^{\text{ème}}$ gamme de concentration du $i^{\text{ème}}$ polluant. De la même façon, on attribue un nombre $Nb_{appart}^{\text{débit}}$ de fonctions d'appartenance au débit, qui serviront à construire, via une méthode de barycentre, le débit final (Figure 6). La fonction d'appartenance associée à la $j^{\text{ème}}$ gamme de ventilation est notée ϕ_j . Par soucis de simplification, nous considérerons que tous les polluants possèdent le même nombre de gamme de concentration et que chacune de ces gammes est associée à une gamme de ventilation. Dans le cadre de l'étude, afin de conserver suffisamment de généralité sans avoir recours à de grands temps de calculs, on fixera le nombre de gamme de concentration et de ventilation à 3. La gamme de concentration élevée est alors associée à un débit d'air élevé. Il en est de même pour les autres gammes. Le profil des fonctions d'appartenance associées aux variables d'entrées, ici les concentrations, doit respecter la propriété 1 afin de respecter l'équiprobabilité entre les différentes concentrations.

Propriété 1 : Soit E_i l'espace auquel appartient la $i^{\text{ème}}$ variable du problème :

$$\forall i \in [1, 2], \forall x \in E_i, \sum_{j=1}^3 \mu_{i,j}(x) = 1 \quad (1)$$

Dans un souci de simplicité sans perte d'information, le profil des fonctions d'appartenance a été choisi linéaire par morceaux. On définit un seuil de déclenchement de la ventilation, noté $Seuil_{inf}$, associé à la concentration à partir de laquelle le système de ventilation se met en fonctionnement. De la même façon, un seuil de ventilation maximale, noté $Seuil_{sup}$, est établi et est associé à la concentration à partir de laquelle le débit d'air entrant est maximal. Pour l'ensemble des polluants, chaque fonction d'appartenance associée à une gamme de concentration est utilisée pour calculer un degré d'appartenance. Lorsque l'on effectue une mesure de concentration pour un polluant, ce degré d'appartenance noté v , compris entre 0 et 1, permet de quantifier la répartition de cette concentration sur les 3 gammes de concentrations définies. Pour chaque gamme de ventilation, le degré d'appartenance maximal de l'ensemble des polluants est retenu (Figure 6). En effet, on considère que le degré d'appartenance le plus important est le plus représentatif de l'état d'au moins un polluant dans chaque gamme de concentration. Les degrés d'appartenances obtenus sont ensuite projetés sur les fonctions d'appartenance du débit associées. On ne retient que l'aire située sous le profil de la fonction d'appartenance tronquée par le degré d'appartenance. On procède enfin à un calcul de barycentre (Figure 7) grâce aux aires ainsi obtenues. Dans une ultime étape, le débit ainsi obtenu est corrigé afin d'être calculé entre 0 et 1 vol.^{h-1} et ainsi optimiser la capacité du ventilateur.

Exemple : Les Figure 6 et 7 peuvent se résumer par l'exemple suivant : une mesure en concentration est effectuée sur le CO₂ et est projetée sur les fonctions d'appartenance correspondantes à ce polluant. Il en est de même pour les TVOC. Pour chacune des gammes de ventilation, la valeur maximale des projections entre polluants est retenue. Cette valeur est projetée sur la fonction d'appartenance de débit associée, et ceux pour chaque gamme de débit. A partir de ces projections, le débit final est reconstruit par principe de centre de gravité. Chacune de ces fonctions d'appartenance est ainsi associée à une « gamme » de ventilation.

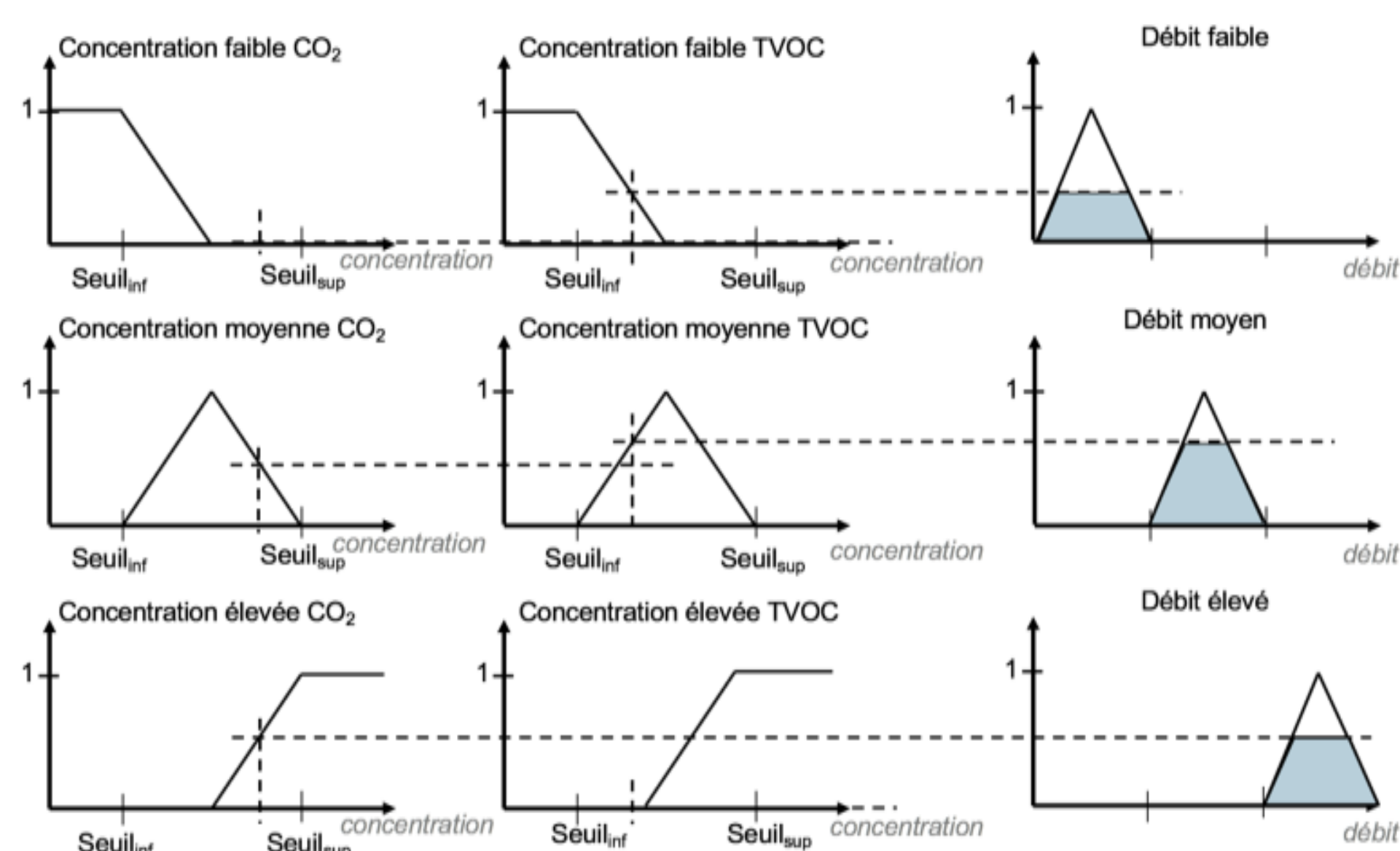


Figure 6 : Méthode de calcul et de projection des degrés d'appartenance sur les fonctions d'appartenances de débit afin d'en retenir les aires associées.

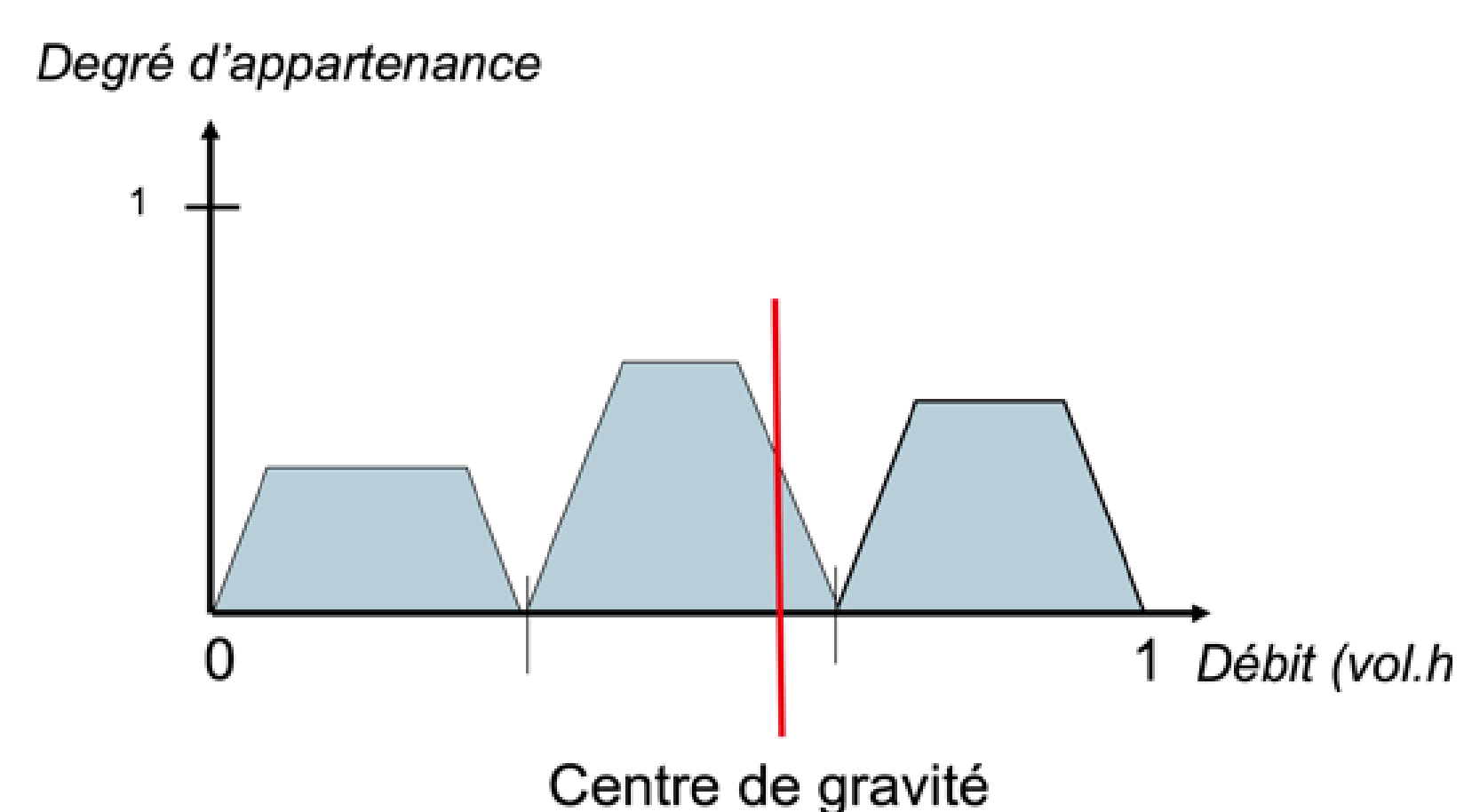


Figure 7 : Calcul du centre de gravité à partir des aires obtenues.

3. INDICATEURS UTILISES

Pour chacun des objectifs visés, un indicateur a dû être défini. Par manque de temps, ces indicateurs ont été défini arbitrairement via une expertise des résultats obtenus. Pour plus de généralités, ils portent sur l'ensemble du bâtiment et non uniquement sur la pièce étudiée. Ces indicateurs ont également été utilisés lors de l'optimisation des paramètres de l'algorithme.

3.1 INDICATEUR QAI

L'indicateur QAI doit permettre de fournir une évaluation de la QAI sur l'ensemble de la période étudiée, transformant une donnée temporelle en une donnée scalaire. Il est calculé en deux temps. Dans un premier temps, une pondération pour chacune des valeurs des concentrations relevées est calculée :

$$polluant_{pond} = \max\{C_{pol} - Cr_{pol}, 0\} / Cr_{pol} \quad (2)$$

Avec C_{pol} la concentration du polluant considéré et Cr_{pol} le critère sanitaire qui lui est associé. On calcul ensuite un niveau de QAI pour chaque polluant dans le bâtiment :

$$QAI_{pol} = ((C_{pol} * P_{pol} / Cr_{pol}) / N(C_{pol} * P_{pol} / Cr_{pol})) / Nb_{zone} \quad (3)$$

où $N(X)$ désigne la taille du vecteur X , P_{pol} la pondération alloué au polluant. Cette pondération a pour but de valoriser un polluant par rapport à un autre. Ici, elle est prise à 1 pour les TVOC comme pour le CO_2 .

L'indicateur final du niveau de QAI est ensuite calculé comme la moyenne du niveau de QAI de chaque polluant (Equation 7) multiplié par 100 pour ramener l'indicateur à un pourcentage. L'indicateur QAI s'exprime alors en pourcentage, bien qu'il puisse excéder 100%. Plus cet indicateur est faible, plus la QAI mesurée est de bonne qualité.

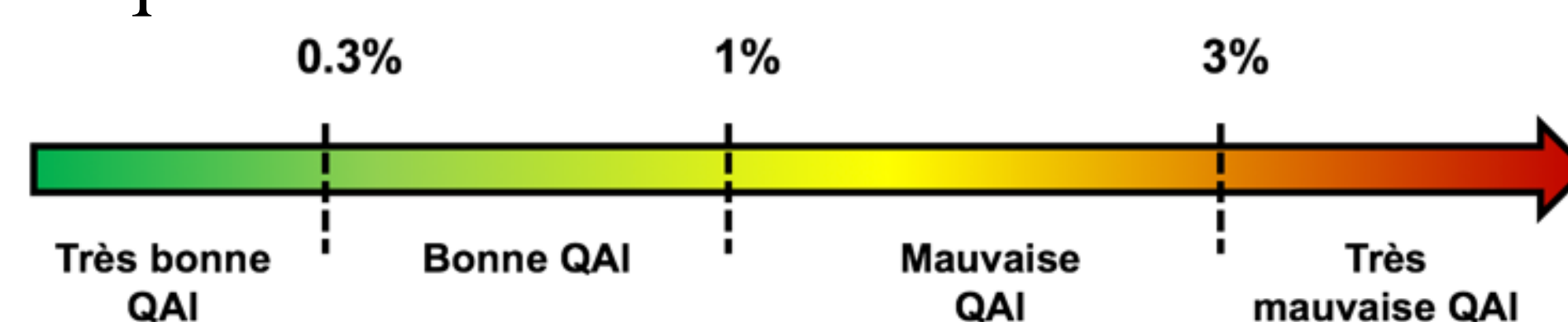


Figure 8 : Echelle représentative de la QAI arbitraire en fonction de la valeur prise par l'indicateur QAI.

3.2 INDICATEUR D'EFFICACITE ENERGETIQUE

L'efficacité énergétique évaluée à chaque simulation correspond essentiellement au besoin de chauffage dans l'ensemble du bâtiment. En effet, l'apport d'air frais par la ventilation influence le besoin en chauffage. La consommation des ventilateurs est calculée mais s'avère négligeable en comparaison au besoin de chauffage, en raison de la haute efficacité énergétique de ces derniers.



Figure 9 : Echelle représentative d'un niveau d'efficacité énergétique arbitraire en fonction de la valeur prise par l'indicateur du même nom.

3.3 INDICATEUR DE LISSAGE

La gestion des intermittences de la ventilation permet de prévenir de l'inconfort sonore et d'une usure prématurée du système de ventilation. Une quantification des intermittences et de leur amplitude est calculée via une transformée de Fourier effectuée sur le profil de débit final obtenu. Plus exactement, l'indicateur de lissage s'apparente à l'intégral du spectre fréquentiel obtenu par FFT².

² FFT : Fast Fourier Transform

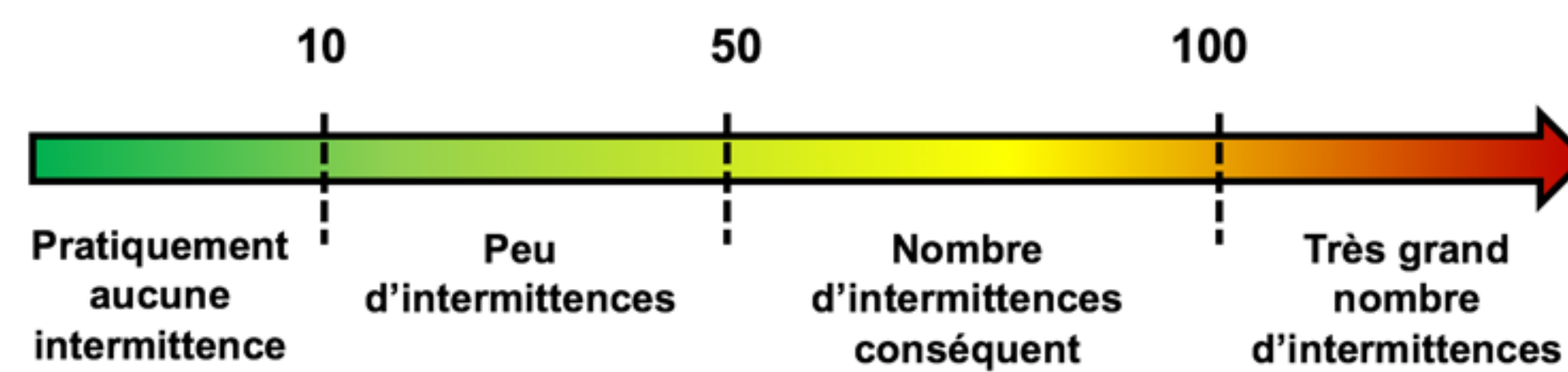


Figure 10 : Echelle représentative d'un niveau d'intermittence arbitraire en fonction de la valeur prise par l'indicateur de lissage.

4. OPTIMISATION

Afin d'obtenir la stratégie de pilotage la plus efficace possible avec l'algorithme utilisé, on procède à une optimisation multi-objectif de certains paramètres d'entrées. Le nombre de paramètres d'entrée étant élevé et le temps de calcul d'une simulation non négligeable (environ 5min), on choisit de focaliser l'optimisation sur les seuils de déclenchement et de ventilation maximale. On choisit également de calculer ces seuils comme un pourcentage du critère sanitaire utilisé (Equations 8 et 9).

$$\text{seuil}_{\text{déclenchement}} = \text{critère}_{\text{sani}} * \left(1 - \frac{p_{\text{dec}}}{100}\right) \quad (4)$$

$$\text{seuil}_{\text{ventilation max}} = \text{critère}_{\text{sani}} * \left(1 + \frac{p_{\text{max}}}{100}\right) \quad (5)$$

4.1 CHOIX DES PARAMETRES A OPTIMISER

Différents choix sont alors possibles : affecter des seuils de déclenchement et de ventilation maximale propres à chacun des polluants ; ou définir des seuils communs à l'ensemble des polluants. La principale différence réside dans le nombre de paramètres à optimiser, qui est de 4 pour le premier choix et de 2 pour le second, ce qui peut influencer le choix de la méthode d'optimisation. Une optimisation PSO (Particle Swarm Optimization), présentée dans le précédent article (Fouquier, et al. 2017), pourrait également être effectuée ici.

4.2 L'OPTIMISATION PAR PLAN D'EXPERIENCE

Cette méthode d'optimisation consistera simplement à définir un plan d'expérience judicieusement borné, de manière arbitraire, pour lequel on testera l'ensemble des jeux de paramètres. Seuls les jeux respectant des contraintes prédéfinies seront retenus, l'expert choisissant ensuite le ou les meilleurs jeux ayant été sélectionnés. Cette méthode est possible lorsque l'on fait le choix de seuils de déclenchement et de ventilation maximale communs à l'ensemble des polluants, ce qui limite à 2 le nombre de paramètres à optimiser. On choisit l'espace d'étude suivant : $p_{\text{dec}} \in [1: 5: 81]$; $p_{\text{max}} \in [0: 0.5: 12]$.

On choisit arbitrairement de ne retenir que les jeux de paramètres respectant les objectifs à atteindre renseignés ici : $EE < 4 \text{ kWh/m}^2$, $QAI < 0,3\%$ et $\text{Lissage} < 25$.

5. RESULTATS ET DISCUSSIONS

5.1 RESULTATS DE L'OPTIMISATION PAR PLAN D'EXPERIENCE

Le résultat retenu suite à l'optimisation via un plan d'expérience est $p_{\text{dec}} = 1\%$ et $p_{\text{max}} = 8\%$. En termes d'objectifs, cela donne les résultats présentés Tableau 1 :

EE	QAI	Lissage
3.78 kWh.m^{-2}	0.24 %	15

Tableau 1 : Résultats de l'optimisation par plan d'expérience

5.2 EVOLUTION DU DEBIT DE VENTILATION ET DES CONCENTRATIONS AVEC LES RESULTATS DE L'OPTIMISATION PAR PLAN D'EXPERIENCE.

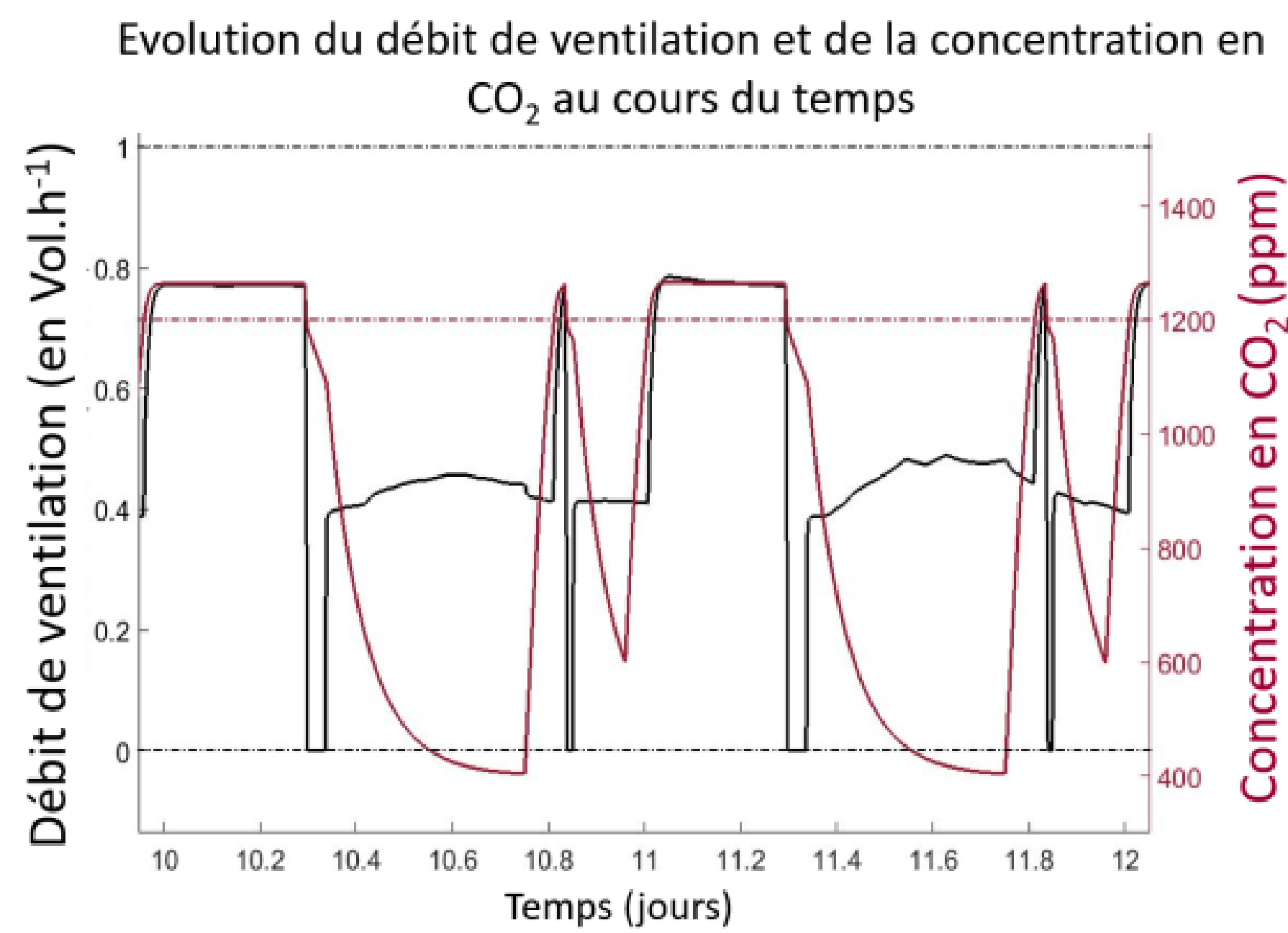


Figure 11

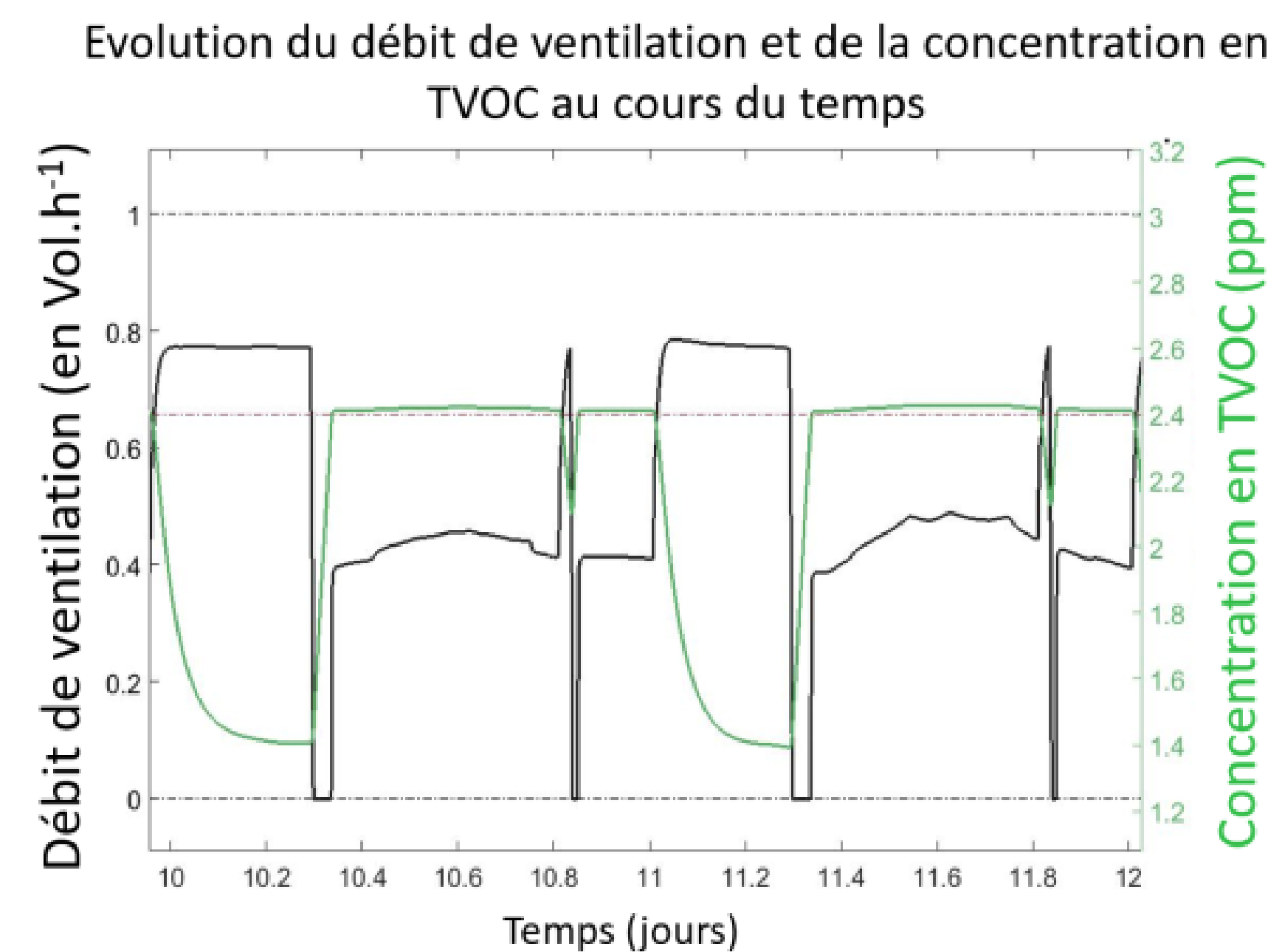


Figure 12

On observe sur les Figure 11 et Figure 12 que le nombre d'intermittence a été considérablement réduit, avec trois principales phases d'allumage et deux d'extinction de la ventilation dans la journée. De plus, le débit de ventilation fluctue entre 0 et 0.8 vol.h⁻¹. Des phases d'arrêt total de la ventilation liées à des concentrations trop faibles pour générer un besoin de ventilation sont observées. On observe également que les concentrations des polluants dépassent dans une certaine mesure les critères sanitaires visés, en particulier pour le CO₂. Cela provient d'une tolérance de l'indicateur de QAI. Enfin, il est intéressant de noter que le ventilateur se fixe à des débits relativement constants lorsqu'il n'y a pas d'évolution dans les émissions de CO₂ et de COVT. A titre de comparaison aux résultats présentés Tableau 2, on oppose ceux de ventilations constantes à 0.3 et 0.5 vol.h⁻¹ caractéristiques de ce qui se fait aujourd'hui dans le bâtiment.

Ventilation	EE	QAI	Lissage
0.3 vol.h ⁻¹	3.6 kWh.m ⁻²	53 %	2
0.5 vol.h ⁻¹	5.0 kWh.m ⁻²	0.6 %	4
Logique floue	3.78 kWh.m ⁻²	0.24 %	15

Tableau 2 : Résultats sur les 3 objectifs visés dans le cadre de ventilations constantes-permanentes actuelles et le modèle de pilotage de la ventilation élaboré ici

On observe ainsi que l'on arrive à obtenir un niveau de QAI comparable à une ventilation constante-permanente de 0.5 vol.h⁻¹ tout en maintenant une efficacité énergétique comparable à celle obtenue avec une ventilation de 0.3 vol.h⁻¹. Par ailleurs, un ajout de polluants a été effectué et a permis de vérifier la robustesse de l'algorithme lorsqu'un plus grand nombre de polluants est considéré.

5.1 CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Cette étude montre une méthode permettant d'associer qualité de l'air intérieur et efficacité énergétique, sans négliger l'inconfort et l'usure prématurée du matériel, associée à une ventilation trop intermittente. Plusieurs points de cette étude peuvent être améliorés dans un souci de validation puis d'amélioration de la méthode développée. Une étude de la robustesse de l'algorithme, via des simulations sur un bâtiment complet où de l'occupation est simulée dans l'ensemble des pièces, légitimerait l'utilisation d'un algorithme de pilotage. Couplé à une campagne expérimentale, cela permettrait également de confronter simulation et réalité, et de valider le fonctionnement de la méthode en conditions réelles. Le respect des critères sanitaires, des seuils de déclenchement et de ventilation

maximale, et des intermittences générées par l'algorithme valideraient le développement effectué en phase expérimentale. Sur un plan plus théorique, une compréhension plus approfondie de l'influence des polluants sur le débit permettrait une construction plus fine des fonctions d'appartenances. Enfin, cette étude montre la nécessité de s'accorder sur des indicateurs, en particulier sur le niveau de QAI intérieure.

6. BIBLIOGRAPHIE

- Abdul Afram, Farrokh Janabi-Sharifi. «Theory and applications of HVAC control systems e A review of model.» *Building and Environment* 72 (2014): 343-355.
- Adams, Rakes. «Using multiobjective optimizations to discover dynamic building ventilation strategies that can improve indoor air quality and reduce energy use.» *Energy and Buildings*, 2014: 272-280.
- Alexander, Merzkirch, Stefan Mass, Scholzen Frank, et Daniele Waldmann. «A semi-centralized, valveless and demand controlled ventilation system in comparison to other concepts in field tests.» *Building and Environment*, 2015: 21-26.
- ANSI/ASHRAE. «Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality.» ASHRAE STANDARD ASHRAE STANDARD, ANSI/ASHRAE , 2007.
- Arefeh, Hesarakia, Myhrenb Jonn Are, et Holmberga Sture. «Influence of different ventilation levels on indoor air quality and energy savings: A case study of a single-family house.» *Sustainable Cities and Society*, 2015: 165-172.
- C.Y.H. Chao, J.S. Hu. «Development of a dual-mode demand control ventilation strategy for indoor air quality control and energy saving.» *Building and Environment*, 2003: 385-397.
- CSTB. *Avis technique 14/13-1911: Systèmes de ventilation mécanique hygroréglable*. ATLANTIC, 2014.
- Dassonville, Mandin, et Kirchner. «Indoor air pollutants: Sources, levels and health impact. Part 2: Chemical pollutants.» *Archives des Maladies Professionnelles et de l'Environnement*, 2014: 594-606.
- F. Chevie, F. Guély. *La logique floue*. Vol. 191. Groupe Schneider, 1998.
- Foucquier, Aurélie, Franck Alessi, Pierre Bernaud, Arnaud Jay, et Etienne Wurtz. «Towards better Indoor Air Quality and Energy Efficiency by using an optimal mechanical ventilation strategy.» *IBPSA World*, 2017.
- Journal officiel de la République française du 13 Mai 2011. «Arrêté du 19 Avril 2011, texte 15.» Legifrance, 2011.
- Pervez Hamed Shaikh, Nursyarizal Bin Mohd Nor, Perumal Nallagownden, Irraivan Elamvazuthi, Taib Ibrahim. «A review on optimized control systems for building energy and.» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014: 409–429.
- Sabah Ahmed Abdul-Wahab, Stephen Chin Fah En, , Ali Elkame, Lena Ahmadi, Kaan Yetilmezsoy. «A review of standards and guidelines set by international bodies for the parameters of indoor air quality.» *Atmospheric Pollution Research (Atmospheric Pollution Research)*, 2015: 751-767.

Un outil participatif d'aide à la décision appuyé par un système d'argumentation pour la réhabilitation thermique d'un parc de bâtiments

Benjamin Delhomme*¹, Franck Taillandier¹, Laurent Mora¹

¹ Univ. Bordeaux, I2M, UMR 5295
F-33400 Talence, France,
*benjamin.delhomme@u-bordeaux.fr

RESUME. Dans le cadre du projet ANR REHA-PARCS visant à l'élaboration d'un outil d'aide à décision participatif pour la réhabilitation énergétique de parcs de bâtiments. Nous introduisons une méthode innovante combinant les systèmes d'argumentation abstraits avec des méthodes d'aide à la décision multicritères. La méthode multicritère va permettre de donner un cadre à la décision et hiérarchiser les alternatives alors que les systèmes d'argumentation permettront de construire et justifier le problème décisionnel. Si ces systèmes d'argumentation font l'objet de nombreux articles théoriques proposant de nouvelles approches quant à la résolution de conflits entre arguments, les applications sont en revanche moins présentes dans la littérature pour l'aide au débat. Nous proposons ainsi dans cet article un nouveau modèle permettant d'étendre la notion d'argument afin d'appliquer ces systèmes d'argumentations dans un cadre concret et dynamique. Un exemple académique est présenté pour illustrer le fonctionnement de la méthode développée.

MOTS-CLÉS : système d'argumentation, méthodes multicritères, réhabilitation de bâtiment.

ABSTRACT. As part of the ANR REHA-PARCS project aimed at developing a participatory decision support tool for the energy building retrofitting. We introduce an innovative method combining abstract argumentation systems with multi-criteria decision support methods. The multi-criterion method will provide a framework to the decision and prioritize the alternatives while the argumentation systems will build and justify the decisional problem. Although these argumentation frameworks are the subject of numerous theoretical articles proposing new approaches to conflicts resolution between arguments, real applications are on the other hand less present in the literature for debate support. In this paper, we propose a new model to extend the notion of argument in order to apply these argumentation systems in a concrete and dynamic framework. An academic example is presented to illustrate how the developed method works.

KEYWORDS : argumentation framework, multiple-criteria decision analysis, building retrofitting.

1. INTRODUCTION

La réhabilitation des bâtiments est essentielle afin d'atteindre les objectifs fixés par le gouvernement français pour lutter contre le changement climatique (40% de réduction de ses émissions d'ici 2030, par rapport au niveau de 1990) et pour inscrire le patrimoine immobilier dans une démarche de développement durable. Le projet ANR REHA-PARCS vise à l'élaboration d'un outil d'aide à décision pour la réhabilitation de parcs de bâtiments sociaux. Il s'agit d'analyser un parc de bâtiments et de définir des stratégies de rénovation viables techniquement et économiquement, répondant à des objectifs environnementaux et sociétaux. De plus, dans une volonté d'inscrire cet outil dans une approche réelle de développement durable, intégrant aussi la dimension de gouvernance, il devra permettre aux différents acteurs impactés par la décision de participer au processus de décision (approche participative). Afin de répondre à ces enjeux, le projet regroupe trois approches évoluant simultanément : (1) une caractérisation du parc par une analyse typologique, (2) une optimisation

multi-objectif permettant de construire un jeu de solutions Pareto-optimales, enfin (3) une méthode d'aide à la décision participative devant permettre aux acteurs de choisir collectivement une solution parmi les solutions optimales. Ce papier se concentre sur ce dernier aspect.

Trois approches sont possibles pour aider à choisir une solution dans le cadre d'une optimisation multi-objectif : a priori, interactive et a posteriori. L'approche a priori propose d'agrèger les fonctions objectif en une seule et d'optimiser ensuite cette unique fonction pour obtenir une seule solution optimale. Cela présuppose de connaître en amont les préférences des décideurs, d'être en mesure de les modéliser par une fonction mathématique et de les considérer comme stables. Cela est difficilement réalisable dans le cadre de la réhabilitation des bâtiments où les décideurs peuvent être nombreux avec des domaines de compétences variés. Les méthodes interactives proposent au décideur de guider l'optimisation ; cela permet au décideur de construire son jeu de préférences au fur et à mesure. Cette approche est intéressante mais complexe à mettre en œuvre dans le cadre d'une approche participative mettant l'accent sur la discussion et le débat entre acteurs. Or l'un des enjeux de REHA-PARCS est de s'inscrire dans une telle démarche. L'approche a posteriori a été privilégiée et notamment le recours à des méthodes multicritères (MCDA- Multi Criteria Decision Aiding).

2. COUPLAGE ENTRE ARGUMENTATION ET MCDA

Les méthodes multicritères proposent de formaliser le problème décisionnel comme la recherche d'un compromis entre différents critères construits à partir de la modélisation des préférences du/des décideurs. La littérature mentionne une grande variété de méthodes multicritères : ELECTRE (Roy 1991), AHP (Saaty 1990), MACBETH (Bana e Costa 1994), etc. Mais ces méthodes ne peuvent être efficaces que si le problème décisionnel a été bien modélisé, c'est-à-dire si les critères, les préférences et les contraintes ont été bien définis et structurés (Norese 1996). Or cette phase de structuration est souvent complexe et peut apparaître comme opaque aux différents acteurs. C'est un problème important dans le cadre d'une démarche participative où il est impératif d'être en mesure d'intégrer l'expertise et les avis de l'ensemble des acteurs dans la formalisation du problème. Nous proposons dans ce travail, d'avoir recours à l'approche d'argumentation abstraite pour aider à la structuration du problème décisionnel. Certains travaux (Amgoud et Prade 2009) proposent d'utiliser directement et uniquement l'approche argumentative pour résoudre des problèmes décisionnels. Ils ne peuvent cependant être efficaces que lorsque les décideurs sont en mesure de pouvoir appréhender et analyser l'ensemble des alternatives. Or dans le projet REHA-PARCS, les alternatives (i.e. les solutions Pareto-optimales) peuvent être très nombreuses (plusieurs centaines voire milliers) et sont elles-mêmes composées d'un ensemble d'actions unitaires, empêchant l'utilisation de l'argumentation seule. C'est pourquoi nous proposons de coupler des approches de MCDA et d'argumentation dans le cadre de ce travail.

La démarche retenue place la méthode multicritère au centre du processus décisionnel. Trois phases d'argumentation précédées par une définition des alternatives (phase 0) viennent appuyer la formulation du problème (Fig. 1) : (1) la construction d'une liste de critères par discussion argumentée, (2) l'évaluation des paramètres des critères sélectionnés à l'issue de la première phase, enfin (3) une discussion argumentée autour des alternatives préconisées par la méthode multicritère. Dans le cadre du projet REHA-PARCS, les alternatives sont directement issues de la phase d'optimisation multi-objectif ; il s'agit des solutions Pareto-optimales.

Lors de la phase 1, les acteurs définissent une liste de critères en lien avec les alternatives formulées lors de la phase 0. Cela passe par un débat argumenté autour du choix des critères. Par exemple, un acteur peut émettre l'avis suivant – « *Le coût devrait être considéré comme un critère* » ; il peut alors justifier cette assertion par un argument « *car le budget pour la rénovation est limité* ». L'approche argumentative (détaillée en partie 3) permet de modéliser les arguments mais aussi, par des inférences, de définir les arguments acceptables en cas de conflit entre eux. Ainsi, à la fin de cette

phase, sur la base des discussions et des inférences, une liste de critères est automatiquement formée et la structuration du problème peut continuer.

La phase 2 se concentre sur les paramètres des critères. Ces paramètres peuvent être des seuils, des pondérations, etc. en fonction de la MCDA utilisée. Par exemple, la méthode ELECTRE III (Roy 1978) requiert la définition de poids, de seuils d'indifférence, de préférence et de veto pour chaque critère. Les paramètres peuvent être aussi bien qualitatifs que quantitatifs, ordinaux que cardinaux.

Une fois les critères et les paramètres associés fixés, les alternatives peuvent être hiérarchisées par la méthode d'analyse multicritère. Aucune méthode multicritère n'est pour l'instant préférée, la souplesse des systèmes d'argumentation permet en effet de s'adapter aux différentes méthodes d'analyse multicritère.

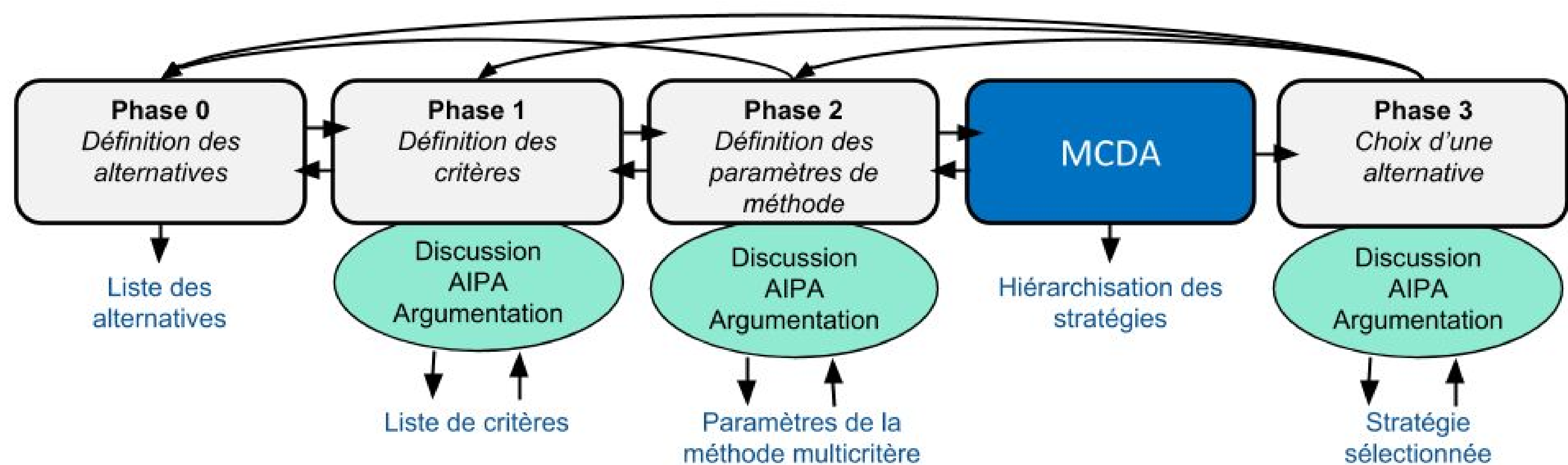


Fig. 1 : Structuration du processus décisionnel

Il peut arriver que certains acteurs soient en désaccord avec la solution préconisée par la méthode multicritère (celle classée à la première place). Deux solutions sont alors envisageables : (i) soit la formulation du problème n'est pas satisfaisante (phase 0 à 2) et on peut alors revenir à la phase en question, (ii) soit on peut passer à la phase 3. Cette dernière phase, permet de valider ou sélectionner d'autres alternatives que celle préconisée après la hiérarchisation des stratégies. Par exemple, en admettant qu'une alternative S5 soit classée première, un acteur du processus de décision peut mettre en avant l'assertion suivante « *La stratégie S17, classée deuxième, devrait être retenue* » puis l'appuyer par un argument « *Cette stratégie permet de mieux répartir les moyens entre les différentes zones du parc immobilier* ».

En pratique, ces différentes phases peuvent être étalées sur plusieurs réunions en fonction du nombre d'intervenant et des débats tenus. La démarche se veut aussi itérative ; par exemple, le besoin d'ajouter un nouveau critère peut se faire sentir au cours de la Phase 3, il est alors possible de revenir en Phase 1.

3. APPROCHE ARGUMENTATIVE

3.1. SYSTÈMES D'ARGUMENTATION

Formalisé pour la première fois par (Dung 1995), le système d'argumentation abstrait est un graphe orienté composé d'un ensemble d'arguments abstraits et d'une relation binaire représentant des attaques entre arguments. Un système d'argumentation est un couple $AF = \langle A, R \rangle$ où A est un ensemble fini d'arguments et R la relation binaire sur A tel que pour un argument a_1 attaquant un argument a_2 , on a $(a_1, a_2) \in R$. Un ensemble d'arguments S attaque un argument a_1 si a_1 est attaqué par au moins un argument de S .

Le cadre défini par Dung ne porte pas d'attention particulière au sens de l'argument, il appartiendra à l'utilisateur de donner un sens à cette relation. La Figure 2 montre un graphe orienté simple dans

lequel A1 et B1 s'attaquent mutuellement et A2 défend A1 en attaquant B1. Un argument attaqué et non défendu est considéré comme non acceptable; dans l'exemple de la figure 2, A1 et A2 sont donc les "arguments acceptables".

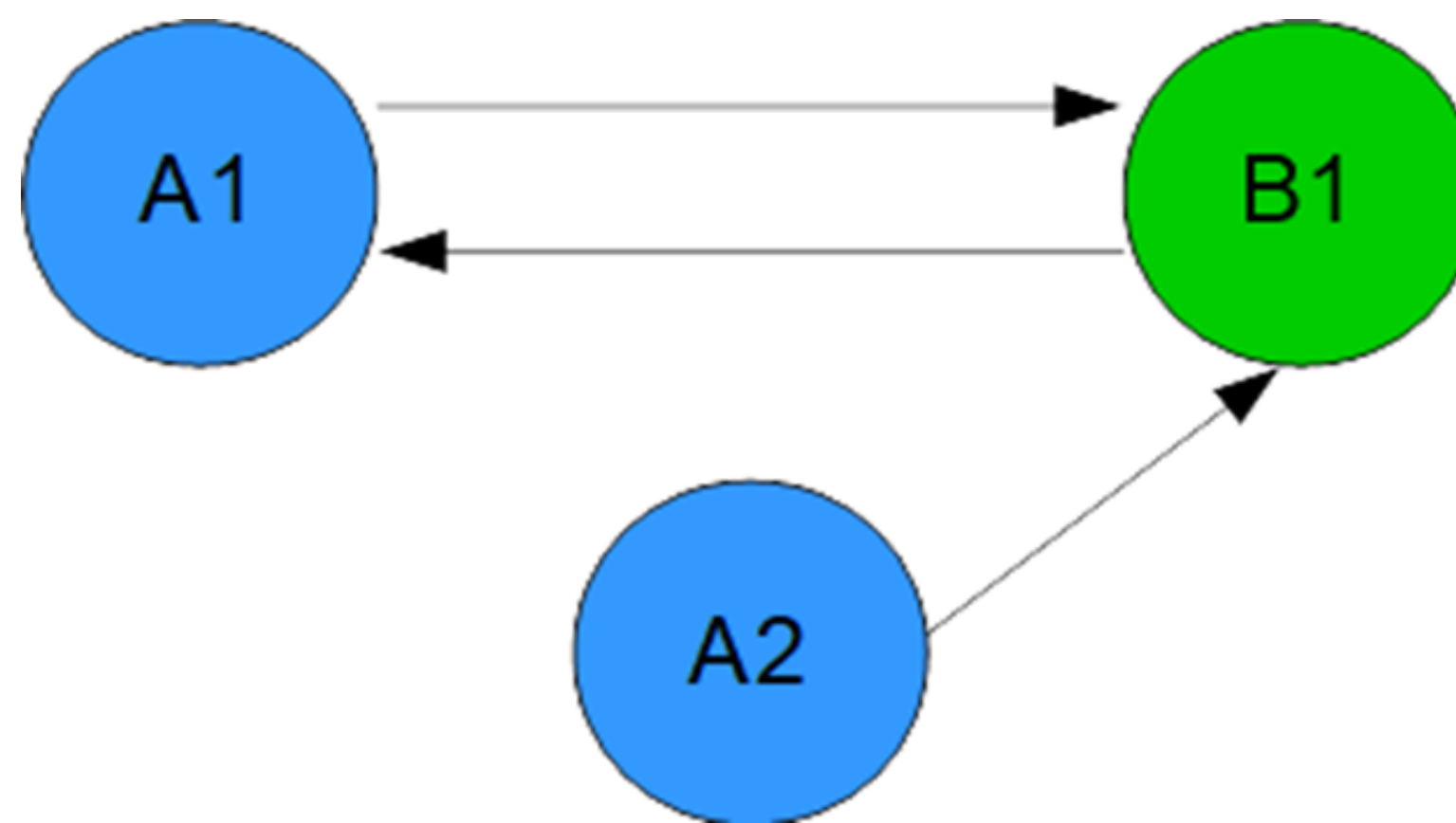


Fig. 2 : Graphe d'attaque

Dans ses travaux, Dung pose différentes définitions et règles (sémantiques) permettant de réaliser des inférences sur les graphes d'arguments. Ces inférences ont un sens du point de vue du graphe en termes d'acceptabilité, mais pas systématiquement du point de vue de l'information contenue dans les arguments. Par exemple, un ensemble d'argument S est appelé extension complète si et seulement si chaque argument, acceptable vis-à-vis de S, appartient à S. Le détail de ces définitions et règles (implémentées dans l'outil développé) peut être trouvé dans l'article de référence (Dung 1995).

Le système d'argumentation abstrait permet, (1) d'assurer la traçabilité du débat, (2) de mettre en évidence les contradictions du débat, (3) de définir les arguments acceptables et ceux qui ne le sont pas, enfin (4) d'expliquer les contradictions existantes. Il est cependant nécessaire dans un cadre décisionnel tel que celui de la réhabilitation de bâtiment d'être en mesure de trancher en toute situation sur de potentielles contradictions (par exemple, si deux arguments s'attaquent mutuellement). Or, le système de Dung présuppose que tous les arguments se valent, dès lors qu'une contradiction apparaît, aucune solution ne peut en sortir. D'autres systèmes, dérivant de celui formulé par Dung, peuvent être utilisés pour régler ce problème. De façon non-exhaustive, on peut citer le système basé sur la théorie des jeux (Matt et Toni 2008), le « Ranked-based » (Amgoud et Ben-Naim 2013), le système préférentiel (Modgil 2009), le « Weighted-based » (Dunne et al. 2011) ou le plus connu « Valued-based » (Bench-Capon et Dune 2003).

3.2. DU SYSTÈME D'ARGUMENTATION ABSTRAIT À AIPA

Si de nombreux systèmes d'argumentation tendent à corriger les situations sans issues que peut amener le système d'argumentation abstrait, aucun ne propose un formalisme simple permettant d'automatiser le processus d'identification des arguments. L'outil AIPA (Argumentation Interface for Participative Approach), que nous développons, propose une solution à ce problème en s'appuyant sur un système similaire à celui développé par Dung mais utilise le modèle d'argument présenté en figure 3. L'argument est désormais décliné en 3 types d'arguments : Conclusion, StatementFor et StatementAgainst. Le concept « Conclusion » est l'objectif final d'un sujet de discussion, par exemple, on peut écrire C1 - « *La stratégie A devrait être choisie à la place de la stratégie B* » et C2 - « *La stratégie B devrait être choisie à la place de la stratégie A* » comme conclusions à débattre dans le cadre d'un processus de décision. Les notions de StatementFor et StatementAgainst regroupent respectivement le principe de « pour » et « contre », il s'agit d'exprimer un argument appuyant ou rejetant un autre argument. On peut par exemple formuler un argument contre la conclusion C1 en créant un StatementAgainst S1 - « *La stratégie A est plus chère que la stratégie B* » ou contre un autre Statement S2- « *La stratégie B présente un plus grand risque financier.* ». AIPA est un modèle d'interface au sens où il est possible de traduire le graphe vers un système d'argumentation (Dung ou autre) pour bénéficier des mécanismes d'inférences proposés par celui-ci. De façon plus claire, il s'agit de construire un graphe d'argumentation en utilisant les trois concepts mis à disposition (Conclusion,

StatementFor, StatementAgainst) puis de choisir le système d'argumentation devant être utilisé pour calculer l'ensemble des arguments acceptés.

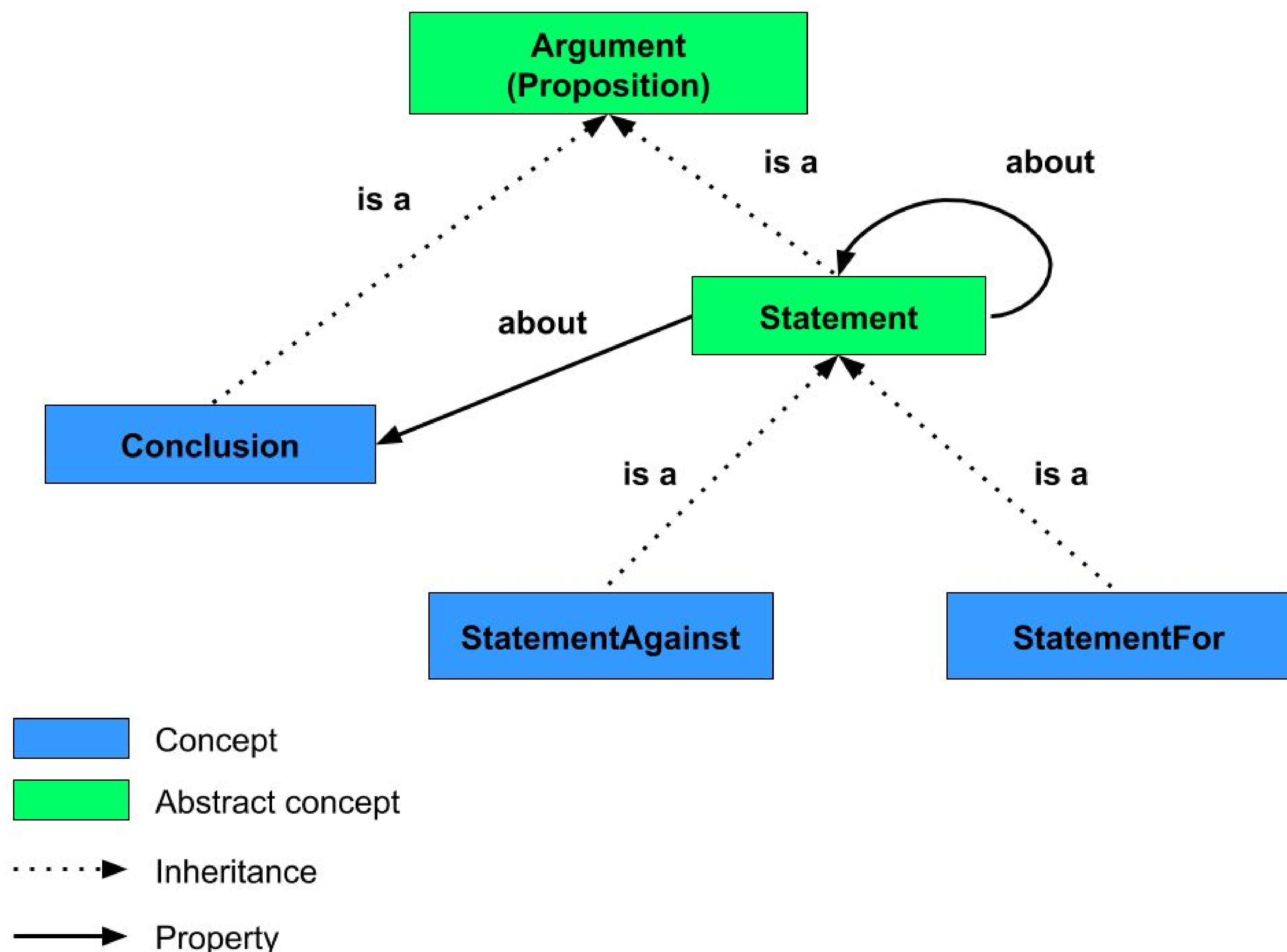


Fig. 3 : Modèle d'argument dans AIPA

AIPA a été implémenté sous la forme d'une application web. De ce fait, l'outil est utilisable par tous, à tout moment et sur différentes plateformes. Cela permet également de concentrer la puissance de calcul pour la partie raisonnement côté serveur et de pouvoir réaliser toutes les inférences (du moins avec le système de Dung) en un temps extrêmement court.

3.3. INTÉGRATION DE NOUVEAUX SYSTÈMES DANS AIPA

Si aujourd'hui, seul le système de Dung est implémenté dans AIPA, celui-ci peut également convertir le graphe d'argumentation vers des systèmes plus avancés tel que le « Valued-based », ce qui permet de résoudre les conflits lorsque deux arguments opposent des idées qui ne peuvent pas être rejetées. Par exemple, pour une conclusion C1 - « Le béton armé devrait être utilisé pour cet ouvrage », on peut trouver un StatementFor S1 - « Le béton est le matériaux le moins cher » qui s'oppose à un StatementAgainst S2 - « Le béton a un impact environnemental plus mauvais que le bois », ici les deux arguments sont vrais. Il s'agira dans ce cas d'ajouter une pondération sur les arguments en conflits, basée par exemple sur le statut de l'acteur dans le processus de discussion, sur le domaine d'expertise, sur une incertitude ou sur la combinaison de plusieurs paramètres.

D'autres systèmes optent pour une dimension probabiliste, (Li et al. 2011) proposent un modèle intégrant des probabilités sur les arguments et sur les attaques avec un postulat d'indépendance entre les arguments. Ils présentent une méthode de calcul des extensions (ensembles d'arguments acceptés pour un ensemble de règles donné) basée sur des simulations Monte-carlo. Ce modèle ne permet cependant pas une utilisation en temps réel, le temps de calcul étant supérieur à 10 secondes pour une vingtaine d'arguments seulement et croît de façon exponentielle. Une autre approche soumise par

(Dondio 2013) se place dans le cadre de dépendance entre les arguments et propose des calculs d'extension a priori plus rapides avec plus d'ouverture sur d'éventuelles optimisations. Ce système d'argumentation sera prochainement implémenté dans AIPA.

4. EXEMPLE D'APPLICATION

Afin d'illustrer le fonctionnement de l'approche présentée, nous proposons un exemple académique. Nous supposons que les étapes 1 et 2 du projet REHA-PARCS sont terminées. Une typologie est ainsi définie et une liste comprenant cinq stratégies optimales (alternatives) nous est proposée suite à l'étape d'optimisation multi-objective. Nous disposons de données sur trois critères choisis arbitrairement dans le cadre de cet exemple : la performance énergétique, le coût global et la surface habitable totale. Ces critères sont automatiquement représentés sous forme de conclusion dans AIPA :

C1 – « *La performance énergétique devrait être un critère.* »

C2 – « *Le coût global devrait être un critère.* »

C3 – « *La surface habitable totale devrait être un critère.* »

Les acteurs engagés dans le processus sont : le gestionnaire du parc (GP), un responsable du service technique (RST) et un représentant des locataires (RL). Il est à noter que dans un cas réel, l'utilisation d'une méthode d'analyse multicritère n'est pas indispensable lorsque les alternatives sont aussi peu nombreuses. L'argumentation peut uniquement se concentrer sur les alternatives (phase 3) en intégrant les critères dans les arguments proposés, par exemple «L'alternative X devrait être retenue au regard de la performance énergétique et du coût global».

Le contexte étant établi, les discussions débutent, à l'aide de l'outil, sur les critères qui devraient être utilisés. Par défaut, tous les critères sont considéré comme "non-traités" tant qu'aucun argument n'a été formulé pour ou contre ces critères. Les différents acteurs ajoutent de nouvelles prémisses :

RST : S1 – « *La performance énergétique est primordiale pour lutter contre le changement climatique.* » StatementFor -> C1

GP : S2 – « *Notre budget est limité à 50 millions pour ce projet.* » StatementFor -> C2

RL : S3 – « *Les locataires souhaitent que la surface habitable ne doit pas être impactée par les travaux.* » StatementFor -> C3

La flèche « -> » indique la cible de l'argument, ainsi StatementFor(S3) -> C2 signifie « *Je suis pour le fait que le coût global devrait être un critère parce que notre budget est limité à 50 millions pour ce projet* ».

A ce stade, tous les critères sont retenus et sont donc automatiquement injectés dans la méthode d'analyse multicritère. Toutefois, le bailleur affirme que la surface habitable restera intacte et émet un StatementAgainst S4 - « *La surface habitable restera intacte quelle que soit la solution choisie.* » pour contrer S3, provoquant le rejet de la surface habitable comme critère. Le graphe généré par AIPA est présenté en figure 4.

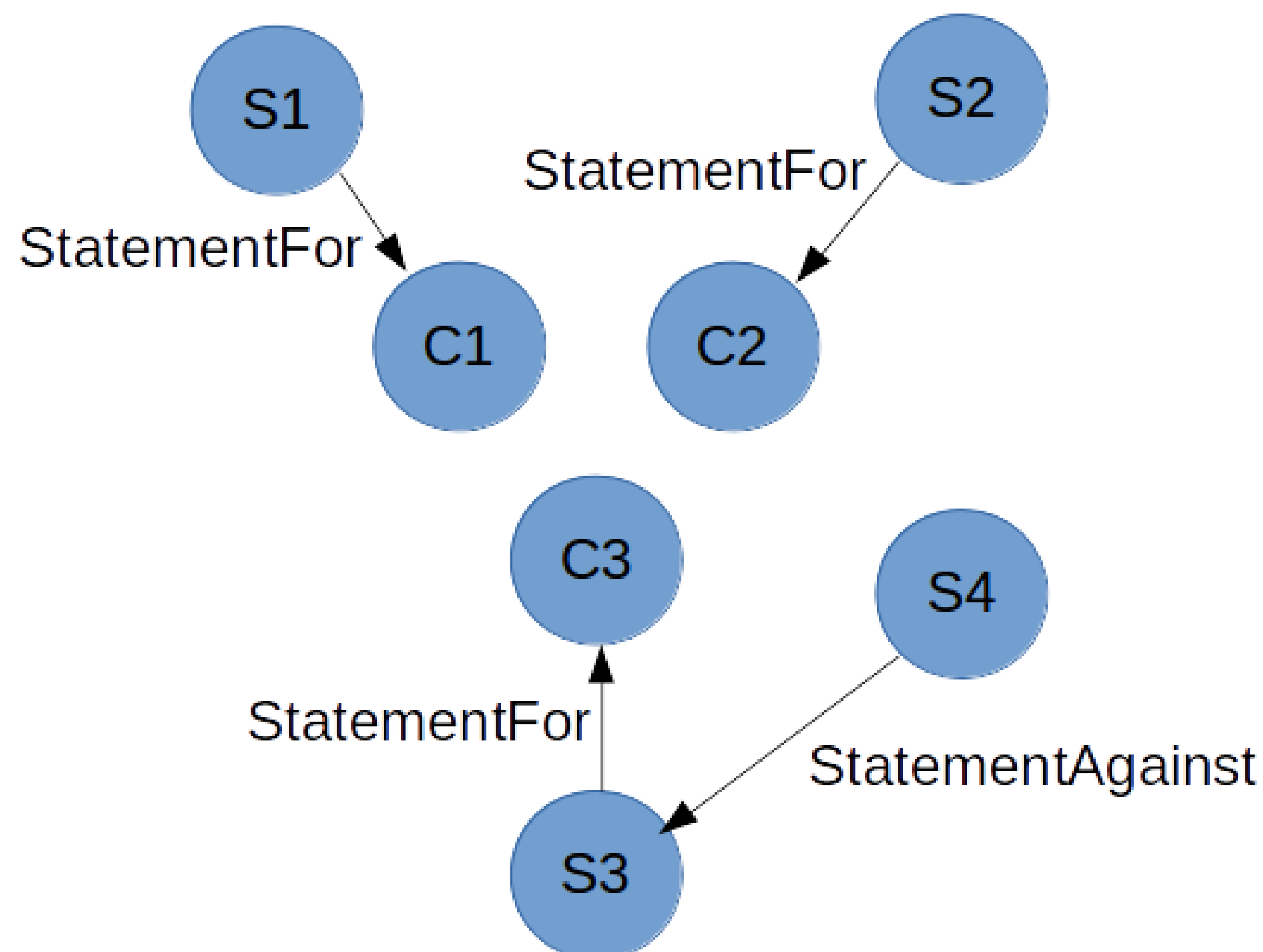


Fig. 4 : Graphe de discussion des critères

La phase 1 se termine lorsque les acteurs n'ont plus d'arguments à ajouter. La phase 2 débute ensuite avec deux critères disponibles : le coût global et la performance énergétique. L'approche sera ici ordinale, le bailleur (GP) donne une conclusion C1 – « *Le coût est un critère plus important que la performance énergétique.* » et l'accompagne d'un StatementFor « *Économiser sur les travaux de maintenance permettra de construire de nouveaux logements.* ». Le responsable du service technique (RST) et le locataire n'étant pas en désaccord avec cette conclusion et ce statement, et n'ayant pas de nouveaux arguments, le critère coût prend plus d'importance que celui de la performance énergétique.

Basée sur ces éléments (critère et préférence), la MCDA (une simple méthode lexicographique a ici été retenue pour illustration (Fig. 5)) permet de trouver les résultats présentés dans la figure 5. La stratégie la plus pertinente au regard du MCDA est la solution SB. Cependant, le représentant des locataires, dans la phase 3, donne la conclusion suivante C1 – « *La stratégie optimale SE semble meilleure.* » suivie par un StatementFor S1 – « *La stratégie SE permettra une phase de travaux moins longue, dérangeant beaucoup moins les locataires.* ». Le représentant des locataires peut ainsi exprimer un avis sur des critères non formalisés une fois le champ de stratégies optimales restreint.

Solution	Coût global (M€)	Performance énergétique (classes)
SB	1.8	B
SE	2.0	B
SC	2.3	E
SD	2.6	B
SA	2.4	F

Fig. 5 : Résultats de la méthode multicritère

Aucun des autres acteurs n'ayant de nouveaux arguments à émettre, la solution SE est ainsi retenue.

5. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Nous avons présenté dans cet article, le projet ANR REHA-PARCS, visant à aider les bailleurs sociaux à élaborer une stratégie de rénovation de leur parc immobilier. Pour répondre à l'enjeu de l'aide à la décision participative, au cœur du projet REHA-PARCS, nous avons proposé une approche innovante couplant analyse multicritère et argumentation. Afin de mettre en œuvre cette approche, nous avons (a) formalisé le couplage entre les deux approches, (b) développé un modèle d'interface permettant de passer d'une discussion en temps réel à des graphes d'arguments (AIPA). L'outil développé intègre la traçabilité du débat (toute décision prise est justifiable à l'aide du graphe), la mise en évidence des contradictions, l'explication des contradictions, enfin, dans le cadre d'une utilisation de framework plus avancé, AIPA peut déterminer une solution à condition d'en maîtriser les paramètres (par exemple la pondération des arguments). En cela, AIPA est un véritable support au débat et permet aux différents acteurs d'en saisir tous les éléments. A notre connaissance, ces travaux sont novateurs de par le lien établi entre le langage naturel et les systèmes d'argumentation dérivés de Dung, lien nous permettant de formaliser un problème de décision multicritère.

Enfin, au-delà de l'amélioration qui doit être apportée à l'interface actuelle et de l'intégration d'une méthode multicritère avec AIPA, de nombreuses questions d'ordre méthodologique restent en suspens. Si des méthodes de pondérations doivent être utilisées, quels paramètres doivent être intégrés ? De façon plus générale, quelle interface convient le mieux à ce type d'outil ? Comment ne pas influencer les utilisateurs ? Ces problèmes seront analysés dans le cadre de REHA-PARCS lors de la mise en application des différentes phases. Bien qu'aucun résultat ne soit disponible, des expérimentations sont en cours, en partenariat avec Bordeaux Métropole.

6. RÉFÉRENCES

- Amgoud, Leila, and Jonathan Ben-Naim. 2013. "Ranking-Based Semantics for Argumentation Frameworks." In *International Conference on Scalable Uncertainty Management*, 134–147. Springer. http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-40381-1_11.
- Amgoud, Leila, and Henri Prade. 2009. "Using Arguments for Making and Explaining Decisions." *Artificial Intelligence* 173 (3): 413–36. <https://doi.org/10.1016/j.artint.2008.11.006>.
- Bana e Costa, Carlos A., and Jean-Claude Vansnick. 1994. "MACBETH — An Interactive Path towards the Construction of Cardinal Value Functions." *International Transactions in Operational Research* 1 (4): 489–500. [https://doi.org/10.1016/0969-6016\(94\)90010-8](https://doi.org/10.1016/0969-6016(94)90010-8).
- Bench-Capon, Trevor JM, and Paul Dune. 2003. "Persuasion in Practical Argument Using Value-Based Argumentation Frameworks." *Journal of Logic and Computation* 13 (3): 429–448.
- Dondio, Pierpaolo. 2013. "Probabilistic Argumentation Frameworks: Basic Properties and Computation." In *Highlights on Practical Applications of Agents and Multi-Agent Systems*, 263–79. *Communications in Computer and Information Science*. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-38061-7_26.
- Dung, Phan Minh. 1995. "On the Acceptability of Arguments and Its Fundamental Role in Nonmonotonic Reasoning and Logic Programming." In *IJCAI*, 93:852–857. https://cs.ait.ac.th/~dung/Site/Publications_files/ijcai93.pdf.
- Dunne, Paul E., Anthony Hunter, Peter McBurney, Simon Parsons, and Michael Wooldridge. 2011. "Weighted Argument Systems: Basic Definitions, Algorithms, and Complexity Results." *Artificial Intelligence* 175 (2): 457–86. <https://doi.org/10.1016/j.artint.2010.09.005>.
- Li, Hengfei, Nir Oren, and Timothy J. Norman. 2011. "Probabilistic Argumentation Frameworks." *TAFIA* 7132: 1–16.

- Matt, Paul-Amaury, and Francesca Toni. 2008. "A Game-Theoretic Measure of Argument Strength for Abstract Argumentation." In *Logics in Artificial Intelligence*, 285–97. Lecture Notes in Computer Science. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-540-87803-2_24.
- Modgil, Sanjay. 2009. "Reasoning about Preferences in Argumentation Frameworks." *Artificial Intelligence* 173 (9–10): 901–34. <https://doi.org/10.1016/j.artint.2009.02.001>.
- Norese, Maria Franca. 1996. "A Process Perspective and Multicriteria Approach in Decision-Aiding Contexts." *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis* 5 (2): 133–44. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1360\(199606\)5:2<133::AID-MCDA100>3.0.CO;2-K](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1360(199606)5:2<133::AID-MCDA100>3.0.CO;2-K).
- Roy, Bernard. 1978. "ELECTRE III : Un Algorithme de Classements Fondé Sur Une Représentation Floue Des Préférences En Présence de Critères Multiples" 20: 3–24.
- Roy, Bernard. 1991. "The Outranking Approach and the Foundations of Electre Methods." *Theory and Decision* 31 (1): 49–73. <https://doi.org/10.1007/BF00134132>.
- Saaty, Thomas L. 1990. "How to Make a Decision: The Analytic Hierarchy Process." *European Journal of Operational Research, Decision making by the analytic hierarchy process: Theory and applications*, 48 (1): 9–26. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(90\)90057-I](https://doi.org/10.1016/0377-2217(90)90057-I).

DÉFINITION DE POTENTIELS D'UTILISATION DE RESSOURCES BIOCLIMATIQUES POUR LE RAFRAÎCHISSEMENT DES BÂTIMENTS EN CLIMAT CHAUD ET HUMIDE

Abdou Idris*¹, Joseph Virgone¹, Damien David¹, Etienne Vergnault¹, Abdoukader Ibrahim²

¹ Université de Lyon, CNRS, Université Lyon 1, INSA-Lyon, CETHIL UMR 5008, Villeurbanne, France

² Université de Djibouti, Faculté d'Ingénieurs, GRE, Djibouti, Djibouti

Adresse de l'entité,

*abdou.idris-omar@etu.univ-lyon1.fr ou eleyeh.abdou@gmail.com

RESUME. Dans les pays chauds, le défi à relever est celui de la climatisation. L'augmentation de la consommation d'énergie par la climatisation découle du besoin de vivre dans des pièces plus confortables, ce qui est compréhensible. Mais à Djibouti, ce besoin est exacerbé par une architecture voulant imiter celle des pays développés mais inadaptée aux conditions climatiques. Cet article tente de proposer une nouvelle définition de potentiels d'utilisation de ressources bioclimatiques permettant le rafraîchissement des bâtiments situés sous ce type de climat. Pour ce faire, cela passe par une bonne connaissance des ressources énergétiques disponibles dans l'environnement, et plus particulièrement de leur utilité au regard des besoins de rafraîchissement du bâtiment. Dans le cadre de notre contribution à cette problématique, une première étape d'identification a été effectuée pour déterminer les ressources énergétiques à exploiter. Ensuite, des indicateurs ont été définis afin de quantifier la capacité des sources précédentes à couvrir la consommation d'énergie pour la climatisation et la possibilité pour le bâtiment de les exploiter. Dans ce travail, les indicateurs précédents ont été appliqués sur un cas de bâtiment type à Djibouti avec un climat type chaud et humide.

MOTS-CLÉS : Ressources énergétiques, Performance bioclimatique, Enveloppe du bâtiment.

ABSTRACT. In hot countries, the challenge is air conditioning. The increase in energy consumption by air conditioning stems from the need to live in more comfortable rooms, which is understandable. But in countries like Djibouti, this need is exacerbated by an unsuitable architectural design of the buildings for local climatic conditions. This paper proposes a new methodology for the quantification of the potential benefits of bioclimatic resources to reduce building's energy consumption, under hot and humid climate. To do so, it requires a good knowledge of the environmental resources, and especially their usefulness for building's cooling demand. As part of our contribution to this issue, first identification step has been carried out to determine which sources should be exploited. Then, indicators have been defined to quantify the ability of the previous sources to cover the need for air conditioning and the possibility for the building to exploit them. In this study, the previous indicators were applied to a reference building in Djibouti with a hot and humid conditions

KEYWORDS: Environmental resources, Bioclimatic performance, building envelope

1. INTRODUCTION

Dans les pays en voie de développement, le taux d'urbanisation jusqu'à là, faible augmente rapidement et les besoins en nouveaux bâtiments sont élevés. Selon l'ONU-HABITAT, le taux de

croissance des villes passera de 47% en 2011 à 65% à l'horizon 2050. Les pays en Afrique subsaharienne sont actuellement confrontés à la nécessité d'accroître leur production d'énergie pour accélérer le développement et améliorer le niveau de vie de leurs populations, dans un contexte de changement climatique et de flambée des coûts des énergies fossiles. A Djibouti, les ressources énergétiques sont très limitées et les ressources renouvelables abondantes sont faiblement exploitées, en dehors de l'énergie hydraulique importée de l'Ethiopie. Le coût de l'électricité y est très cher et la production est insuffisante pour répondre aux besoins du pays en électricité. Il y a, donc, une nécessité d'adopter une démarche bioclimatique et adapter le secteur du bâtiment au contexte climatique de la région afin d'offrir un environnement intérieur confortable et de réduire la consommation énergétique. En effet, c'est dans des conditions de faiblesses technologiques que le climat joue le rôle principal dans les solutions utilisées bien que, les solutions soient limitées lorsque les conditions climatiques sont extrêmes. Le principe de la démarche bioclimatique repose sur l'utilisation de l'enveloppe du bâtiment pour exploiter les ressources énergétiques de l'environnement. Plusieurs systèmes bioclimatiques ont été développés, pour les pays du climat chaud et humide, afin de profiter des différentes ressources énergétiques environnementales quand elles sont sources de fraîcheur et de s'en protéger lorsqu'elles sont source d'apport de chaleur. Par exemple, les principes bioclimatiques dans les pays chauds recommandent l'utilisation des dispositifs de protection solaire afin de protéger un bâtiment contre le rayonnement solaire. Les éléments tels que les pare-soleils (Butera, Adhikari, et Aste 2015) et les vitrages angulairement sélectifs ou adaptatifs (Smith, Dligatch, et Jahan 1998) et (Granqvist et al. 2010), peuvent être utilisés sur les fenêtres. La quantité de rayonnement absorbée par le bâtiment peut également être contrôlée grâce à l'utilisation de la double peau (Omar et al. 2017) qui s'appuie sur l'effet d'une première couche qui sert de protection contre le rayonnement solaire et la ventilation d'air entre les deux peaux pour évacuer la chaleur. Le rafraîchissement via le ciel, est également visé par la démarche bioclimatique dans les pays où les besoins de refroidissement sont importants. En effet, les échanges radiatifs nocturnes vers la voûte céleste peuvent être utilisés pour concevoir des capteurs de fraîcheur pour refroidir les surfaces des bâtiments, en particulier dans les pays chaud et humide où les différences de température entre le jour et la nuit sont faibles, (Molina, Erell, et Yannas 2013) et leur système « skytherms » ou le capteur de Givoni (Givoni 1994) sous lequel on fait passer l'air de ventilation. D'autres techniques, telles que la ventilation naturelle, peut être utilisée pour réduire les besoins de refroidissement (Butera, Adhikari, et Aste 2015), (Aflaki et al. 2015), (Elshafei et al. 2017) et le sol (Benhammou et Draoui 2015) et (Draoui et al. 2015).

Toutes ces technologies bioclimatiques ont rarement été évaluées en ce qui concerne la quantité d'énergie disponible qu'ils pourraient utiliser. Dans cette optique, cet article tente de proposer une méthodologie pouvant servir de base à une approche de la conception des bâtiments adaptée au climat chaud et humide. Elle est principalement basée sur la simulation, et permet d'évaluer la qualité énergétique de l'environnement d'un bâtiment et de mesurer la performance bioclimatique de ce bâtiment.

2. CONTEXTE HABITAT ET ANALYSE METEOROLOGIQUE

En Afrique de l'Est, les pays sont faiblement urbanisés, mais font face à un fort taux d'accroissement des aires urbaines. A Djibouti, en particulier, 77% de la population vit en zone urbaine et l'habitat est en pleine mutation. La construction à Djibouti est marquée par le passé colonial de la ville et est empreinte d'influences d'architecture yéménite et des villes arabes modernes, avec de grands chantiers

de construction omniprésents. La typologie du bâtiment à Djibouti est classiquement centrée sur le développement des deux secteurs : résidentiel et tertiaire. Le secteur résidentiel est généralement composé de types de bâtiments suivants (cf. Figure 1) (DISED 2015).

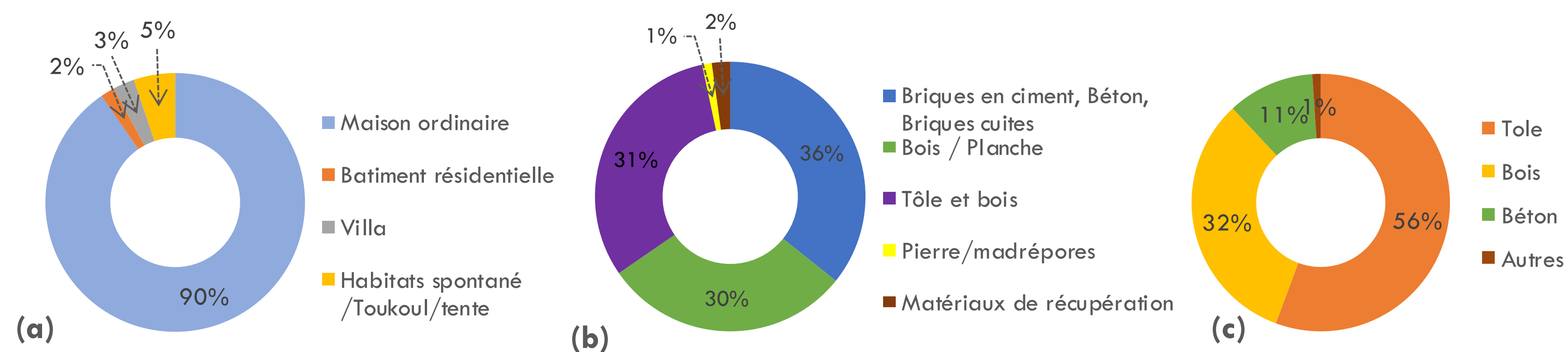


Figure 1 : (a) Typologies de construction à Djibouti, (b) Type de matériaux pour les murs (c) Nature des matériaux utilisés pour la toiture de la maison

Les moyens financiers limités conduisent une grande partie de la population à adopter la tôle tout en gardant une maçonnerie en matériau traditionnel (maison ordinaire) tel que la brique alvéolée de ciment communément appelée parpaing (Figure 1). Il peut être confectionné facilement sur le site de la construction, ce qui évite tout acheminement coûteux. Il est très résistant et apprécié pour sa facilité de pose. Ce mode de construction actuel, à Djibouti, offre beaucoup de potentiel d'amélioration de la performance énergétique du bâtiment. Cependant, les conditions climatiques sont extrêmes. Les pays avec un climat chaud et humide tel que Djibouti sont caractérisés par une pluviométrie très faible, un hiver chaud et humide et un été très chaud et humide (Dunham 1983) et (Kottek et al. 2006). La latitude de Djibouti place la ville dans une position où elle peut recevoir pratiquement le maximum de radiation solaire (des pics d'ensoleillement de plus de 800 W/m² presque toute l'année). Il en résulte une température élevée, en moyenne comprises entre 25°C et 34°C. Les maxima absolus peuvent parfois atteindre 46°C surtout en été et des amplitudes thermiques faibles sont garanties toute au long de l'année (une variation quotidienne de la température à peine égale à 5 ° C en été comme en hiver). Les plus faibles valeurs de l'humidité relative de l'air se situent pendant l'été, tandis que les plus fortes valeurs se rencontrent durant la saison fraîche où elles sont généralement supérieures à 70% pouvant être source d'inconfort. Mais globalement l'humidité de l'air reste supérieure à 30% toute l'année. Le pays est balayé par des vents dominants secs et brûlants (Khamsin) de direction Ouest en été et les alizés, vents humides de direction Est, durant la saison fraîche. La vitesse moyenne des vents est relativement faible (2 m/s). L'analyse du climat met en évidence deux périodes. Une première période, la saison fraîche, qui s'étend d'octobre ou de novembre à mars où le climat est plutôt agréable avec des températures moyennes comprises entre 22°C et 30°C. Une deuxième période, l'été, entre avril et septembre, avec des températures très élevées 30 à 35°C le matin, 40°C et plus en début d'après-midi. Du point de vue énergétique, ces conditions climatiques induisent des besoins spécifiques de rafraîchissement tout en posant des problèmes très difficiles à la recherche de source de rafraîchissement pour le bâtiment. La problématique du confort dans les bâtiments est donc l'un des enjeux principaux pour ce type de climat. Un bâtiment doit pouvoir s'adapter au mieux à ce climat, avec une architecture et des normes différenciées et distinctes des pratiques observées dans d'autres régions. Il est utile, par conséquent, de bien connaître les ressources énergétiques et leurs caractéristiques physiques afin d'évaluer leur utilité dans le bâtiment.

3. METHODES

3.1 SPECIFICITE D'UNE ETUDE EN CLIMAT CHAUD

Les extrêmes du climat chaud et humide ne se trouvent que dans de rares endroits habités, par conséquent, il existe peu de recherches sur l'utilisation des ressources climatiques de l'environnement pour le refroidissement passif de l'habitat. L'environnement qui entoure le bâtiment d'un point de vue énergétique peut être décrit par le climat constitué des multiples données exposées précédemment. Ces paramètres sont utilisés notamment dans les simulations énergétiques des bâtiments. L'analyse des ressources énergétiques indique non seulement, que les bâtiments devraient répondre à la situation difficile créée par une combinaison d'une forte humidité constante, des températures élevées, de modestes fluctuations quotidiennes de la température et des quantités élevées de rayonnement solaire, mais aussi offre une possibilité d'utiliser au mieux ces ressources pour un rafraîchissement naturel. Dans le cadre de cet article, nous nous intéressons à différentes composantes de cet environnement afin de quantifier leurs apports d'un point de vue énergétique et de confort thermique.

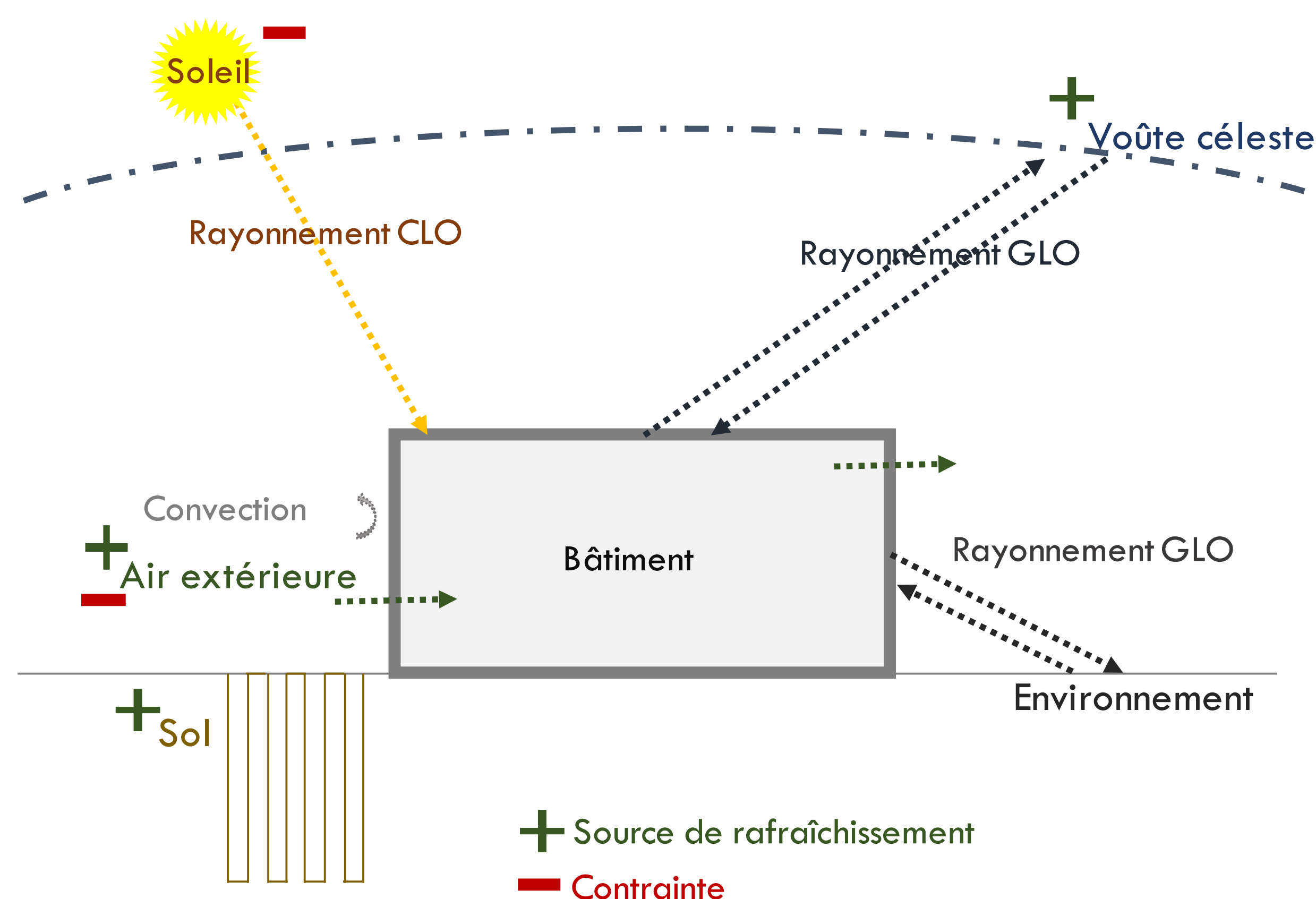


Figure 2 : Schéma des interactions énergétiques entre un bâtiment et son environnement

Il y a trois sources de rafraîchissement et deux contraintes qu'on peut alors évaluer en fonction des besoins de rafraîchissement du bâtiment (Figure 2). L'objectif de cette étude n'étant pas de concevoir des bâtiments passifs, mais de réduire la consommation énergétique en exploitant les sources de fraîcheur de l'environnement en évitant les contraintes. De ce fait le bâtiment étudié est toujours climatisé.

3.2 DEFINITION DE RESSOURCE

Dans cette étude, une ressource énergétique de l'environnement est considérée comme une ressource exploitable qui peut refroidir à partir du moment où sa température est inférieure à la température de confort acceptable. La ressource refroidit donc l'intérieur du bâtiment. Dans cette condition précise, et sur un site donné, on peut définir un potentiel total de rafraîchissement. Une solution technologique (le bâtiment y compris) exploite une partie de ce potentiel pour couvrir une part de son besoin de climatisation. Cette méthode basée autour de concept défini par (Chesné 2012) est appliquée sur un cas de Bâtiment à Djibouti.

3.3 CARACTERISTIQUES DES RESSOURCES

La ressource ciel : L'enveloppe d'un bâtiment échange de l'énergie par rayonnement en grandes longueurs d'onde (GLO) avec la voûte céleste. Cette dernière est considérée comme un corps gris à faible altitude auquel on attribue une température apparente de rayonnement, appelée température de ciel, qui est fictif, mais permet notamment de simplifier les calculs de rayonnement entre le ciel et l'enveloppe du bâtiment. Dans la littérature, il existe plusieurs modèles pour estimer la température et l'émissivité du ciel. Cependant, on peut noter un manque de travaux sur le rayonnement GLO dans les bâtiments en climat chaud et particulièrement en Afrique sub-saharienne. Dans tous les cas, les modèles utilisés donnent une température de ciel tout le temps inférieure à la température de l'air. De plus, la différence entre la température de l'air ambiant et la température du ciel est plus élevée durant la saison fraîche. Ce constat fait du ciel une ressource exploitable pour réduire les besoins d'un bâtiment. Pour exploiter cette ressource, il y a deux cas. Dans le premier cas et avec la présence du soleil, la ressource ciel n'est pas exploitable et parce que le soleil vient réchauffer les éventuels capteurs à une température supérieure à la température de confort intérieure acceptable. Ainsi, la ressource ne refroidit pas l'intérieur du bâtiment, mais compense les radiations solaires. Dans le deuxième cas et en absence du rayonnement solaire, le flux radiatif vers le ciel permet de rafraîchir le bâtiment. Ce refroidissement permet de stocker aussi la fraîcheur nocturne et de la restituer pendant la journée, et par conséquent, diminuer les besoins de refroidissements.

La ressource air : Cette ressource est exploitée par la ventilation naturelle et la convection, basées sur des interactions entre les sollicitations météorologiques et le bâtiment pour un rafraîchissement passif. L'évaluation de cette ressource utilise non seulement du débit de ventilation, mais, aussi du coefficient d'échange convectif, qui dépend de très grands nombres de paramètres.

La ressource sol : Quant à la ressource sol, elle se collecte que sur une zone hors emprise du bâtiment.

3.4 BASE DE LA METHODOLOGIE

3.4.1 Description générale

On calcule pour les ressources à exploiter le potentiel total de rafraîchissement caractéristique d'un site, sans une prise en compte détaillée du bâtiment. Puis par la suite, l'utilisation de ces ressources utiles par le bâtiment sera quantifiée par la modélisation énergétique. Un schéma simplifié de la démarche est donné sur la figure 3.

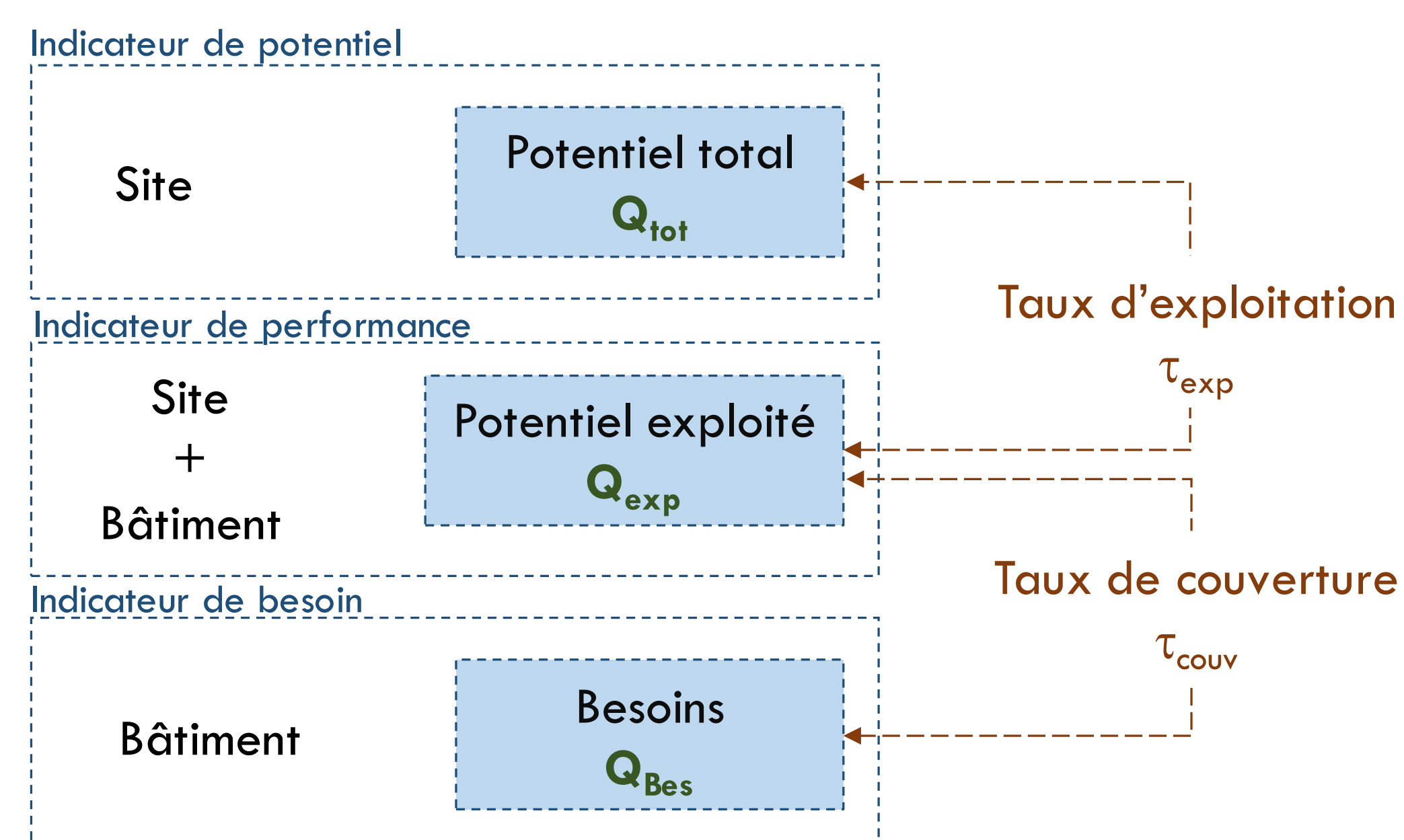


Figure 3 : Description de la méthode proposée

Le potentiel énergétique, que l'on peut qualifier de « total », Q_{TOT} , représente la quantité d'énergie, en jour, exploitable par un bâtiment d'une taille quelconque. Il s'agit du potentiel total de la ressource qui dépend du site et de la taille du bâtiment. La plus grande difficulté et la complexité dans l'évaluation du potentiel total bioclimatique est qu'il ne dépend pas de la composition des parois du bâtiment ni de la solution adoptée pour exploiter la ressource. A partir de ce potentiel, les façades et les compositions des parois peuvent être ajustées pour profiter de la ressource. Dans le principe de cette démarche, toutes les ressources de l'environnement peuvent avoir une influence sur les besoins d'un bâtiment, même si aucun dispositif particulier n'est mis en place pour exploiter ces ressources. À partir de la simulation classique d'un bâtiment dans son environnement, on peut non seulement introduire un potentiel de rafraîchissement exploité par le bâtiment, Q_{EXP} , pour rafraîchir l'espace habitable, mais aussi définir un besoin en climatisation, Q_{BES} , en jour.

Enfin, en plus de ces indicateurs absolus, on introduit, à partir du potentiel exploité, deux indicateurs relatifs pour comparer l'aptitude de plusieurs bâtiments ou plusieurs solutions techniques à exploiter les ressources. Il s'agit du taux d'exploitation de la ressource par le bâtiment qui donne le pourcentage du potentiel utile de la ressource effectivement exploité. Ainsi que le taux de couverture associé au besoin de rafraîchissement par la ressource qui donne le pourcentage des besoins couverts par la ressource.

3.4.2 Nécessite de faire évoluer les définitions des potentiels disponibles dans la littérature

Différentes méthodes existent pour évaluer le potentiel de rafraîchissement passif d'un site. Mais, ce serait une faute de ne pas renvoyer au travail de Chesné (Chesné 2012), qui en a jeté toutes les bases et qui est un pilier pour notre étude. Cependant, sa démarche a été développée sur la définition du soleil comme une ressource. Aussi, elle considère que la manière la plus simple de valoriser une ressource, en générale, est de le faire de manière instantanée, ce qui exclut toute possibilité d'optimiser la couverture de ressources par du stockage. Elle tient compte uniquement de la portion d'énergie de la ressource disponible quand il y a besoin d'énergie, or il peut y avoir des déphasages surtout pour des ressources de froid et donc il y a une nécessité de redéfinir sa méthode. En outre, elle compare le comportement du bâtiment dans deux simulations : une simulation classique du bâtiment dans son environnement et une simulation du bâtiment dans un environnement sans la ressource et cela donne une dynamique irréaliste puisqu'on enlève les puits de chaleur qui sont naturellement existants. La nouvelle méthode, simple et généralisable, proposée dans cette étude, est adaptée pour le climat chaud et humide quantifiant à la fois le gisement des ressources et l'exploitation qu'en fait le bâtiment.

3.4.3 Nouvelle approche d'évaluation de potentiels

La ressource ciel : Le gisement de la voûte céleste n'est pas infini : la quantité d'énergie que le bâtiment peut échanger avec le ciel est limitée, ne serait-ce qu'à cause de la surface de l'enveloppe du bâtiment qui est finie. Pour évaluer le potentiel total de rafraîchissement, un capteur de fraîcheur est étudié. Il s'agit d'un système composé d'un panneau radiant avec une surface dont l'émissivité en grande longueur d'onde est élevée. Thermiquement, le panneau peut être considéré comme un volume de contrôle de capacité thermique négligeable. En négligeant les transferts de chaleur par conduction, la surface rayonnante du panneau peut être caractérisée par sa température et sa surface qui représente dans notre cas la totalité de la surface du toit et la moitié des surfaces des murs. Ce capteur fonctionne que pendant la nuit et se refroidit par rayonnement vers le ciel. La fraîcheur peut être stockée via un réservoir de stockage pour ensuite servir à refroidir le bâtiment pendant la journée. Pour estimer grossièrement ce

potentiel, nous supposons l'hypothèse de masse thermique infinie, de manière à ce que toute la fraîcheur fournie par le ciel pendant la nuit puisse être restituée pendant la journée. Par conséquent, la température de stockage est égale à la température intérieure du bâtiment. La fraîcheur stockée pendant une nuit peut, donc, être estimée en considérant la température intérieure du bâtiment et de la température du ciel.

Dans le principe de cette démarche, toutes les ressources de l'environnement peuvent avoir une influence sur tous les besoins d'un bâtiment, même si aucun dispositif particulier n'est mis en place pour exploiter ces ressources. À partir de la simulation classique d'un bâtiment dans son environnement, on calcule un potentiel de rafraîchissement exploité par le bâtiment et intégré sur une journée.

La ressource air : De la même façon que précédemment, le potentiel énergétique de l'air, que l'on qualifie de « total » est calculé en combinant la ventilation et la convection. On définit, à chaque instant le potentiel total de l'air extérieur comme le flux échangé ; d'une part, avec l'air intérieur du bâtiment pour un débit donné de ventilation d'air à une température de consigne de rafraîchissement et d'autre part, avec l'enveloppe du bâtiment. Ce potentiel est égal à la somme du potentiel de ventilation dû à l'effet du vent, du potentiel de ventilation dû à l'effet thermique, ainsi que du potentiel dû à la convection, intégré sur une journée :

La difficulté réside, cependant, dans le calcul de deux renouvellements d'air qui dépendent de très grands nombres de paramètres et qui influent significativement sur le potentiel. Il est possible, d'identifier une configuration permettant d'estimer grossièrement ce potentiel lié au site à partir de l'enveloppe du bâtiment en adoptant la même logique que pour le cas du ciel. Pour faire l'analogie, le panneau radiant et le réservoir de stockage sont remplacés par la surface exposée face au vent du bâtiment, qui sert de capteur de vent et l'effet d'inertie thermique de l'enveloppe du bâtiment (avec une hypothèse de masse thermique infinie) qui sert de stockage de la fraîcheur fournie par la ventilation. On considère donc, une surface sans résistance et totalement « transparente » au vent.

Le potentiel total calculé précédemment correspond au potentiel total global récupérable pour un site donné afin d'assurer une ventilation naturelle à l'échelle urbain, partagé avec l'ensemble des bâtiments, et non à l'échelle du bâtiment lui-même.

En effet, quand les conditions sont favorables, ce potentiel, une fois intégré sur une période donnée (dans notre cas une journée), est très largement supérieure au besoin et ne nous renseigne pas sur le potentiel total local au bâtiment.

Pour évaluer l'aptitude de la ressource air à couvrir les besoins, nous allons utiliser un indicateur développé par Chesné (Chesné 2012) qui limite l'utilité du potentiel total global en valeur. On définit ainsi le potentiel ajusté au besoin de rafraîchissement du bâtiment en l'absence de la ressource air, comme la partie de l'énergie disponible de la ressource air qui permet de couvrir strictement les besoins. Autrement dit lorsque le potentiel total global existe, on ne garde que la valeur écartée par ce besoin. Et lorsque le potentiel total global est nul, on conserve cette valeur. Ainsi, en résumé, le potentiel ajusté est égal pour chaque journée au minimum entre le potentiel total et le besoin de rafraîchissement du bâtiment sans ventilation.

En gardant la même démarche que précédemment, on peut définir la part de la ressource air qui a été exploitée par le rafraîchissement du bâtiment comme la différence à chaque instant entre les besoins avec et sans ventilation, intégrée sur une journée.

La ressource sol : Il est possible, dans ce cas d'évaluer le potentiel total de rafraîchissement du sol avec la même la même logique que précédemment aussi. Ici, l'inertie du sol est utilisée comme « capteur » et un réservoir de stockage récupère le maximum de fraîcheur via un échangeur géothermique. On en

déduit le potentiel total de rafraîchissement du sol en fonction de la température intérieure et de la température du sol à une profondeur qui dépend des contextes géographiques et climatiques.

4. APPLICATION DE L'APPROCHE SUR UN CAS DE BATIMENT TYPE A DJIBOUTI

Les indicateurs présentés dans la section précédente permettent de mettre en avant les caractéristiques principales d'un site et de mettre en évidence l'impact des différentes ressources énergétiques. Cette méthode peut être appliquée au cas particulier d'une maison individuelle sous le climat de Djibouti.

Le bâtiment utilisé pour mettre en œuvre la méthode d'analyse est une maison individuelle typique de Djibouti. Le modèle adopté est constitué d'une seule zone sur un niveau. Le bâtiment d'une superficie de 80 m² a été modélisé grâce à DesignBuilder.

Le confort thermique est assuré dans la zone par un générateur de puissance idéal qui gère le rafraîchissement avec une température de consigne intérieure de $T_R=26^{\circ}\text{C}$. Les valeurs des indicateurs pour tout le bâtiment sont calculées et intégrées d'abord sur l'année, afin d'avoir une vue globale des résultats. Ces derniers, rapportés à la surface habitable de la maison sont présentés dans le Tableau 1 :

	Ciel	Air
Potentiel total	430	-
Potentiel ajusté	-	101
Besoin	623	623
Potentiel exploité	148	61
Taux d'exploitation	34%	60%
Taux d'exploitation maximal	78%	100%

Tableau 1. Valeurs intégrées sur l'année des indicateurs pour le ciel [en kWh/(m².an)].

Plusieurs constats peuvent être tirés de ces valeurs. En premier lieu, le site dispose d'un grand potentiel de rafraîchissement qui pourrait drastiquement réduire les besoins de consommations si son exploitation est optimisée. Cependant, pour la ressource air comme pour le ciel, une comparaison avec la part de ce potentiel exploitée par l'état actuel de ce bâtiment type, donne un taux d'exploitation de la ressource assez faible par rapport au potentiel total (34% d'exploitation sur un maximum de 78 % pour le ciel et 60% d'exploitation pour l'air). En effet, plus le taux d'exploitation est élevé plus la ressource est effectivement utilisée par le bâtiment pour couvrir ses besoins. Ainsi, des faibles taux d'exploitation indiqueront qu'une grande marge de manœuvre est possible dans l'amélioration de la performance bioclimatique des bâtiments.

En restreignant la période d'intégration pour chaque jour dans la Figure 4, le potentiel total du ciel, bien que très variable dans le temps, est donc généralement disponible et le potentiel de l'air s'il est exploité efficacement par le bâtiment, peut couvrir la totalité des besoins de rafraîchissement durant la saison fraîche sauf pour quelques jours exceptionnels. En outre, ces ressources sont intermittentes, puisque leurs potentiels s'annulent lorsque leur température devient supérieure à la température intérieure maximale acceptable. C'est le cas notamment en été. Durant la saison fraîche les besoins sont moins importants, et les potentiels à leur maximum. En été, les besoins sont très importants alors que les ressources sont à leur minimum.

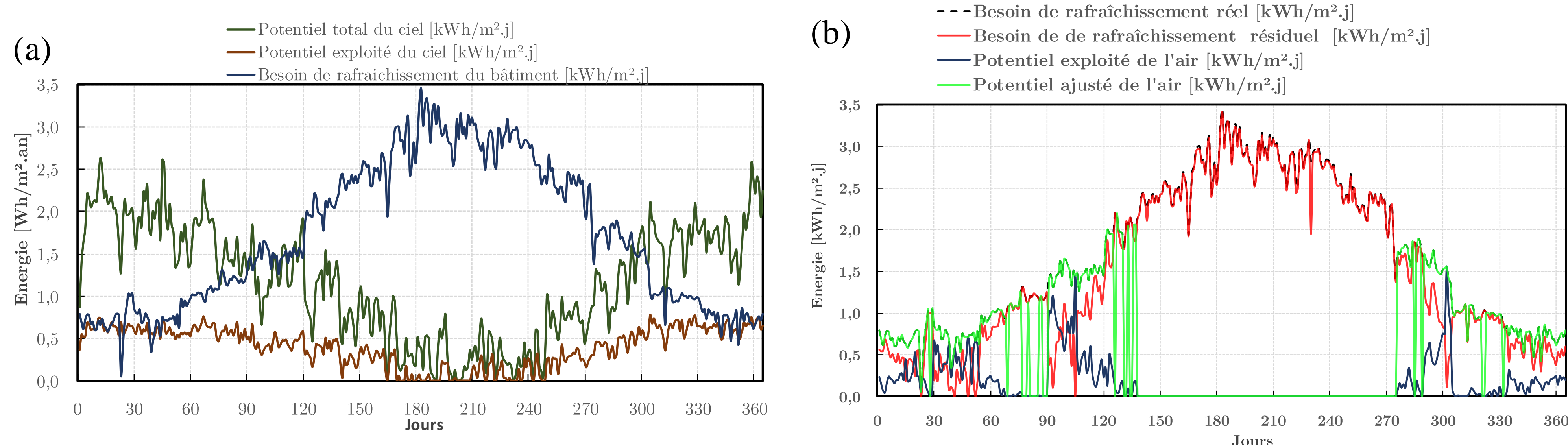


Figure 4 : (a) Indicateurs absolus et besoins de rafraîchissement quotidiens du bâtiment (b) Bilan des potentiels et des besoins journaliers pour la ressource air

Quant au potentiel du sol. En effet avec une surface de jardin S égale à la surface habitable du bâtiment étudié (80 m^2), le calcul du potentiel total, intégré sur une année et rapporté à la surface habitable donne $2 \text{ kWh/m}^2.\text{an}$. Ce potentiel est négligeable comparé aux autres ressources. D'autant plus qu'il n'existe pas de puits « provençal » ou une actuelle exploitation du sol qui pourrait nous servir de calcul de potentiel exploité.

5. CONCLUSION

Une nouvelle méthodologie, simple et généralisable, a été développée pour quantifier la capacité des ressources énergétiques à couvrir la consommation d'énergie pour la climatisation et la possibilité pour le bâtiment de les exploiter. L'application de cette approche sur le cas de Djibouti a montré qu'il existe dans les climats chaud et humide, un potentiel de rafraîchissement satisfaisant pour les ressources ciel et air, mais qu'elles ne sont pas assez exploitées. Ce qui signifie qu'une grande marge bioclimatique est possible dans l'amélioration de la performance des bâtiments.

6. BIBLIOGRAPHIE

- Aflaki, Ardalan, Norhayati Mahyuddin, Zakaria Al-Cheikh Mahmoud, et Mohamad Rizal Baharum. 2015. « A Review on Natural Ventilation Applications through Building Façade Components and Ventilation Openings in Tropical Climates ». *Energy and Buildings* 101 (août): 153-62.
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.04.033>.
- Benhammou, M, et B Draoui. 2015. « Simulation et caractérisation d'un échangeur géothermique à air destiné au rafraîchissement des bâtiments fonctionnant dans les conditions climatiques du sud de l'Algérie ». <http://www.webreview.dz>. 10 mars 2015. <http://www.webreview.dz/spip.php?article2365>.
- Butera, Federico, R Adhikari, et Niccolò Aste. 2015. *CONCEPTION ARCHITECTURALE DURABLE EN MILIEU TROPICAL Principes et applications pour l'Afrique de l'Est*.
- Chesné, Lou. 2012. *Vers une nouvelle méthodologie de conception des bâtiments, basée sur leurs performances bioclimatiques*. Lyon, INSA. <http://www.theses.fr/2012ISAL0092>.
- DISED (Direction de la statistique et des Etudes Démographiques). 2015. *Annuaire Statistique*. Djibouti.
- Draoui, B, Mebarki B, Abdessemed S, Keboucha A, Drici S, et Sahli A. 2015. « Etude d'un système de climatisation intégrant un puits canadien dans les zones arides, cas de Béchar ». <http://www.webreview.dz>. 11 mars 2015. <http://www.webreview.dz/spip.php?article2384&lang=fr>.
- Dunham, Daniel. 1983. *Building for the maritime desert : climate, construction, and energy in Djibouti /*. Arlington, Va. (1815 N. Lynn St., Suite 200, Arlington 22209) : Volunteers in Technical Assistance,.
- Elshafei, Ghada, Abdelazim Negm, Mahmoud Bady, Masaaki Suzuki, et Mona G. Ibrahim. 2017. « Numerical and Experimental Investigations of the Impacts of Window Parameters on Indoor Natural Ventilation in a Residential Building ». *Energy and Buildings* 141 (avril): 321-32.
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.02.055>.

- Givoni, Baruch. 1994. *Passive Low Energy Cooling of Buildings*. John Wiley & Sons.
- Granqvist, C.G., S. Green, G.A. Niklasson, N.R. Mlyuka, S. von Kræmer, et P. Georén. 2010. « Advances in Chromogenic Materials and Devices ». *Thin Solid Films* 518 (11): 3046-53. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2009.08.058>.
- Kottek, 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>.
- Molina, Jose Luis, Evyatar Erell, et Simos Yannas. 2013. *Roof Cooling Techniques: A Design Handbook*. Routledge.
- Omar, Abdou Idris, Joseph Virgone, Etienne Vergnault, Damien David, et Abdoukader Ibrahim Idriss. 2017. « Energy Saving Potential with a Double-Skin Roof Ventilated by Natural Convection in Djibouti ». *Energy Procedia* 140 (décembre): 361-73. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.11.149>.
- Smith, G.B., S. Dligatch, et F. Jahan. 1998. « Angular Selective Thin Film Glazing ». *Renewable Energy* 15 (1-4): 183-88. [https://doi.org/10.1016/S0960-1481\(98\)00151-7](https://doi.org/10.1016/S0960-1481(98)00151-7).

Construction d'un fichier microclimatique urbain utilisable en STD

Nicolas Lauzet^{*1,2,5}, Dasaraden Mauree⁴, Thibaut Colinart², Marjorie Musy^{3,5}, Karine Lapray¹

¹ TRIBU, Bureau d'études en qualité environnementale et développement durable,
103 rue Maréchal de Saxe, 69003 Lyon,

[*lyon@tribu-concevoirdurable.fr](mailto:lyon@tribu-concevoirdurable.fr)

² CNRS FRE 3744, IRDL, Université de Bretagne Sud,
Centre de Recherche Christian Huygens, Rue de Saint-Maudé, 56100 Lorient

³ CEREMA Ouest,

Maison de l'Administration Nouvelle, 9 Rue René Viviani, 44200 Nantes

⁴ LESO-PB, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne,

EPFL - LESO-PB Station 18. CH-1015 Lausanne

⁵ UMR CNRS 6183, GeM, IUT Saint-Nazaire,

42 Avenue Albert de Mun, 44600 Saint-Nazaire

RESUME. Afin d'adapter les bâtiments à leurs environnements et d'améliorer leurs conceptions, il semble pertinent d'apporter de la précision sur les données climatiques qui caractérisent le site d'implantation. En projet de bâtiment, des études de simulations thermiques dynamiques (STD), qui aident à la décision, sont régulièrement réalisées. Jusqu'ici, ces outils utilisent des fichiers mésoclimatiques qui décrivent un climat péri-urbain ou rural, or le microclimat en ville est un phénomène avéré et de plus en plus regardé, notamment pour la santé et le confort des citoyens. A travers le chaînage d'outils CitySim/CIM, cette communication propose une méthode de construction de fichiers microclimatiques utilisable en STD. Un premier cas d'étude sur un îlot du 2ème arrondissement lyonnais (Lyon Confluence) est présenté. Ici, les sollicitations de températures d'air et de vitesses de vents sont calculées à l'échelle locale. Pour les autres sollicitations que sont l'humidité relative de l'air et les rayonnements solaire et infrarouge, des perspectives pour leurs reconstructions sont données.

MOTS-CLÉS : Îlot de chaleur urbain, Chaînage CitySim/CIM, Fichiers microclimatiques annuels

ABSTRACT. Our proposal is to rebuild, at the district scale, a meteorological TMY file from data acquired at the nearest weather station. Our case study is the Confluence district, in Lyon city (France), where we have acquired local climatic data for validation purpose. We start from Lyon Bron airport data, to build local climate files. A chain of two software is used: CitySim and CIM. From the 3D geometry of the district and the types of surface (walls, floors, roofs and grounds), the thermo-radiative tool CitySim calculates the surface temperatures. These latter are then integrated as boundary conditions in CIM model. From these boundary conditions, the district morphology, using the weather files at Lyon Bron station, CIM rebuilds a weather file representing the climate of Confluence and keeping the same format than a TMY (Meteonorm) file. CIM is a 1D (vertical) model where air temperature, wind speed and direction are calculated every 3 meters high and are considered homogenous in each mesh element.

KEYWORDS : Urban heat island, CitySim/CIM chaining, Microclimate annual file

1. INTRODUCTION

Le réchauffement climatique, l'augmentation de la population mondiale et sa migration vers les villes sont autant d'éléments qui définissent le contexte dans lequel nous vivons aujourd'hui et auxquels nous devons nous adapter afin de réduire nos impacts environnementaux et sociaux. Pour ce faire, une transition des modes de vie est primordiale à tous les niveaux. Le secteur du bâtiment suit cette transition, des réglementations et labels poussent à la performance environnementale. Basée sur le principe que la meilleure énergie est celle que l'on ne consomme pas, la conception bioclimatique repose sur des enveloppes de bâtiments optimisées qui captent au maximum les apports passifs du site d'implantation. Cette approche bioclimatique est aidée par l'utilisation de Simulations Thermiques Dynamiques (STD). En conception bioclimatique, l'une des données d'entrée majeure du modèle de bâtiment est le climat (température, vent, ensoleillement, etc.), qui est généralement issu de fichiers météo construits à partir de mesures faites dans des stations météorologiques aéroportuaires. Or, des études récentes ont mis en évidence que ces données climatiques sont différentes en zones urbaines (Bernard et al. 2017; Le Bras 2015). Dès lors, il semble pertinent d'évaluer ces conditions climatiques urbaines afin d'adapter au mieux la conception des bâtiments en ville.

L'objectif de cette communication est d'explorer le chaînage CitySim (Walter and Kämpf 2015) / CIM (Mauree et al. 2017) pour reconstruire un fichier météo de type TMY à l'échelle d'un îlot urbain à partir d'un fichier TMY d'une station météo aéroportuaire. Ce type de fichier climatique, fournissant des données heure par heure sur une année complète, est utilisé en STD lors de la phase de conception d'avant-projet (phase AVP).

Un premier cas d'étude réalisé sur l'agglomération lyonnaise est présenté. Il consiste à construire, à partir d'un fichier de mesures Météo France de la station de Lyon Bron, un fichier microclimatique caractérisant un îlot urbain de Lyon Confluence (2^{ème} arrondissement) (Figure 1).



Figure 1 : Principe de la reconstruction des données climatiques de Lyon Bron à Lyon Confluence

2. PRESENTATION DU CAS D'ETUDE

Le cas d'étude retenu est une zone de 54 hectares (environ 800 x 700 m) située dans la ZAC Lyon Confluence (Figure 2). Ce quartier est bordé par la Saône à l'est et le Rhône à l'ouest et est en plein développement urbain depuis le début des années 2000. En tant qu'assistant à la maîtrise d'ouvrage à l'échelle de la ZAC, la société TRIBU possède à ce titre beaucoup d'informations sur ce quartier et sur les bâtiments qui s'y construisent.



Figure 2 : Bornage du cas d'étude de Lyon Confluence et localisation des stations météo urbaine et aéroportuaire (Lyon Bron)

De plus, une campagne de relevé météorologique a été réalisée entre 2013 et 2015. Au niveau de la scène urbaine, la température et l'humidité relative de l'air ainsi que les vitesses et directions de vent ont été collectées par une balise météo posée sur un toit à 8m de hauteur. Sa localisation est précisée sur la Figure 1. En parallèle, les données météo issues de la station Météo France de Lyon Bron (mesures sur un mat à 10m en zone aéroportuaire) ont été récupérées. Les deux stations sont séparées d'environ 10 km.

A titre d'exemple, les moyennes de températures relevées sur les deux sites pour différentes périodes de l'année 2013 – ainsi que la moyenne des écarts – mettent bien en évidence le phénomène d'îlot de chaleur urbain (Tableau 1) : un écart moyen annuel de plus de 1 °C est constaté entre Lyon Confluence et Lyon Bron. Par ailleurs, les différences les plus importantes (de l'ordre de 2 °C) sont relevées en été et la nuit.

Période d'étude	Température moyenne [°C]		Delta moyen de température entre Lyon Confluence et Lyon Bron [°C]		
	Lyon Bron	Lyon Confluence	Jour	Nuit	Global
Annuelle	12,15	13,24	+0,25	+1,78	+1,09
Hivernale	3,52	4,75	+0,81	+1,59	+1,20
Estivale	21,09	22,14	-0,13	+1,90	+1,06

Tableau 1 : Analyse des mesures de l'îlot de chaleur urbain de Lyon Confluence sur 2013

3. DEMARCHE DE CONSTRUCTION D'UN FICHER METEOROLOGIQUE LOCAL

La démarche de construction d'un fichier météorologique local est basée sur le chaînage CitySim/CIM et se fait en trois temps (Figure 3) :

- Création d'une maquette 3D de la scène urbaine ;
- Évaluation des températures de surface urbaine à l'aide de CitySim ;
- Calcul des variables climatiques locales (vitesse et direction de vent, température d'air) à l'aide de CIM.

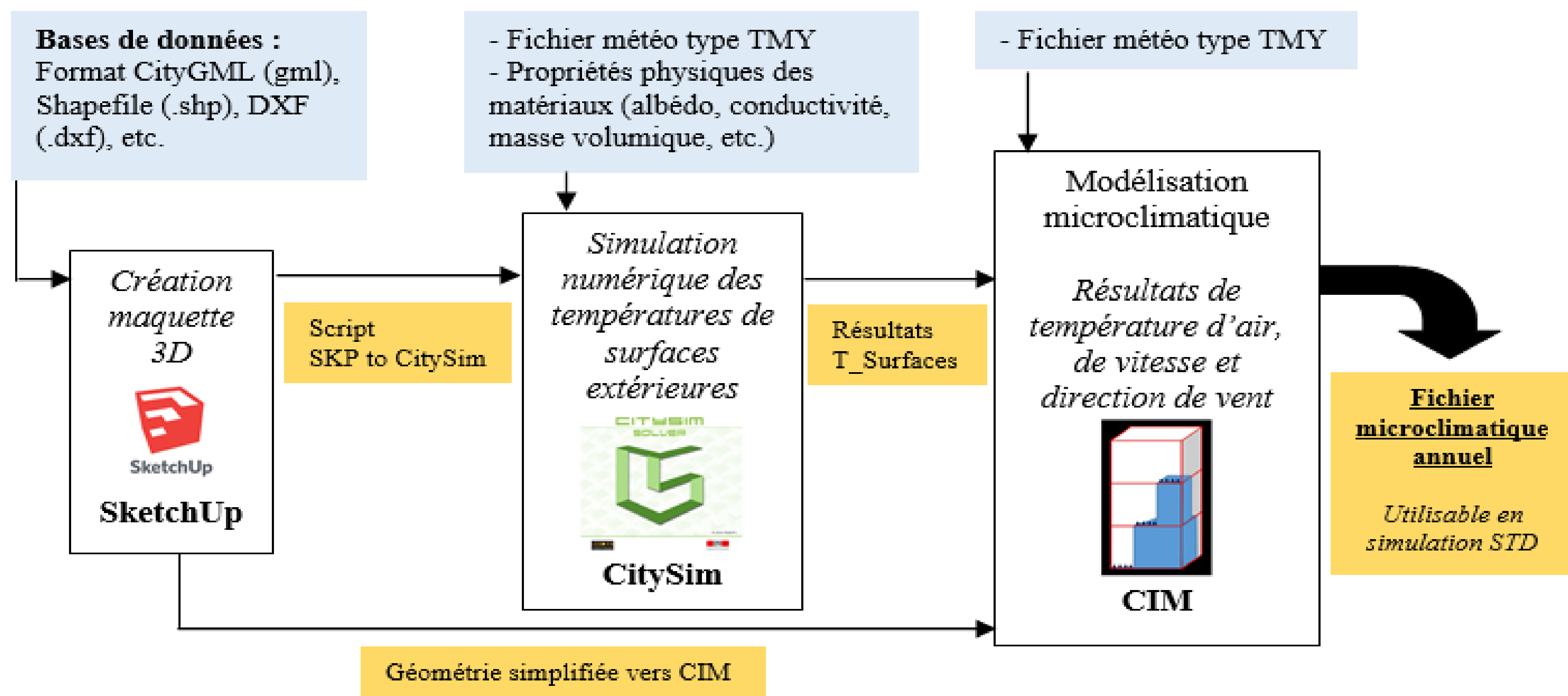


Figure 3 : Démarche de construction d'un fichier microclimatique horaire annuel

3.1. CONSTRUCTION DE LA MAQUETTE 3D

La création de la maquette 3D de la scène urbaine se décompose en deux parties : définition de la morphologie du site, puis attribution des différentes typologies de surface. Ici, la maquette 3D a été réalisée sous SketchUp (Figure 4) à partir d'une base de données au format standard international CityGML mise à disposition en open data par l'agglomération du Grand Lyon. Cette base de données datant de 2012 et Confluence étant un quartier en plein renouveau, de nombreux bâtiments manquants ont été ajoutés manuellement (en rose sur la Figure 4). Dans cette maquette, les bâtiments sont représentés avec un niveau de détail LoD 2, c'est-à-dire en représentant des volumes avec les pentes éventuelles des toits. Dans un second temps, les différentes typologies de sols sont intégrées, ce qui permettra d'affecter des caractéristiques (albédos) adaptées aux différentes surfaces (bitumées, bétons, enherbées, etc...).

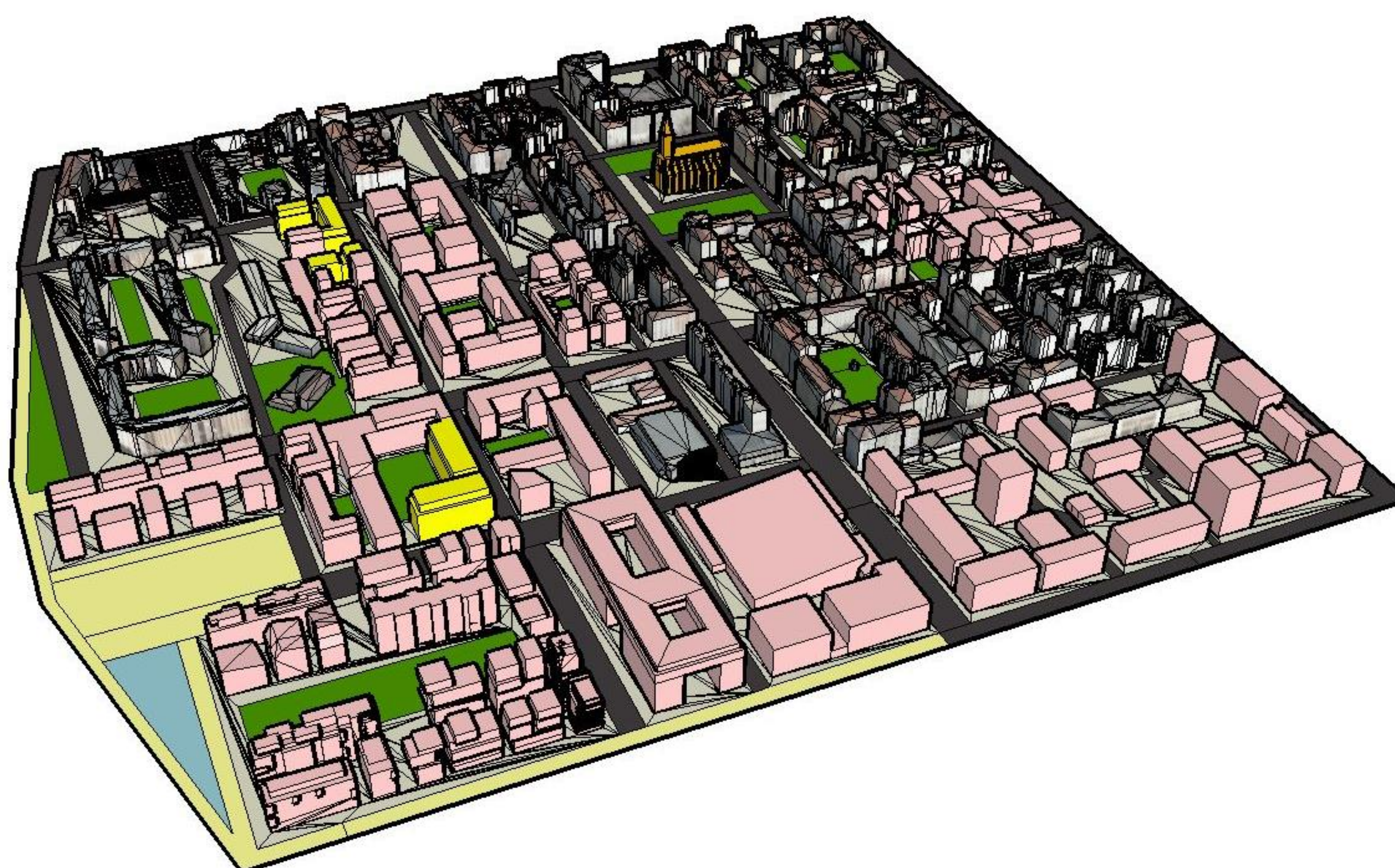


Figure 4 : Maquette SketchUp du cas d'étude de Lyon Confluence

3.2. SIMULATION CITYSIM

Le logiciel CitySim est un programme de simulation des flux d'énergie en milieu urbain. Il contient d'une part un modèle de radiativité et d'autre part un modèle de thermique du bâtiment basé sur une analogie électrique.

Le premier modèle est utilisé pour calculer les contributions directes et indirectes des rayonnements solaires (CLO) et infrarouges (GLO) sur toutes les surfaces urbaines. Pour cela, il convient dans un premier temps de transférer la maquette provenant de SketchUp vers CitySim : ceci est possible via un plug-in et un format de fichier en .dxf. Dans un second temps, il faut redéfinir les propriétés radiatives des surfaces. Ici, cinq types de surfaces ont été définies (Tableau 2).

Asphalte	0,1
Béton clair, pavés	0,25
Pelouse	0,3
Sol stabilisé	0,5
Façades et toits bâtiments	0,2

Tableau 2 : Albédos des surfaces extérieures de la scène urbaine

Le second modèle tient compte des échanges entre un bâtiment et son environnement extérieur. Les échanges convectifs avec l'air extérieur sont évalués en utilisant la température d'air du fichier météo mésoclimatique (Lyon Bron pour cette étude). En ce qui concerne les transferts conductifs dans l'enveloppe des bâtiments, deux niveaux d'isolation des bâtiments sont définis dans le Tableau 3, la distinction se faisant selon l'année de construction.

	Type d'isolation	U_{mur}	U_{toit}	$U_{\text{plancher bas}}$	U_w	g
		W/(m ² .K)	W/(m ² .K)	W/(m ² .K)	W/(m ² .K)	-
Bâtiments avant 2012	Intérieure	0,4	0,3	0,7	2,0	0,8
Bâtiments après 2012	Extérieure	0,17	0,10	0,20	1,4	0,6

Tableau 3 : Niveaux d'isolation des bâtiments.

Une simulation effectuée sur chaque heure de l'année est réalisée en trente heures avec un ordinateur portable ayant un processeur Intel CORE i7. La Figure 5 illustre un exemple de températures de surfaces calculées le 2 juillet 2013 à midi à Lyon Confluence. On constate que les températures de surfaces s'élèvent à plus de 60°C sur certaines surfaces bitumées et toitures, du fait que ces surfaces soient peu masquées et du fait d'une très forte absorption de l'énergie solaire.

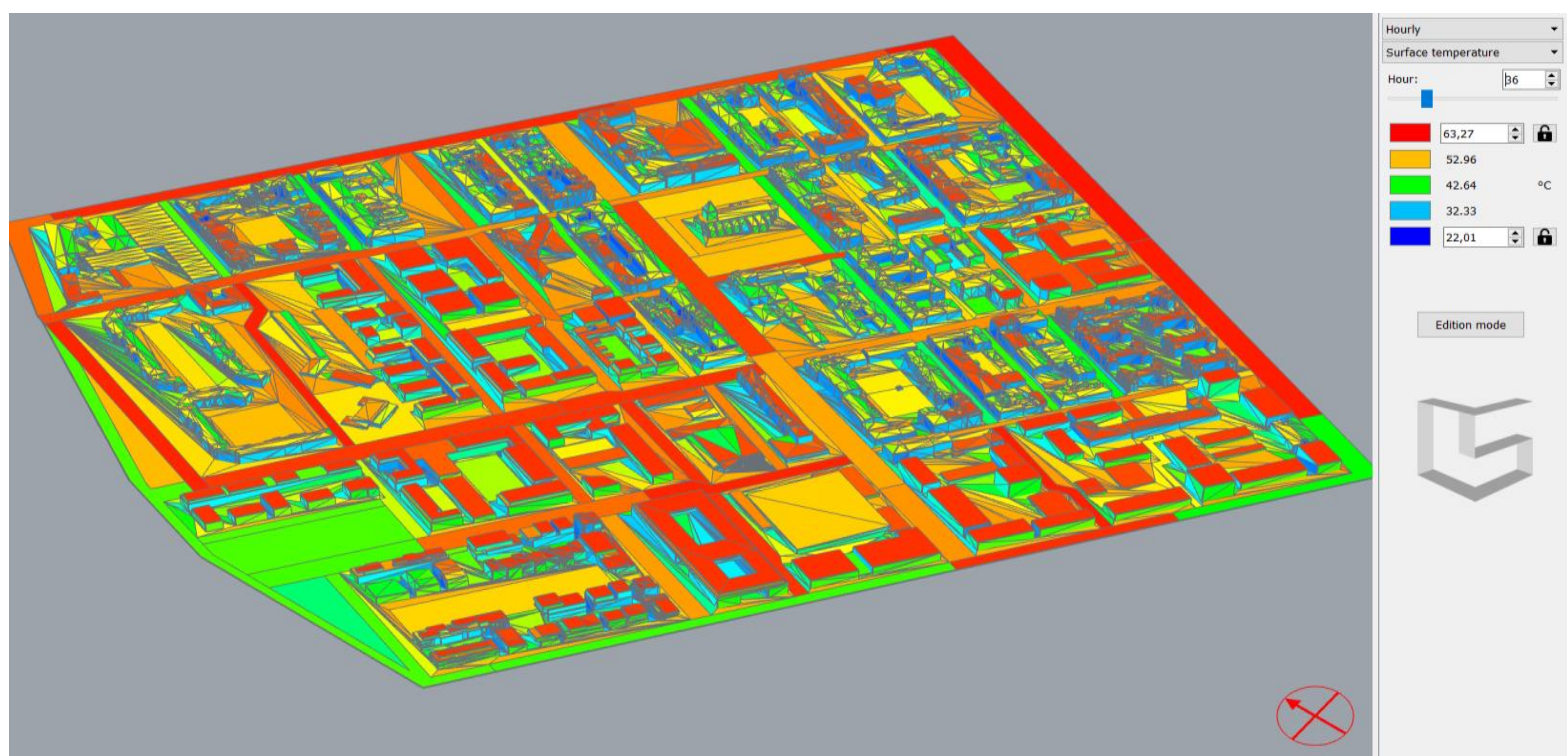


Figure 5 : Températures de surfaces au 2 juillet 2013 à midi à Lyon Confluence

3.3. SIMULATION CIM

Le logiciel CIM est basé sur un modèle de canopée urbaine qui décrit les échanges thermiques et d'énergie cinétique turbulente en 1D vertical. Cette approche simplifiée permet de s'affranchir de la résolution d'équations de mécanique des fluides sur un maillage fin qui demande des ressources de calculs trop importantes pour simuler les 8760 pas de temps horaires d'une année.

Ici, la scène urbaine est réduite à un empilement de mailles de calcul de 3m de hauteur, dans laquelle coexistent des volumes d'air et des volumes bâtis (Figure 6). Au sein de chaque maille, la morphologie des bâtiments et les échanges convectifs avec ses surfaces sont pris en compte. La modélisation avec CIM permet ainsi d'évaluer pour chaque heure de l'année une température d'air, une vitesse et une direction du vent, supposées homogènes dans chaque maille.

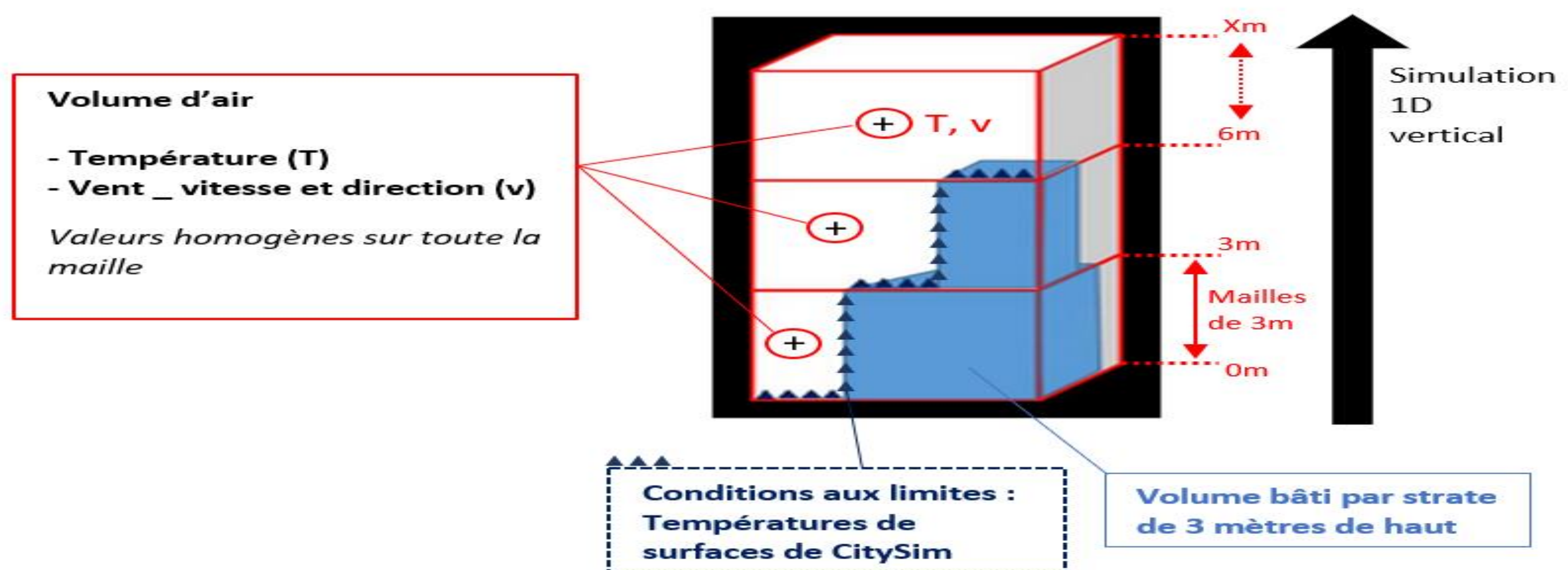


Figure 6 : Principe de modélisation de CIM (Mauree et al. 2017)

4. RESULTATS ET ANALYSES

Les Figures 7 et 8 exposent respectivement une représentation statistique mensuelle sous forme de « Box plot » des vitesses de vent et des températures d'air mesurées et simulées pour les mois de janvier et de juillet 2013. Cette représentation inclut les valeurs des quartiles 1, 2 et 3 des jeux de données météorologiques ainsi que les valeurs minimales et maximales.

4.1. RESULTATS DES VITESSES DE VENT

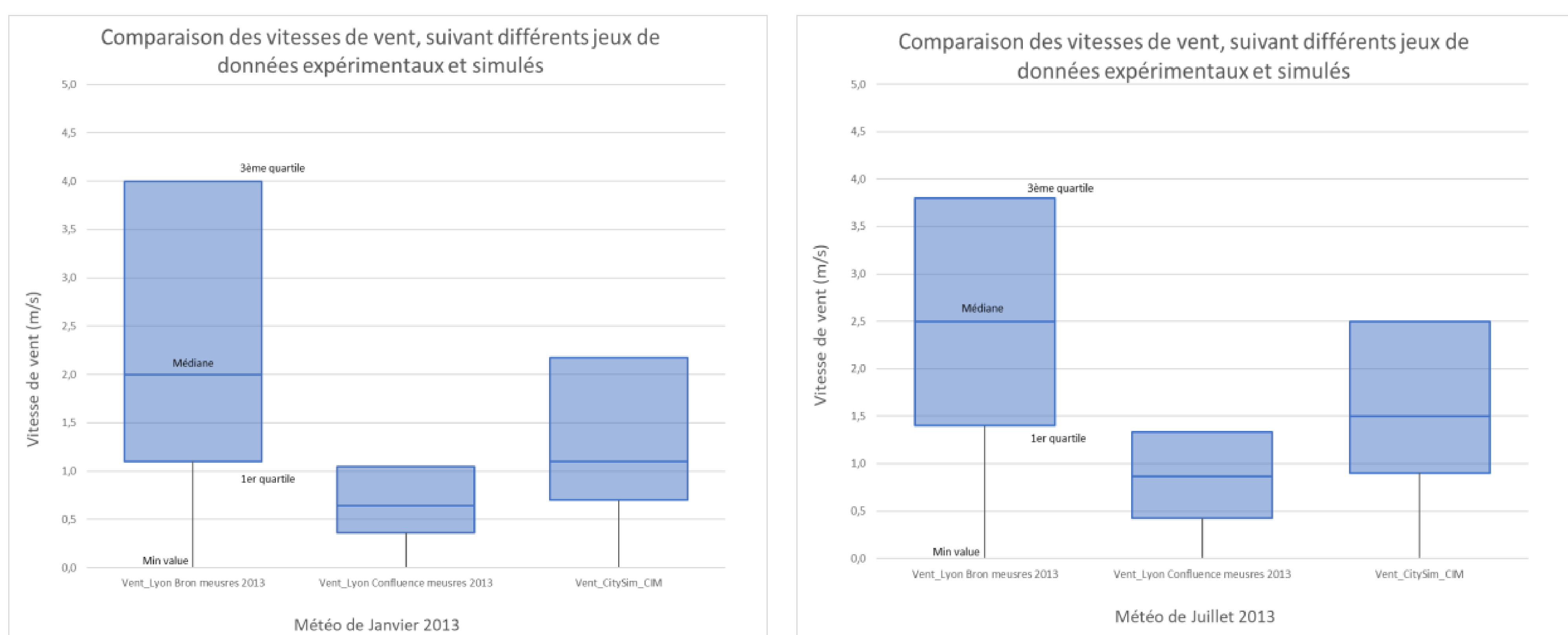


Figure 7 : Comparaison des vitesses de vent mesurées à Bron et Confluence et simulées dans CIM, pour les mois de janvier et juillet 2013

Comparaison des données climatiques suivantes :

Lyon Bron : station Météo France, mesures à 10m (zone péri urbaine)	Lyon confluence : balise météo, mesures à 8m (zone urbaine), voir Figure 2	CitySim_CIM : Simulation du cas d'étude de Confluence à partir des données de Lyon Bron. Résultats de la maille comprise entre 6m et 9m.
--	---	---

Tant en janvier qu'en juillet 2013, les résultats montrent une reconstruction intéressante de la variable locale « vitesse de vent » dans CIM (Figure 7). Par exemple, la série de mesures à Lyon Bron possède une médiane de 2 m/s sur le mois de janvier, quand celle de Lyon Confluence est à 0,65 m/s. CIM reconstruit un jeu de données avec une médiane à 1,1 m/s.

4.2. RESULTATS DES TEMPERATURES EXTERIEURES DE L'AIR

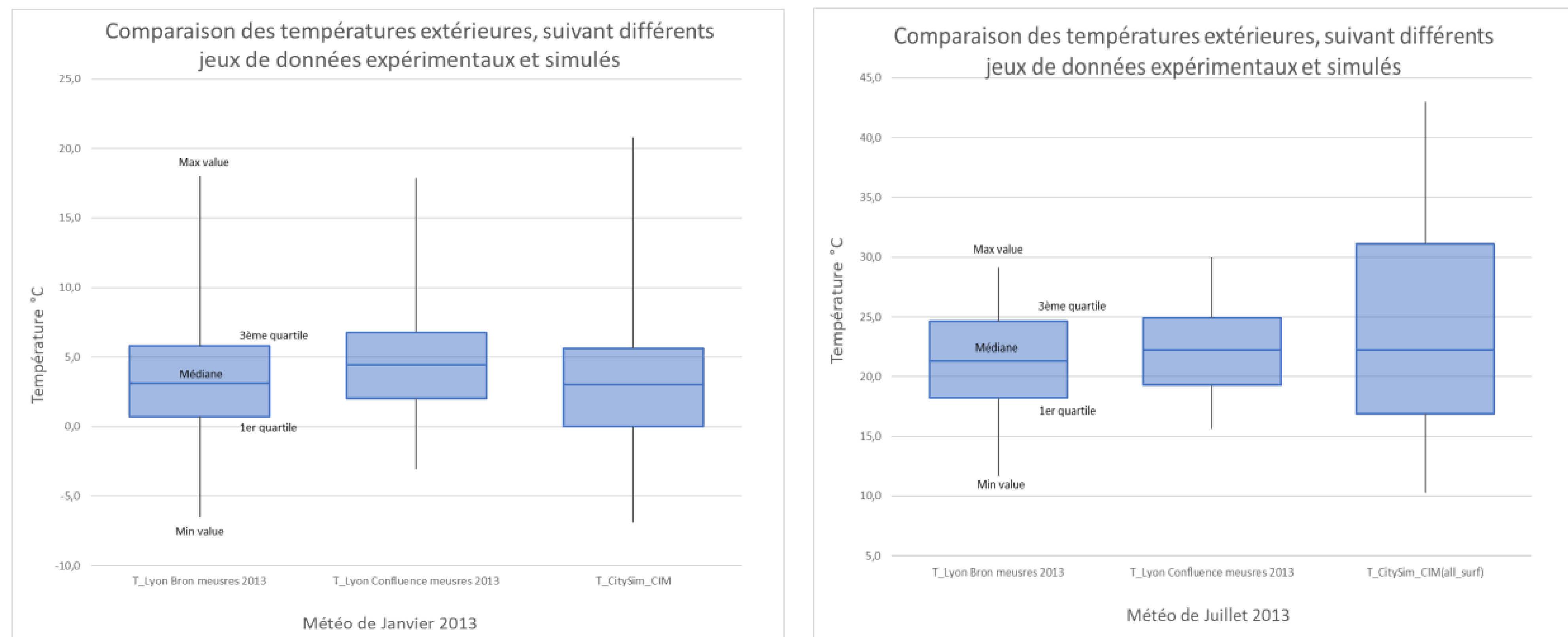


Figure 8 : Comparaison des températures extérieures de l'air mesurées à Bron et Confluence et simulées dans CIM, pour les mois de janvier et juillet 2013

La reconstruction de la variable « température d'air » n'est pas pleinement satisfaisante : en janvier, les résultats de simulation ne mettent pas en évidence d'effet d'îlot de chaleur urbain, contrairement à ce qui est observé expérimentalement (Figure 8). La raison principale qui explique ces difficultés se trouve au niveau des températures de surfaces calculées dans CitySim, qui sont plus basses que la température de l'air la nuit, dû à des déperditions par infrarouges importantes. Par ailleurs, si l'effet d'îlot de chaleur est illustré en juillet, on remarque une forte amplitude de la température simulée. Cette amplitude suit l'allure des températures de surfaces obtenues dans CitySim, ce qui nous amène à dire que la température calculée dans CIM est trop sensible aux températures de surfaces issues de CitySim. Par conséquent, un travail de calage de cette donnée surfacique est nécessaire pour permettre une reconstruction cohérente de la température extérieure dans CIM.

5. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Ce travail propose une méthode pour construire un fichier microclimatique exploitable en STD. La première partie de ce travail a été la création d'une maquette 3D sous SketchUp, à partir notamment de données open data CityGML. Après un export de cette 3D vers CitySim et une paramétrisation des propriétés physiques des surfaces de la maquette, des calculs d'échanges radiatifs et de températures de surfaces extérieures ont été réalisés. Les mois de janvier et de juillet ont été étudiés d'après un fichier mésoclimatique (mesures de la station Météo France à Lyon Bron) de 2013. Par chaînage, ces valeurs de températures de surfaces ont ensuite été transmises à l'outil microclimatique CIM. Pour le

cas d'étude du quartier de Lyon Confluence, CIM a permis de recalculer, localement, en 1D vertical les vitesses de vent et les températures de l'air tous les 3 mètres de haut et ce pour les 8760 heures de l'année. Les valeurs de températures et de vitesses de vent obtenues sont considérées homogènes sur toute la maille de calcul. Par rapport aux mesures faites sur site (à 8m), des résultats satisfaisants ont été obtenus pour la reconstruction de la donnée « vitesse de vent », qui est bien freinée par les obstacles urbains (résultats de la maille entre 6m et 9m). Pour la température de l'air, des améliorations sont à prévoir afin d'avoir des résultats cohérents avec les observations expérimentales qui mettent bien en avant l'effet d'îlot de chaleur urbain tout au long de l'année.

L'une des perspectives de ce travail sera la prise en compte de l'évapotranspiration de la végétation du quartier Confluence avec une reconstruction de la variable climatique « humidité relative de l'air » dans CIM, ce qui permettra de compléter la reconstruction d'un fichier météo à l'échelle locale.

Une autre idée intéressante, les résultats des températures de surfaces CitySim – couplées aux valeurs de vitesses de vent calculés dans CIM – pourraient permettre de calculer des indicateurs de confort en espaces extérieurs tel que l'indicateur UTCI. Cette donnée serait pertinente et précieuse pour les aménageurs urbains.

6. BIBLIOGRAPHIE

- Bernard, Jérémy, Marjorie Musy, Isabelle Calmet, Erwan Bocher, and Pascal Kéravec. 2017. "Urban Heat Island Temporal and Spatial Variations : Empirical Modelling from Geographical and Meteorological Data." *Building and Environment* In press.
- 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>.
- Dumas, Jean-Pierre, Stéphane Gibout, Laurent Zalewski, Kevyn Johannes, Edwin Franquet, Stéphane Lassue, Jean-Pierre Bedecarrats, and Pierre Tittlein. 2012. "Nécessité de L'interprétation Correcte de La Calorimétrie Pour L'utilisation Des Matériaux à Changement de Phases (MCP)." In *SFT 2012*, 2:575–82. Bordeaux.
- Le Bras, Julien. 2015. "Le Microclimat Urbain à Haute Résolution: Mesures et Modélisation." Toulouse 3.
- Mauree, Dasaraden, Nadege Blond, Manon Kohler, and Alain Clappier. 2017. "On the Coherence in the Boundary Layer: Development of a Canopy Interface Model." *Frontiers in Earth Science* 4. <https://doi.org/10.3389/feart.2016.00109>.
- Peuportier, Bruno. 2003. *Eco-Conception Des Bâtiments: Bâtir En Préservant L'environnement*. Sciences de La Terre et de L'environnement. Paris: les Presses de l'Ecole des mines.
- Spitz, Clara, Laurent Mora, Etienne Wurtz, and Arnaud Jay. 2012. "Practical Application of Uncertainty Analysis and Sensitivity Analysis on an Experimental House." *Energy and Buildings* 55 (December): 459–70. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.08.013>.
- Walter, Emmanuel, and Jérôme Henri Kämpf. 2015. "A Verification of CitySim Results Using the BESTEST and Monitored Consumption Values." *Proceedings of the 2nd Building Simulation Applications Conference*, 215–22.

Li-BIM: un modèle cognitif avancé simulant le comportement de l'occupant et son confort à partir d'une maquette numérique

Alice Micolier ^{*1}, Franck Taillandier¹, Patrick Taillandier ², Frédéric Bos¹

¹ Univ. Bordeaux, I2M, CNRS, UMR 5295, France

² MIAT, INRA, UR875, France

*alice.micolier@u-bordeaux.fr

RESUME. La conception des bâtiments est porteuse de nombreux enjeux et notamment la meilleure prise en compte de l'utilisateur. Différents modèles de comportement des occupants pouvant s'interfacer avec des outils de simulation de bâtiment (thermique, qualité de l'air, éclairage, etc.) ont été proposés. Parmi ceux-ci les modèles basés sur l'approche agent semblent les plus prometteurs. Toutefois, les modèles existants restent assez pauvres pour simuler la cognition humaine. De plus, ils sont souvent uniquement tournés vers un usage spécifique sans être transposable à un autre domaine. Cet article propose un modèle agent autonome appelé Li-BIM, permettant de simuler le comportement d'occupant dans un bâtiment. Li-BIM est structuré autour d'un modèle agent permettant d'intégrer une maquette numérique 3D du bâtiment et un modèle cognitif évolué d'occupant sous une architecture Belief-Desire-Intention. Le modèle a été implémenté sous GAMA et l'article propose l'application à un cas d'étude.

MOTS-CLÉS : Comportement occupant, Modèle agent (ABM), Building Information Modeling (BIM)

ABSTRACT. Building design involves many challenges and is particularly important to take into account the user. Different occupant behavior models implemented with building simulation tools (thermal, air quality, lighting, etc.) have been proposed. Among these ones, models based on the agent approach seem to be the most promising. However, existing models poorly describe human cognition. Moreover, they are often oriented towards a specific use (thermal simulation, waste management, etc.) without being transposable to another field. This article proposes a model of autonomous agent called Li-BIM, simulating the behavior of occupants in a building. Li-BIM is structured around a numerical representation of the building and an evolved occupational cognitive model developed with a Belief-Desire-Intention architecture. The model has been implemented under GAMA and the article provides an example of the application of this model.

KEYWORDS: User behaviour, Agent based model (ABM), Building Information Modeling (BIM)

1. INTRODUCTION

La conception des bâtiments est porteuse de nombreux enjeux, qu'ils soient environnementaux (consommation énergétique, potentiel de changement climatique, etc.), sociaux (confort, qualité d'usage, etc.) ou économiques (coût d'investissement, coût d'exploitation, etc.). Pour répondre à ces défis, de nombreux travaux de recherche se sont attachés à améliorer les dispositifs techniques (matériaux, équipement, etc.) et les paramètres situationnels (volume, orientation, etc.). Cependant, des performances optimales ne peuvent être obtenues à travers le seul prisme de ces considérations techniques. En effet, le comportement des occupants et leur utilisation du bâtiment ont un fort impact sur la performance du bâtiment (consommations énergétiques, qualité d'air intérieur, etc.). Ainsi, un

enjeu émergent de conception est la meilleure prise en compte de l'usager, qu'il soit locataire ou propriétaire dans un immeuble résidentiel, ou employé dans un immeuble de bureau. Cela sous-tend deux questions : (a) quel est l'impact de l'occupant et de son comportement sur le fonctionnement du bâtiment et (b) quels sont les choix de conception qui permettent d'améliorer le fonctionnement du bâtiment (impact environnemental, satisfaction de l'usager, etc.) tout en prenant en compte le comportement de l'occupant.

Ces questions sont présentes dans différents domaines de la conception de bâtiment (qualité de l'air (Andersen, Fabi, and Corgnati 2016), éclairage (Heydarian et al. 2016), etc.) et notamment dans le domaine thermique/énergétique où la question de l'occupant est particulièrement cruciale. En effet, de nombreuses études (Calì et al. 2016) ont démontré qu'il existait un écart important entre la consommation énergétique simulée et celle réellement mesurée dans les bâtiment en exploitation, en raison, en grande partie, du comportement des occupants (Hoes et al. 2009). Afin d'améliorer cet aspect, différents modèles de comportement des occupants pouvant s'interfacer avec des outils de simulation thermique ont été proposés. Parmi ceux-ci, on peut citer les modèles basés sur des approches probabilistes (Jang and Kang 2015), l'approche agent (Klein et al. 2012), des analyses statistiques (Peng et al. 2012) et la fouille de données (D'Oca and Hong 2015). L'approche agent semble la plus prometteuse pour simuler le comportement des occupants de bâtiment (Langevin, Wen, and Gurian 2015). En effet, elle permet une modélisation intuitive et naturelle facilitant la participation de non-informaticiens dans la construction de modèles. L'approche agent est basée sur un modèle versatile propre à modéliser une grande variété de phénomène. Elle est particulièrement adaptée à la modélisation des systèmes complexes dynamiques, et notamment les systèmes humains et sociaux avec une forte capacité d'adaptation, de réaction et d'interaction induisant de l'émergence.

Si des modèles agents ont déjà été développés pour modéliser le comportement d'occupants de bâtiments, ceux-ci restent encore limités. D'une part, la modélisation de la cognition des occupants dans ces modèles agent est souvent assez pauvre. Par ailleurs, les modèles sont généralement limités à un seul usage spécifique (uniquement la simulation thermique par exemple). Enfin, leur usage nécessite d'entrer les caractéristiques du bâtiment et des occupants sans interface dédiée, limitant leur opérationnalité. Pour répondre à cela, nous avons développé le modèle Li-BIM (Life in BIM), permettant de simuler le comportement d'occupants dans un bâtiment. Ce modèle et son implémentation sont exposés dans les parties suivantes.

2. DESCRIPTION GENERALE DU MODELE

Afin de répondre au triple enjeu : modèle cognitif avancé, interopérabilité, accessibilité aux non informaticiens, le modèle Li-BIM est structuré autour d'un modèle Agent (Fig. 1) intégrant une maquette numérique BIM (Building Information Modeling) du bâtiment et une architecture Belief-Desire-Intention (BDI) pour la modélisation cognitive des occupants. Le modèle a été implémenté sous la plateforme multi-agent GAMA (Grignard et al. 2014) qui possède une intégration de l'architecture BDI et une bibliothèque permettant d'importer le format IFC (Industrial Foundation class), standard d'échange des fichiers BIM. Des modèles physiques (par exemple modèle thermique, qualité de l'air) peuvent être soit couplés soit modélisés directement au sein du modèle agent.

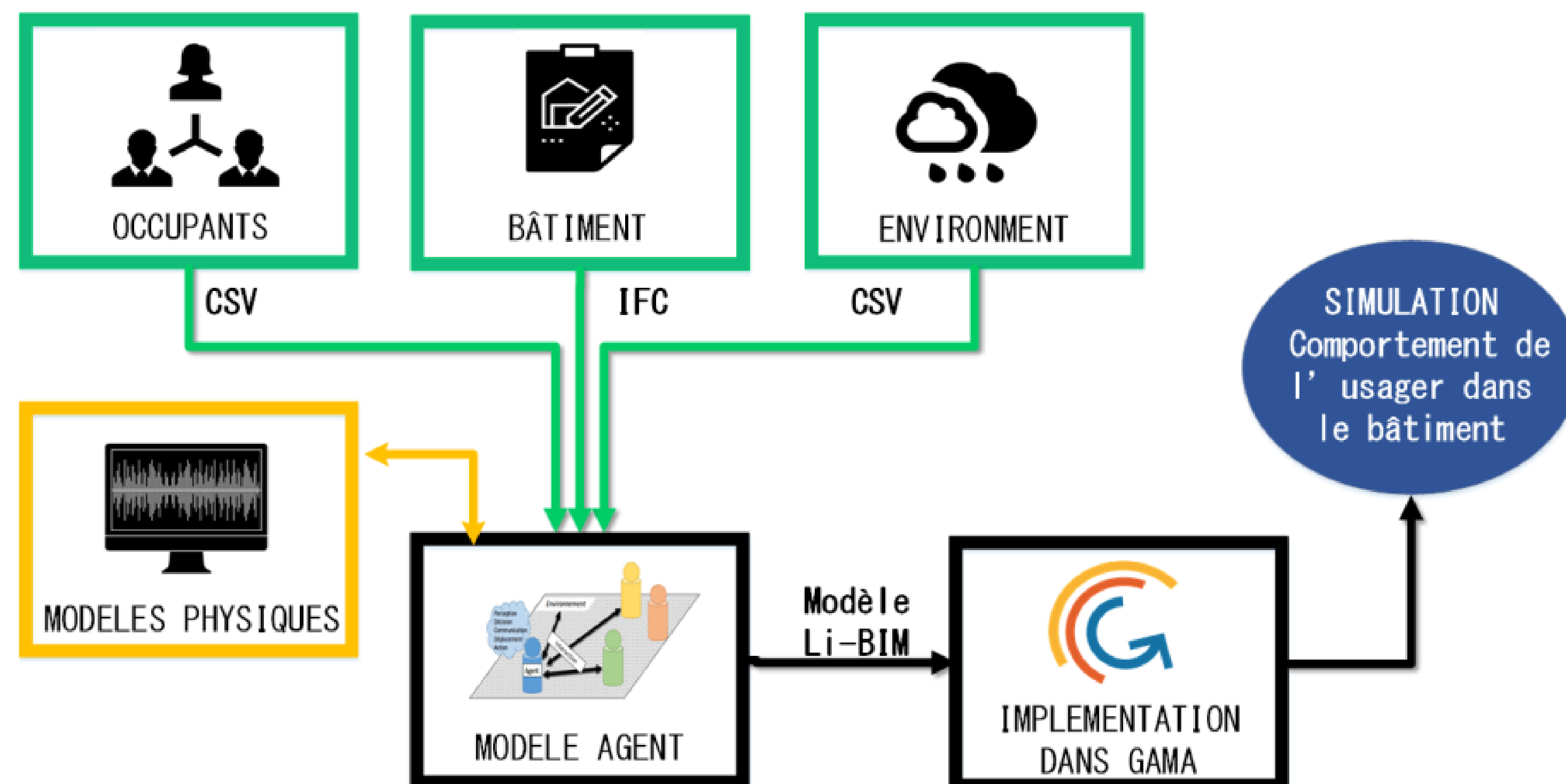


Figure 1 : Méthodologie du modèle agent Li-BIM

2.1. DONNEES D'ENTREE : FICHIERS IFC ET DONNEES ENVIRONNEMENTALES

La maquette numérique est en plein essor ; elle présente un fort potentiel pour faciliter la coordination entre les différents acteurs et le suivi de l'ouvrage. L'intégration directe de la maquette numérique dans notre modèle permet d'assurer l'interopérabilité entre différents outils et une description facilitée du bâtiment. Par son usage des fichiers d'échanges standardisés IFC, Li-BIM permet à son utilisateur de concevoir un bâtiment sous un outil classique BIM (Revit, Allplan, etc.) et d'importer directement le fichier IFC obtenu sous Li-BIM. Les paramètres d'entrées de Li-BIM permettent également de décrire l'environnement dans lequel s'inscrit le bâtiment et qui sont utilisés par les modèles physiques (fichiers météo, données d'ensoleillement, pics de pollutions, etc.).

2.2. AGENTS

La simulation multi-agents repose sur la modélisation d'un ensemble d'entités autonomes, appelés agents, évoluant dans un environnement dynamique. Le modèle Li-BIM contient deux familles d'agent : les occupants et le bâtiment (Fig. 2). Tous les objets composants le bâtiment dans le fichier IFC sont transformés en agent. Ils disposent des attributs établis dans le BIM ; un objet « Mur » est transformé en agent « Mur » disposant de la même épaisseur, de la même composition, etc. Les agents peuvent avoir des capacités cognitives (occupant) lui permettant de prendre des décisions ou de simplement suivre des lois préétablies (radiateur). Chaque agent a sa propre vision du système, son propre comportement, ses propres objectifs et sa propre façon d'interagir avec le système. La complexité du système émerge alors de l'ensemble des interactions entre les agents.

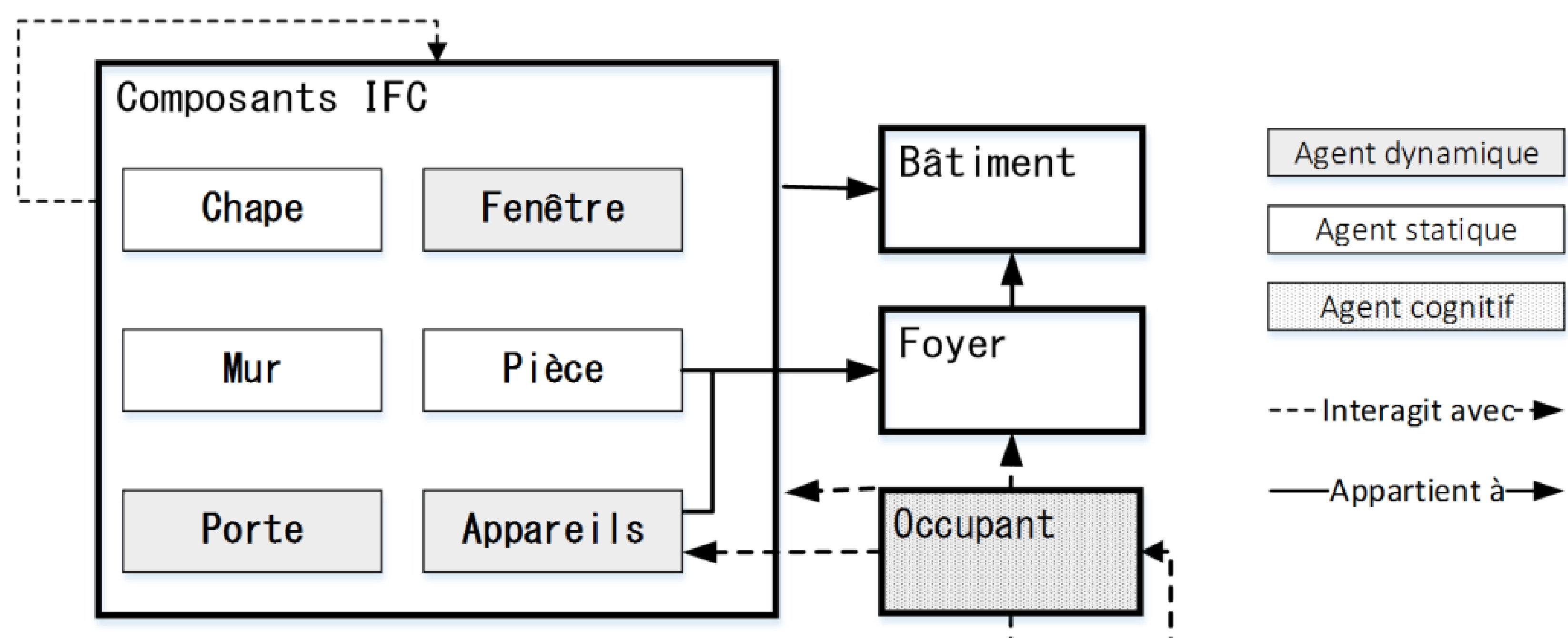


Figure 2 : Représentation des agents du modèle Li-BIM

2.3. DYNAMIQUE DU MODELE

Le pas de temps de la simulation peut être défini par l'utilisateur en fonction de la précision requise dans la mesure où toutes les variables sont exprimées à partir de ce paramètre. Chaque étape de simulation suit le processus décrit Figure 3. Tout d'abord, le modèle met à jour les données environnementales contenues dans les fichiers environnementaux importés au format CSV. Deuxièmement, sur la base de ces données environnementales, les données de construction (c'est-à-dire les paramètres dynamiques des agents composant IFC et bâtiment) sont mises à jour. Les nouvelles valeurs de ces paramètres sont calculées grâce aux modèles physiques. Ces caractéristiques peuvent être affectées par les actions précédemment effectuées par les occupants (par exemple l'ouverture de fenêtres). Enfin, les attributs de l'occupant concernant son état physique / psychologique (confort, fatigue, faim, etc.) sont mis à jour.

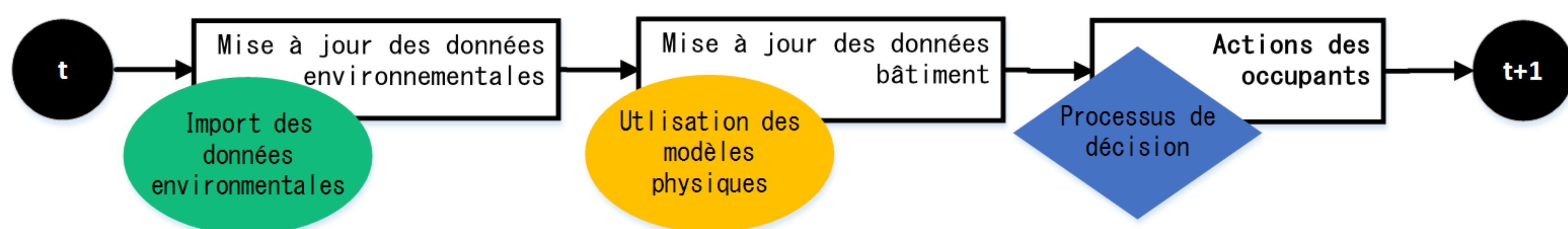


Figure 3 : Dynamique du modèle Li-BIM

2.4. SORTIES DU MODÈLE

Li-BIM propose deux types d'expériences pour exécuter des simulations : (a) une visualisation graphique 3D permettant le suivi en temps réel du déroulement de la simulation et (b) un mode sans support graphique permettant d'exécuter plus rapidement la simulation et générant, en sortie, des fichiers CSV. Les données de sortie peuvent être (i) centrées utilisateurs (évaluation du confort thermique, activité de chaque occupant, etc.) ou (ii) physiques (température intérieure, consommations énergétiques, etc.).

3. MODELE COGNITIF

3.1. MODELE DE COMPORTEMENT BDI

Une approche efficace pour modéliser des comportements cognitifs complexes dans les modèles agent est l'architecture BDI (Caillou et al. 2017). L'architecture BDI repose sur trois bases de données (Croyance, Désir, Intention) définies pour chaque agent et simulant sa psychologie. La base de *Croyance* désigne ce que l'agent sait. Ces connaissances peuvent être justes ou fausses, voire contradictoires. La base de *Désir* correspond à ses objectifs, ce qu'il souhaite. Enfin, la base d'*Intention* correspond à ce que l'agent compte faire pour assouvir son désir et accomplir ses objectifs. Toutes ces bases évoluent dynamiquement en fonction de son environnement et de ses actions. En plus de ces bases de données, l'agent possède des raisonnements internes qui lui permettent de créer lui-même des pensées, sans les extraire de son environnement. Ces trois bases de données couplées aux règles permettent à l'agent de construire des raisonnements complexes pour atteindre ses objectifs (Fig. 4). Cela permet in fine d'obtenir des comportements réalistes pour les agents.



Figure 4 : Architecture Belief-Desire-Intention

Les agents disposent d'attributs les caractérisant (emploi, fumeur, température idéale, etc.) et d'attributs relatifs à leur état selon plusieurs domaines (confort, fatigue, faim, etc.). Ces attributs, qui évoluent constamment durant la simulation, leur permettent de nourrir leur base de croyance ; par exemple si l'état de fatigue atteint 100% alors l'occupant acquiert la croyance « Je suis fatigué ». Si de plus l'occupant a la croyance « Il est l'heure d'aller me coucher », il acquiert alors le désir « Aller se coucher ». Il compare la priorité de ce désir par rapport à ses autres éventuels désirs (exemple : « Manger »). S'il juge ce désir prioritaire alors, « Aller se coucher » est ajouté à la base d'intention et il va effectuer le plan « Dormir ».

3.2. MODELE SOCIAL

Le modèle utilisé dans L-BIM pour décrire le lien social (i.e. les relations entre les personnes) entre les agents occupants est basé sur le travail de (Bourgais, Taillandier, and Vercoouter 2016). Ce travail propose de décrire la relation sociale en utilisant les quatre dimensions définies dans le modèle dimensionnel de la relation interpersonnelle de (Svennevig 2000): l'appréciation, la dominance, la solidarité, la familiarité. Une relation est orientée, c'est-à-dire que la relation entre l'agent A et l'agent B n'est pas nécessairement la même que la relation entre l'agent B et l'agent A. Le modèle social est utilisé pour modéliser différentes actions :

- convaincre (ex. allumer le chauffage) : plus grande est la dominance de l'agent A sur B et la solidarité de l'agent B envers A, plus grande sont les chances de convaincre l'agent B
- proposer (ex. sortir prendre l'air) : l'appréciation et la familiarité doivent être forts dans les deux sens
- réaliser des tâches collectives (ex. préparer le repas) : la solidarité et la domination doivent être fortes
- échanger des informations (ex. informer que le repas est prêt) : la familiarité et l'appréciation doivent être élevées

3.3. MODELE DE CONFORT

Le confort thermique est conditionné par les caractéristiques de l'occupant (sensible au froid, vêtements, etc.) et par l'environnement extérieur (humidité relative, température intérieure, etc.). Le modèle de confort développé détermine une plage de température de confort pour chaque utilisateur à chaque pas de temps qui dépend à la fois (1) d'une température de confort calculée grâce aux conditions climatiques extérieures et du type de pièce où se trouve l'occupant et (2) d'une sensibilité au froid spécifique à chaque occupant. Si la température intérieure de la pièce n'est pas dans la plage de confort de l'occupant, il se sentira mal à l'aise et aura plusieurs choix possibles pour y remédier : changer de vêtements, ajuster les vitres et modifier le chauffage.

4. RESULTATS

4.1. PRESENTATION DU CAS D'ETUDE

L'utilisation du modèle Li-BIM est illustrée à travers le cas d'application d'une habitation située à La Riche, une petite ville du Nord-Est de la France. Nous avons bénéficié de données de mesures in-situ dans une maison instrumentée par le cabinet d'ingénierie Cabinet Hacsé pendant une année complète, de mai 2015 à mai 2016. Des enquêtes ont été menées sous la forme d'entretiens individuels pour analyser la sensibilisation des habitants aux questions d'économie d'énergie dans un contexte sociologique particulier. La famille vivant dans ce logement est composée de deux adultes (M. X., 64 ans, qui est retraité et Mme X., 60 ans, qui a un emploi de 35h par semaine) et leur enfant de 20 ans

(Mlle X). Le modèle BIM a été réalisé avec Revit sur la base du plan de mise en œuvre final de la maison.

4.2. RESULTATS EN TERMES DE CONSOMMATION D'ENERGIE

Les résultats de consommation d'énergie de mai 2015 à mai 2016 obtenus grâce à Li-BIM sont comparés sur la figure 5 avec les données collectées in-situ ainsi que les résultats simulés avec le logiciel de simulation thermique dynamique Graitec©. Les valeurs de consommation de chauffage obtenues grâce à la simulation Li-BIM sont cohérentes avec les interviews rapportant des habitants particulièrement économes et les données obtenues par le Cabinet Hacsé sur l'ensemble du district qui rapporte une consommation énergétique inférieure à la moyenne du quartier. La différence observée de 7% entre la consommation de chauffage simulée avec Li-BIM et les données in-situ peut être expliquée par (i) le modèle thermique mono-zone implémenté dans Li-BIM qui ne considère que la conduction thermique et non la convection (ii) son incapacité à représenter finement la stratégie de chauffage de certaines familles (températures de consigne différentes selon les pièces) et (iii) l'hypothèse faite sur le planning de vacances. Dans Li-BIM, un calendrier de congé a été mis en place en fixant les jours où Mme X. ne travaille pas et où Mlle. X. ne va pas à l'école. Cependant, il a été fait l'hypothèse que les occupants ne partaient pas en vacances suffisamment longtemps pour modifier la température de consigne. Malgré ces limites, la consommation finale de chauffage obtenue par Li-BIM est très proche de celle mesurée. A l'inverse, la consommation de chauffage simulée par Graitec© est plus de deux fois supérieure à la valeur collectée in situ bien que son modèle thermique soit plus fin que celui de Li-BIM. La raison tient au fait que la variabilité du mode de vie des ménages ne peut pas être perçue par la simulation thermique dynamique traditionnelle qui utilise un profil d'occupation standard. Contrairement à ces modèles, Li-BIM a la capacité de prendre en compte des singularités issues du contexte et des habitudes sociologiques.

La famille apparaît dans l'interview comme étant peu consommatrice en eau (par exemple l'utilisation de la douche ne se fait pas quotidiennement). En effet, leur consommation d'eau chaude est inférieure de 22% à celle qui peut être simulée avec un outil de simulation énergétique traditionnel. La différence entre la consommation d'énergie en eau chaude obtenue avec Li-BIM et les données collectées peut s'expliquer par le manque de considération des vacances avec Li-BIM. Cela apparaît également dans la différence de 3% de la consommation d'énergie de cuisson.

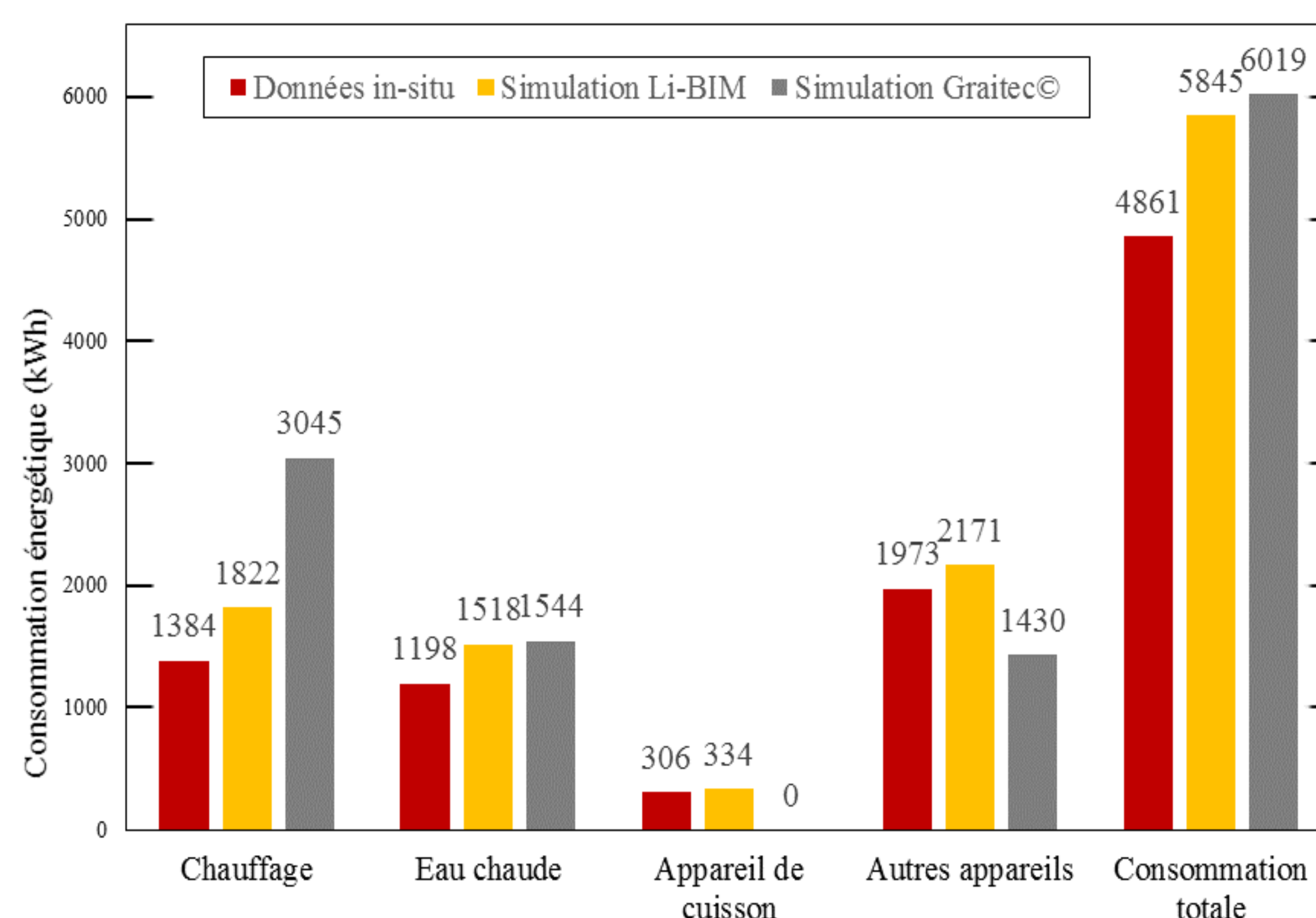


Figure 5 : Consommation d'énergie annuelle en fonction du poste de consommation

4.3. TEMPERATURES INTERIEURES

Les boîtes à moustaches des températures intérieures en hiver (du 21 décembre au 21 mars) et en été (du 21 juin au 21 septembre) sont représentées en Figure 6. Comme il n'y a pas de système de refroidissement installé dans le logement, les stratégies de limitation de la chaleur portent sur la ventilation et le recours aux volets. Le résultat obtenu par Li-BIM est 4% au-dessus de la valeur mesurée ; cet écart peut être dû au modèle thermique mono-zone simplifié implémenté dans Li-BIM.

Tel que décrit dans les interviews, la famille place son besoin de confort thermique au-dessus des enjeux économiques ou environnementaux et a donc tendance à mettre en fonctionnement ses appareils de chauffage fréquemment. Ceci explique la température moyenne élevée enregistrée en hiver ($21,8^{\circ}\text{C}$). Durant cette période-là, les habitudes et le comportement des occupants influencent fortement la régulation du chauffage, ce qui peut entraîner des données de température intérieure mesurées différentes de celles simulées avec le profil familial standard. La simulation Graitec© est basée sur (i) un calendrier annuel classique dans lequel les occupants étaient en vacances pendant deux semaines en hiver et (ii) une valeur nominale de réduction de la température ambiante entre 10h et 17h. Il en résulte une différence de 15% entre la température moyenne intérieure simulée et celle mesurée in situ. Le diagramme moustache obtenu à partir de la simulation Graitec© montre une très faible variation de la température intérieure puisque le point de consigne est défini par le logiciel à une valeur constante de 19°C en adéquation avec la réglementation française. Au contraire, à travers les paramètres des occupants ajustés pour représenter leur sensibilité au froid, Li-BIM est capable de modéliser de façon plus fine les différents profils d'habitants et leur hétérogénéité et donc de donner une température intérieure réaliste de $21,2^{\circ}\text{C}$ (pour une valeur de température mesurée à $21,8^{\circ}\text{C}$).

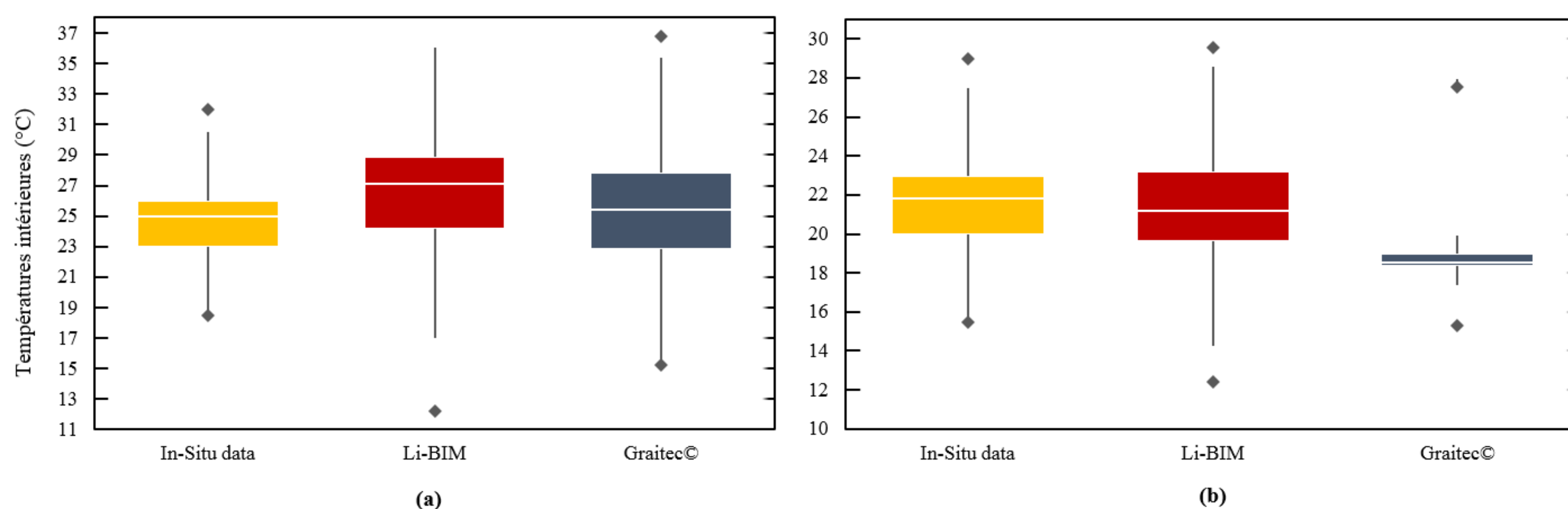


Figure 6 : Diagramme moustache des températures intérieures en (a) été et (b) hiver

5. CONCLUSION

Un modèle agent innovant, appelé Li-BIM (Life In BIM), est proposé afin de simuler le comportement des occupants au sein de bâtiments résidentiels. Li-BIM offre la possibilité de (i) quantifier l'impact de l'occupant et de son comportement sur le fonctionnement du bâtiment et (ii) d'évaluer les choix de conception qui permettent d'améliorer le fonctionnement du bâtiment. Li-BIM permet d'intégrer directement une maquette numérique au format IFC afin de modéliser le bâtiment et tous ses composants sans effort supplémentaire. Il s'articule autour (i) d'un modèle social et cognitif évolué permettant de simuler une grande variété de comportement et (ii) des modèles physiques adaptés aux dimensions que l'utilisateur veut intégrer (thermique, qualité de l'air, etc.). Li-BIM, grâce à sa facilité d'utilisation et sa flexibilité, est un outil opérationnel et propice à soutenir le processus de conception de bâtiments avec une approche centrée sur l'humain.

6. BIBLIOGRAPHIE

- Andersen, Rune K., Valentina Fabi, and Stefano P. Corgnati. 2016. “Predicted and Actual Indoor Environmental Quality: Verification of Occupants’ Behaviour Models in Residential Buildings.” *Energy and Buildings* 127. Elsevier B.V.: 105–15. doi:10.1016/j.enbuild.2016.05.074.
- Bourgais, Mathieu, Patrick Taillandier, and Laurent Vercouter. 2016. “An Agent Architecture Coupling Cognition and Emotions for Simulation of Complex Systems.” In *Social Simulation Conference 2016, Rome, September 19-23, 2016*.
- Caillou, Philippe, Benoit Gaudou, Arnaud Grignard, Chi Quang Truong, and Patrick Taillandier. 2017. “A Simple-to-Use BDI Architecture for Agent-Based Modeling and Simulation.” In *Advances in Social Simulation 2015*.
- Cali, Davide, Tanja Osterhage, Rita Streblov, and Dirk Müller. 2016. “Energy Performance Gap in Refurbished German Dwellings: Lesson Learned from a Field Test.” *Energy and Buildings* 127. Elsevier B.V.: 1146–58. doi:10.1016/j.enbuild.2016.05.020.
- D’Oca, S, and T Hong. 2015. “Occupancy Schedules Learning Process through a Data Mining Framework.” *Energy and Buildings* 88 (May): 395–408. doi:10.1016/j.enbuild.2014.11.065.
- Grignard, Arnaud, Patrick Taillandier, Benoit Gaudou, Duc An Vo, Quang Huynh, Alexis Drogoul, Arnaud Grignard, et al. 2014. “GAMA 1 . 6 : Advancing the Art of Complex Agent-Based Modeling and Simulation.” *PRIMA 2013: Principles and Practice of Multi-Agent Systems*, 117–31. doi:10.1007/978-3-642-44927-7_9.
- Heydarian, Arsalan, Evangelos Pantazis, Joao P. Carneiro, David Gerber, and Burcin Becerik-Gerber. 2016. “Lights, Building, Action: Impact of Default Lighting Settings on Occupant Behaviour.” *Journal of Environmental Psychology* 48. Elsevier Ltd: 212–23. doi:10.1016/j.jenvp.2016.11.001.
- Hoes, P., J. L M Hensen, M. G L C Loomans, B. de Vries, and D. Bourgeois. 2009. “User Behavior in Whole Building Simulation.” *Energy and Buildings* 41 (3). Elsevier B.V.: 295–302. doi:10.1016/j.enbuild.2008.09.008.
- Jang, Hyunju, and Jian Kang. 2015. “A Stochastic Model of Integrating Occupant Behaviour into Energy Simulation with Respect to Actual Energy Consumption in High-Rise Apartment Buildings.” *Energy and Buildings*. doi:10.1016/j.enbuild.2016.03.037.
- Klein, Laura, Jun-young Kwak, Geoffrey Kavulya, Farrokh Jazizadeh, Burcin Becerik-Gerber, Pradeep Varakantham, and Milind Tambe. 2012. “Coordinating Cccupant Behavior for Building Energy and Comfort Management Using Multi-Agent Systems.” *Automation in Construction* 22: 525–36. doi:10.1016/j.autcon.2011.11.012.
- Langevin, Jared, Jin Wen, and Patrick L. Gurian. 2015. “Simulating the Human-Building Interaction: Development and Validation of an Agent-Based Model of Office Occupant Behaviors.” *Building and Environment* 88. Elsevier Ltd: 27–45. doi:10.1016/j.buildenv.2014.11.037.
- Peng, Chen, Da Yan, Ruhong Wu, Chuang Wang, Xin Zhou, and Yi Jiang. 2012. “Quantitative Description and Simulation of Human Behavior in Residential Buildings.” *Building Simulation* 5 (2): 85–94. doi:10.1007/s12273-011-0049-0.
- Svennevig, J. 2000. *Getting Acquainted in Conversation: A Study of Initial Interactions (Vol. 64)*. John Benjamins Publishing. doi:10.1075/pbns.64.

Vers une co-simulation multi-physique interactive – le projet COSIMPHI

Jean-Baptiste Videau*¹, Benoit Delinchant², Abbass Raad², Laurence Cornez³, Rémi Wrona⁴, Mathieu Thorel¹, Emmanuel Bozonnet⁵, Simon Bailhache¹, Galdric Sibiude⁶

¹ *Université Paris-Est, Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB), Marne-la-Vallée, France*

² *Univ. Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP, G2Elab, 38000 Grenoble, France*

³ *CEA/DRT/LIST/DM2I/LADIS, CEA Saclay, Bât 565 PC192, 91191 Gif-sur-Yvette*

⁴ *TRIBU ENERGIE*

⁵ *Université de la Rochelle, Laboratoire des Sciences de l'Ingénieur pour l'Environnement (LASIE)*

⁶ *Be Green Engineering*

*jean-baptiste.videau@cstb.fr

RESUME.

Cet article présente les travaux réalisés dans le cadre du projet ANR COSIMPHI visant à développer un outil de co-simulation multi-physique (acoustique, coût, éclairage, énergie-confort d'été, environnement) interactive, cohérent scientifiquement et techniquement, pour améliorer le processus de conception.

Dans les travaux réalisés, la mise en cohérence de la description du bâtiment a été réalisée à travers un Modèle de Données Pivot, description commune aux cinq outils métiers du projet, compatible à la fois avec les maquettes numériques et avec une base de données (BDD) multi-physiques. Ces entrées alimentent une plate-forme de co-simulation. Un orchestrateur, également développé en Web Service (WS), gère les appels des outils métier et transmet les informations d'un outil à l'autre. Enfin, un module d'optimisation basé sur les algorithmes génétiques, un module de règles expertes basé sur la logique floue et un module d'aide à la décision multicritères sont capables de fournir au concepteur des informations quantitatives et qualitatives sur ses choix de conception.

MOTS-CLÉS : co-simulation multi-physique, optimisation multi-critères, règles expertes.

ABSTRACT.

The project COSIMPHI, supported by the French National Research Agency (ANR) has been dedicated to multi-physics simulation to simultaneously consider acoustics, lighting and thermal comforts and energetic, environmental and economic performances in building design process. The development in this project brings a prototype of a multi-physics simulation tool linked to an optimization and decision-making support system. The works have been revolved around three axes: data structuration, multi-physics simulation and decision-making support and multicriteria optimization.

This paper presents the methodology applied and the results obtained. Firstly, discussions between each expertise (acoustics, lighting, energetic, environment, economic) lead to a common dataset considering data of each tool. Then, efforts have been focused on co-simulation to correctly orchestrate each thematic tool. This orchestrator assumes the link between component and equipment database and thematic tools, and then provide the results to the optimization and decision-making support system.

KEYWORDS: multi-physics co-simulation, building design, optimization

1. INTRODUCTION

L'équipe en charge de la conception d'un bâtiment doit faire face à un nombre important de contraintes, notamment dans les domaines des confort acoustique, visuel et thermique des occupants, des consommations d'énergie et des performances économique et environnementale. Le projet COSIMPHI (subventionné par l'Agence Nationale de la Recherche depuis 2013) promeut une approche intégrée basée sur trois concepts principaux : l'utilisation d'un unique jeu de données pour décrire le bâtiment de manière non-redondante, le développement d'un outil de co-simulation en web service (WS) pour évaluer les impacts croisés des choix de conception et limiter les itérations entre les concepteurs, et enfin la production d'un support d'aide à la décision, d'optimisation multicritères et d'une interface (IHM) pour aider les concepteurs à analyser les indicateurs calculés et à prendre des décisions pertinentes en regard de leur(s) objectif(s). L'objectif de cet article est de présenter les techniques de modélisation et co-simulation multi-physiques des bâtiments du projet COSIMPHI, en détaillant les choix méthodologiques réalisés, en présentant les premiers résultats et en faisant une analyse critique de la preuve de concept développée.

2. CONTEXTE ET VEROUS SCIENTIFIQUES

2.1. LA PRATIQUE COURANTE DE LA CONCEPTION

Les outils de chaque métier (acoustique, éclairage, énergie-confort d'été, environnement, coût) sont indépendants et très souvent manipulés par des acteurs différents. En effet, les domaines d'expertise en lien avec ces outils sont variés et nécessitent de faire appel à des bureaux d'étude ou des services centralisés spécialisés sur chaque thématique. De fait, la cohérence entre les métiers n'est pas assurée de manière automatique et repose alors sur la communication et l'itération entre les acteurs sans garantie aucune. Selon les niveaux d'information sur un projet et en fonction de contraintes réglementaires, il est également possible que certains calculs soient dus dans des temporalités différentes. Cela tend à limiter la recherche de compromis multicritères potentiellement plus pertinents si l'ensemble des métiers étaient considérés suffisamment en amont et avec une vision intégrée.

2.2. LES VEROUS A LEVER

L'approche intégrée poussée dans COSIMPHI a pour objectif en premier lieu de limiter les itérations entre les différents métiers lors de la phase de conception. L'idée est de passer d'une conception séquentielle et indépendante (on fait un choix pour un métier, on l'applique, on transmet à un autre métier) à une conception liée et interdépendante.

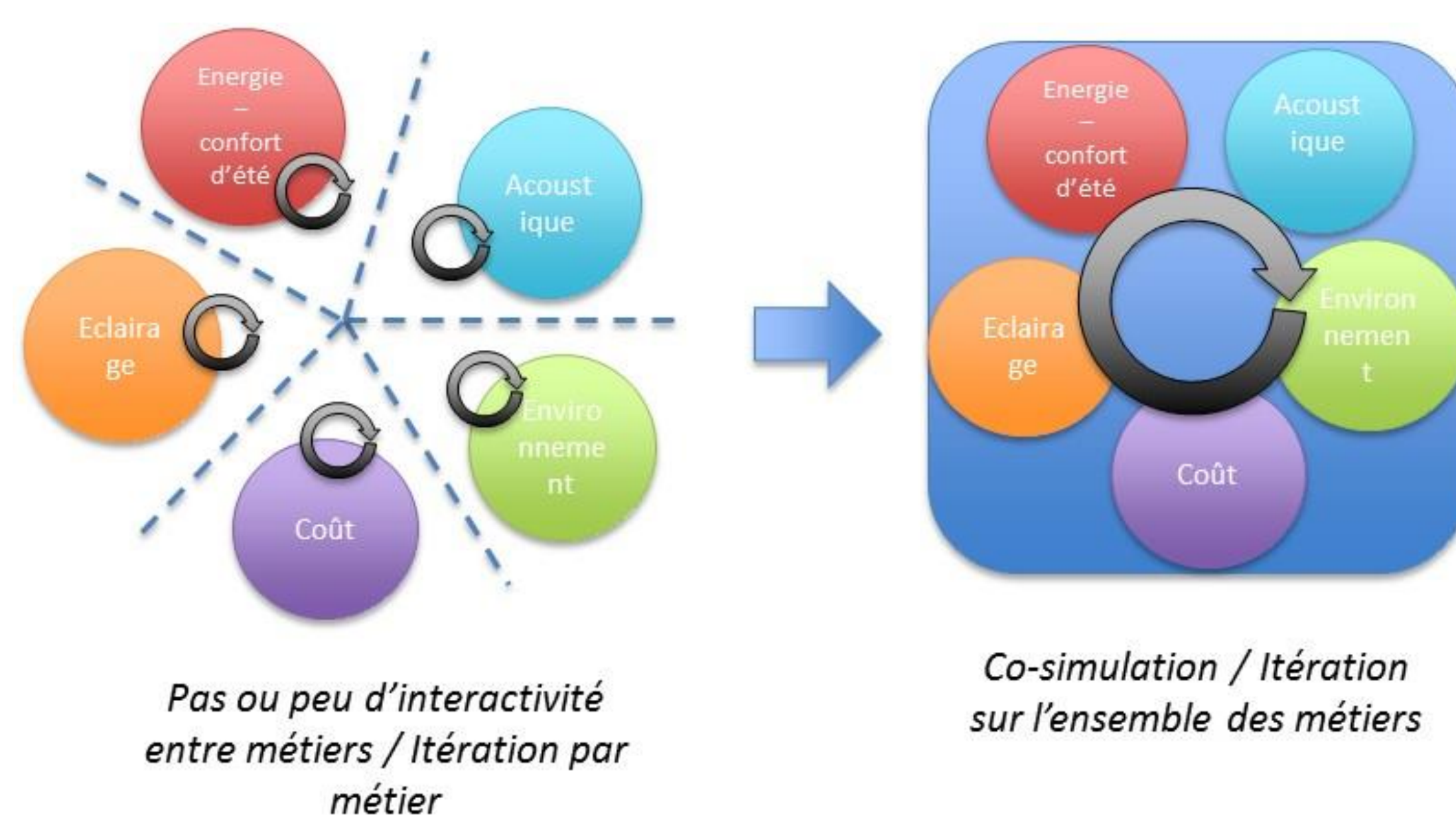


Figure 1 : l'approche intégrée (source : COSIMPHI)

Pour réaliser un tel outil, plusieurs verrous scientifiques doivent être levés avec l'objectif de faciliter la modélisation du bâtiment en phase conception : comment décrire un bâtiment de manière unique, simple et opposable pour tous les outils métier tout en gardant la compatibilité avec les formats de maquette numérique comme l'IFC ou le cityGML ? Comment développer une plateforme de co-simulation pérenne, pouvant gérer les différents pas de temps nécessaires aux simulations en utilisant des méthodes de couplages adaptées ? Comment gérer les temporalités différentes de chacun des outils métiers ? Quelles informations remonter à l'équipe de conception dans ce contexte complexifié et comment l'aider, d'une part à prendre des choix éclairés, d'autre part à évaluer leurs conséquences sur tous les métiers ?

2.3. LE CAS TEST

Pour tester et valider la preuve de concept COSIMPHI, le cas d'étude de « la salle de classe » a été choisi.

La conception et la modélisation de ce local introduit des problématiques dans chacun des métiers traités dans COSIMPHI (éviter l'éblouissement, assurer le confort thermique des occupants, maîtriser les coûts, réduire les impacts environnementaux, limiter l'énergie consommée, limiter le niveau sonore à l'intérieur du local, etc.).

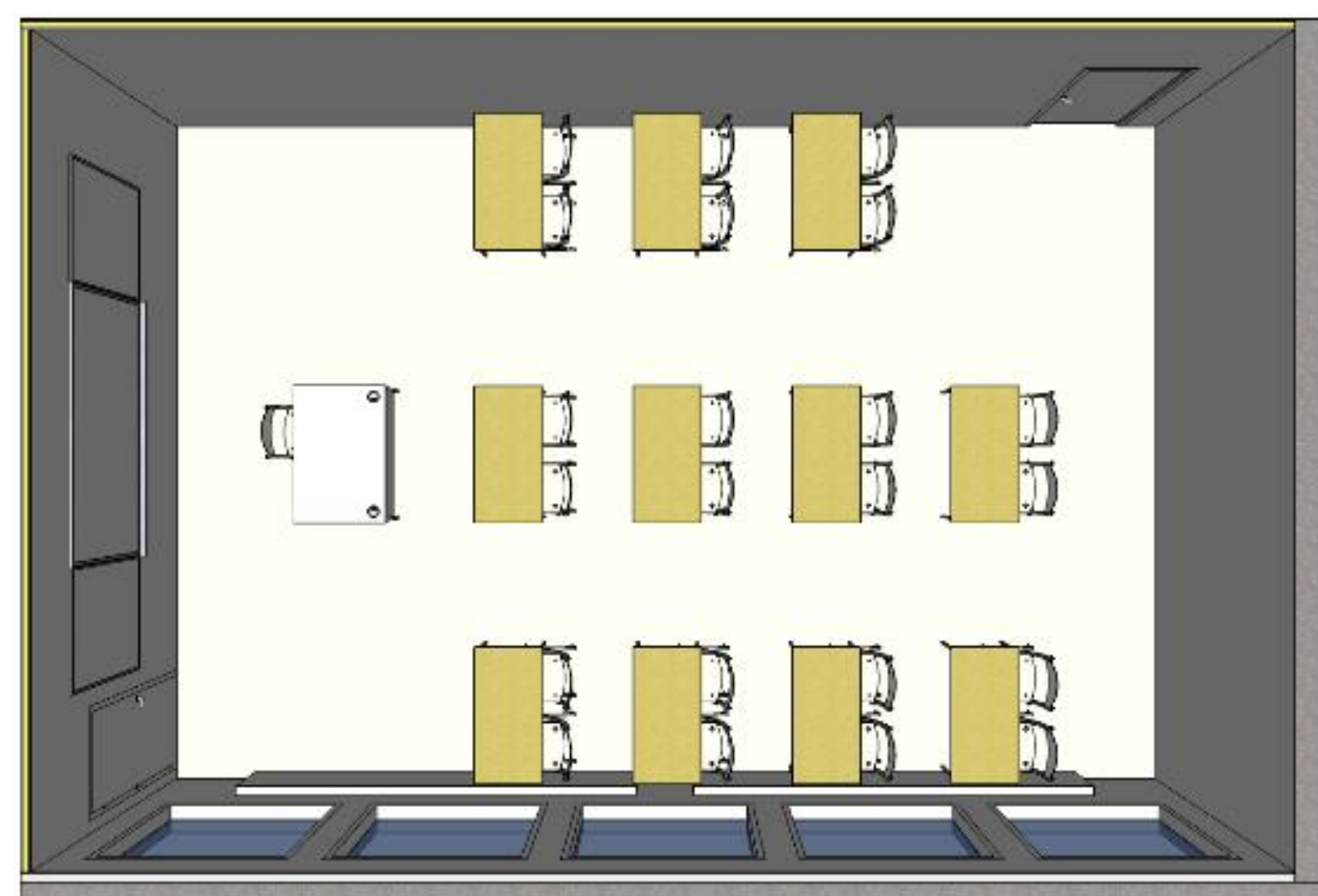


Figure 2 : le cas test - la salle de classe

3. LES DEVELOPPEMENTS METHODOLOGIQUES

Pour lever les verrous identifiés, les développements méthodologiques se structurent en trois axes principaux : un travail sur les entrées-sorties des solveurs, un travail sur la plateforme de co-simulation, et enfin un travail sur l'optimisation, les règles expertes et le classement des solutions.

3.1. AXE 1 : LES DONNEES

3.1.1. Les entrées

Lors des phases amont de la conception, les standards internationaux (comme l'IFC ou le cityGML) peuvent s'avérer inadéquats ou trop complexes à manipuler pour une description multi-métier du bâtiment (compléments multiples et potentiellement redondants, absence de lien pérenne entre la maquette numérique et les outils métiers par exemple). Les discussions entre tous les experts métiers (acoustique, éclairage, coût, environnement, énergie-confort thermique) de COSIMPHI ont mené à l'élaboration d'un jeu de données d'entrée commun (JDD), adapté aux problématiques de COSIMPHI. Ce JDD est le plus grand dénominateur commun attendu par les cinq métiers, ce qui présente l'avantage d'une part d'être un gage de non-redondance, d'autre part d'être en premier lieu le reflet du métier. La structure du JDD est présentée dans (Sibiude 2016) et s'appuie sur le standard CityGML. En effet, si le JDD ne reprend pas strictement un format existant de maquette numérique, il est apparu essentiel de s'en rapprocher pour faciliter l'interopérabilité logicielle et favoriser l'ouverture vers la maquette numérique (Brangeon, 2015). Au final, avec ce jeu de données

intermédiaire, un seul couplage entre la maquette numérique et le JDD est à réaliser et à maintenir pour faire une simulation multi-métier.

3.1.2. La Base de Données multi-métier

Il s'agit ici de réaliser une BDD multi-métier pour stocker les valeurs des paramètres intrinsèques de chaque objet du JDD (ex : baie, porte, système de ventilation, etc.). Pour chaque objet, entre 3 et 50 variantes ont été définies puis codées dans une BDD, accessible en Web Service. Dans la plateforme COSIMPHI, il est donc possible de remplacer un objet A par un objet B tout en maintenant la cohérence de description des objets. Il en est de même pour le processus d'optimisation : modifier un paramètre intrinsèque du JDD sans modifier tous ceux qui lui sont physiquement liés (ex : capacité calorifique et indice d'affaiblissement acoustique du mur support) conduit à des aberrations de calcul.

3.1.3. Les sorties

Dans le processus d'optimisation ou d'aide à la conception, tous les indicateurs n'ont pas le même poids. Pour hiérarchiser ces indicateurs et pouvoir guider efficacement l'utilisateur dans sa conception, deux niveaux d'agrégation sont utilisés : le niveau inférieur correspond à des indicateurs « bruts » calculés au sein d'un outil métier (ex : coût de construction, émission de CO₂,...), ces variables sont utilisées par les modules d'optimisation et de règles expertes ; le niveau supérieur est une agrégation d'indicateurs métier destinée à donner une bonne compréhension globale à l'utilisateur et aboutit par exemple à l'expression d'une note globale et unique pour qualifier le local (ex : une note de classement acoustique,...).

3.2. AXE 2 : LA CO-SIMULATION

Les outils métier considérés sont en réalité des modèles de simulation très hétérogènes. La mise en place d'une cosimulation globale nécessite la mise en œuvre de solutions d'interopérabilité. Nous avons ainsi introduit dans notre plateforme une approche de composition de service Internet, via des web-services, pour les étapes clefs du processus de conception que sont la co-simulation, l'optimisation et l'aide à la décision. (Raad, 2017).

Concernant la cosimulation, nous avons plus particulièrement étudié deux algorithmes de couplage (Chainage et Waveform Relaxation Method (WRM)). Le chaînage (algorithme classique de couplage) assure bien la cosimulation entre des composants hétérogènes à différentes dynamiques (Raad, 2017). Cependant, l'utilisation des web-services comme support de l'interopérabilité peut rapidement conduire à des temps de couplage prohibitifs (Raad, 2015).

En outre, la méthode de relaxation des formes d'ondes (WRM), via un échange complet des formes d'onde, et non plus un échange à chaque pas de temps, permet de réduire le nombre d'appels des différents sous-modèles et ainsi, le temps de calcul global (voir Tableau 1.). Si la période de simulation est plus longue, l'efficacité de la méthode de relaxation des formes d'onde augmente. De plus, certains outils n'offrent pas la possibilité d'interagir avec le modèle à chaque pas de temps, la WRM offre donc un réel potentiel pour l'interopérabilité en co-simulation d'outils métiers préexistants.

Période de Simulation	1 Jour		1 Mois	
Méthode de couplage	WRM	Chaînage	WRM	Chaînage
Nombre d'itération	10	1440	13	43145
Temps de co-simulation via WS	11.2s	12min	4.2min	6h

Tableau 1 : Comparaison des temps de co-simulation des algorithmes de couplage

La Figure 3 montre un exemple de co-simulation entre les web-services Energie, Acoustique et des services de régulation. Ces résultats valident l'architecture de co-simulation par web-service et montrent les possibilités d'une simulation globale intégrant différents solveurs et des mécanismes de régulation multi-physiques.

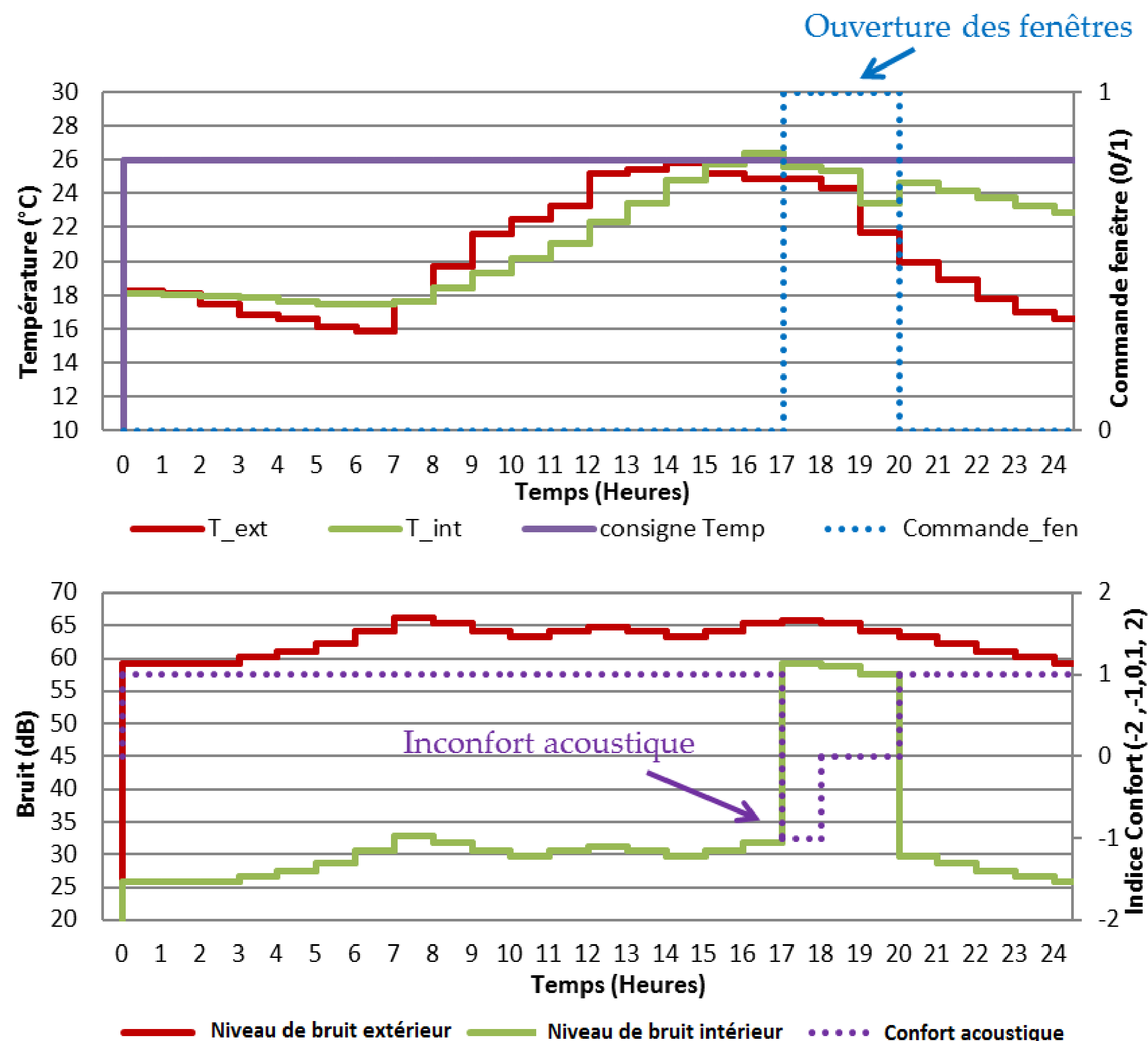


Figure 3 : Co-simulation d'un jour d'été sans régulation acoustique

Ici, l'ouverture des fenêtres le soir par le régulateur thermique, permet de rafraichir l'air mais influe directement sur le confort acoustique. La fenêtre pourrait être refermée par l'activation et la priorisation du web-service de régulation acoustique.

3.3. AXE 3 : L'AIDE A LA CONCEPTION

Dans le cadre de la co-simulation multi-physique, les différents simulateurs pris un à un peuvent conduire à des recommandations différentes voire contradictoires. Il est donc important de pouvoir proposer une aide à la conception qui ne rende pas le choix encore plus difficile pour l'utilisateur final. Dans le cas qui nous occupe, les simulateurs ont été analysés un à un avec l'aide des experts métiers afin de dégager les mind maps capables d'associer pour chacun des buts recherchés par l'utilisateur (diminuer les consommations d'énergie primaire par exemple), l'ensemble des éléments bâtis ou équipements (décrits au §3.1.1), et plus précisément à certains de leur paramètres, capables de contribuer au but.

Dans la mind map ci-dessous, présentant la méthode réalisée pour réduire les consommations d'énergie du local ou du bâtiment, certaines restrictions ont été signalées comme la modification des dimensions des baies vitrées (signalées par un triangle danger) et des pistes non explorées (signalées par des croix rouges) comme la diminution des besoins de refroidissement qui ne s'appliquait pas au cas d'étude retenu.

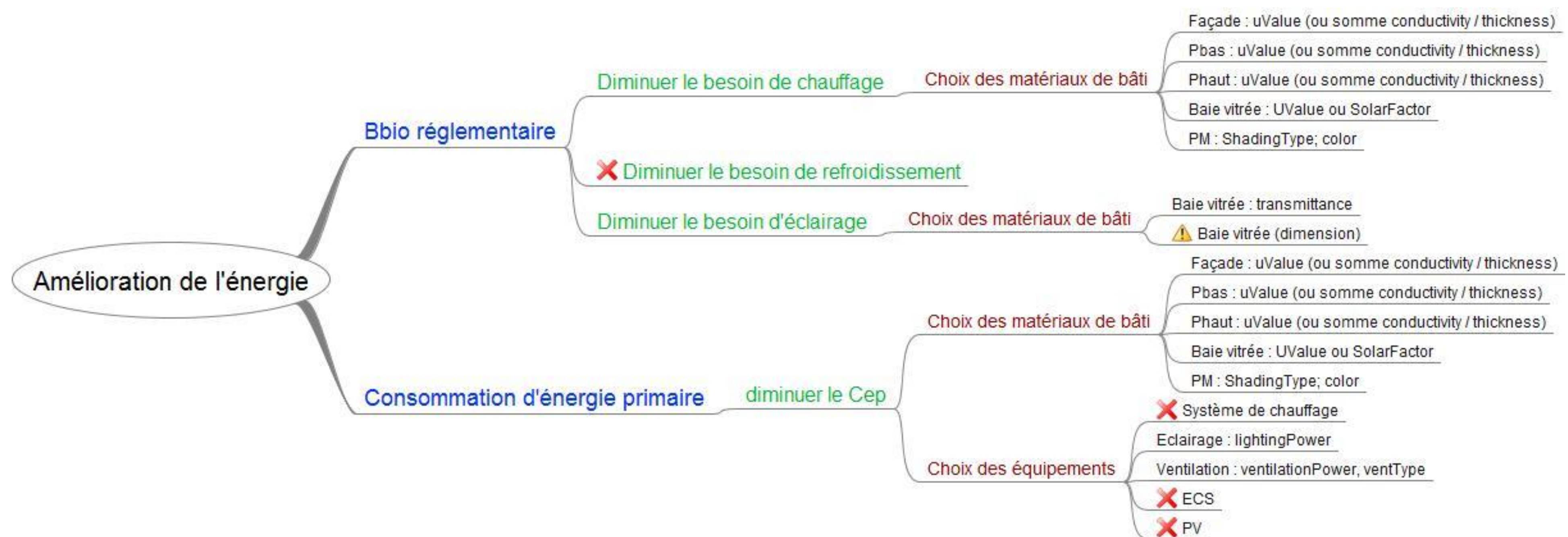


Figure 4 : « mind map » correspondant à l'amélioration de l'énergie

Munis de l'ensemble des mind map, le travail a consisté à construire un ensemble de règles de type « if-then ». Ces règles traduisant la connaissance experte de chacun des domaines ont aussi pour but de proposer des recommandations sur la conception qui soient réalisables par rapport à une BDD de produits. En partant d'une solution initiale qui a été proposée par l'utilisateur (soit un choix pour les éléments de bâti et pour les éléments d'équipement), il ne sera recommandé à l'utilisateur de changer certaines des caractéristiques de sa solution initiale que s'il existe des produits dans la BDD multi-métier le permettant. Les règles floues sont de la forme suivante : « Si $Bbio_{norm}$ est non réglementaire et $Marge_{uValue_Floor}$ est faible alors $Augmenter_{uValue_Floor}$ est moyennement » où $Bbio_{norm} = \frac{Bbio - Bbio_{max}}{Bbio_{max}}$, avec $Bbio_{max}$, l'exigence sur les Besoins Bioclimatiques de la RT2012,

imposée par les contraintes utilisateurs. La mise en œuvre a été réalisée par ExpressIFTM, le moteur d'inférence floue développé au CEA, dans lequel ont été défini l'ensemble les variables linguistiques (ici $Bbio_{norm}$, $Marge_{uValue_Floor}$, $Augmenter_{uValue_Floor}$) ainsi que leurs termes associés (ici, respectivement, non réglementaire, faible, moyennement). Le système de règles COSIMPHI se compose 140 règles qui associent 46 variables linguistiques en entrée et 36 en sortie.

Une des limitations vient des simulateurs coûts et environnement qui proposent systématiquement des solutions contradictoires. Pour éviter de perturber trop le processus d'amélioration, il a été décidé de ne pas inclure de règles associées à ces deux simulateurs. Enfin une seconde limitation vient du manque de connaissance des experts en dehors de leur domaine. Plus précisément, un expert est conscient de l'impact dans un autre domaine qu'aura la modification de tel ou tel paramètre mais il ne sera pas capable de quantifier la modification. Le système d'aide à la conception ne mentionne donc que l'ensemble des impacts (négatif, bénéfique, avec impact -sans connaître le sens de l'impact- ou sans impact).

	Energie	Acoustique	Confort estival	Eclairage
$Augmenter_{uValue_Wall}$	NEGATIF	NON	OUI	NON

Tableau 2 : impacts de la règle $Augmenter_{uValue_Wall}$ sur tous les métiers

4. LES PRINCIPAUX RESULTATS

4.1. LA PLATEFORME

Chaque module présenté ci-dessus a été mis en WS et intégré dans la plateforme COSIMPHI, dont voici l'architecture.

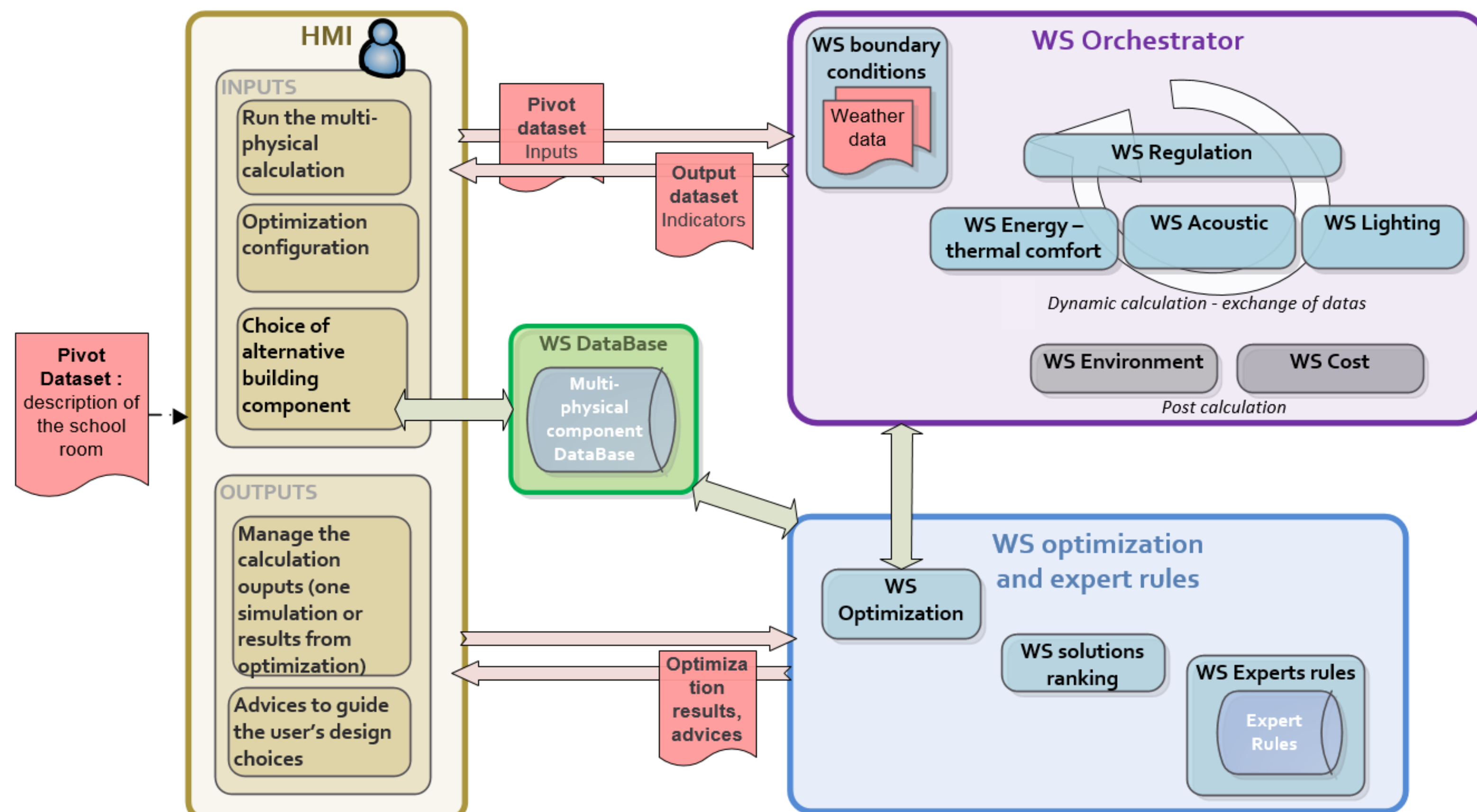


Figure 6 : la plateforme COSIMPHI

4.2. RESULTATS SUR LE CAS D'ETUDE

Les modules du projet COSIMPHI, présentés dans cet article, ont été partiellement intégrés dans un prototype d'outil informatique (Figure 7).

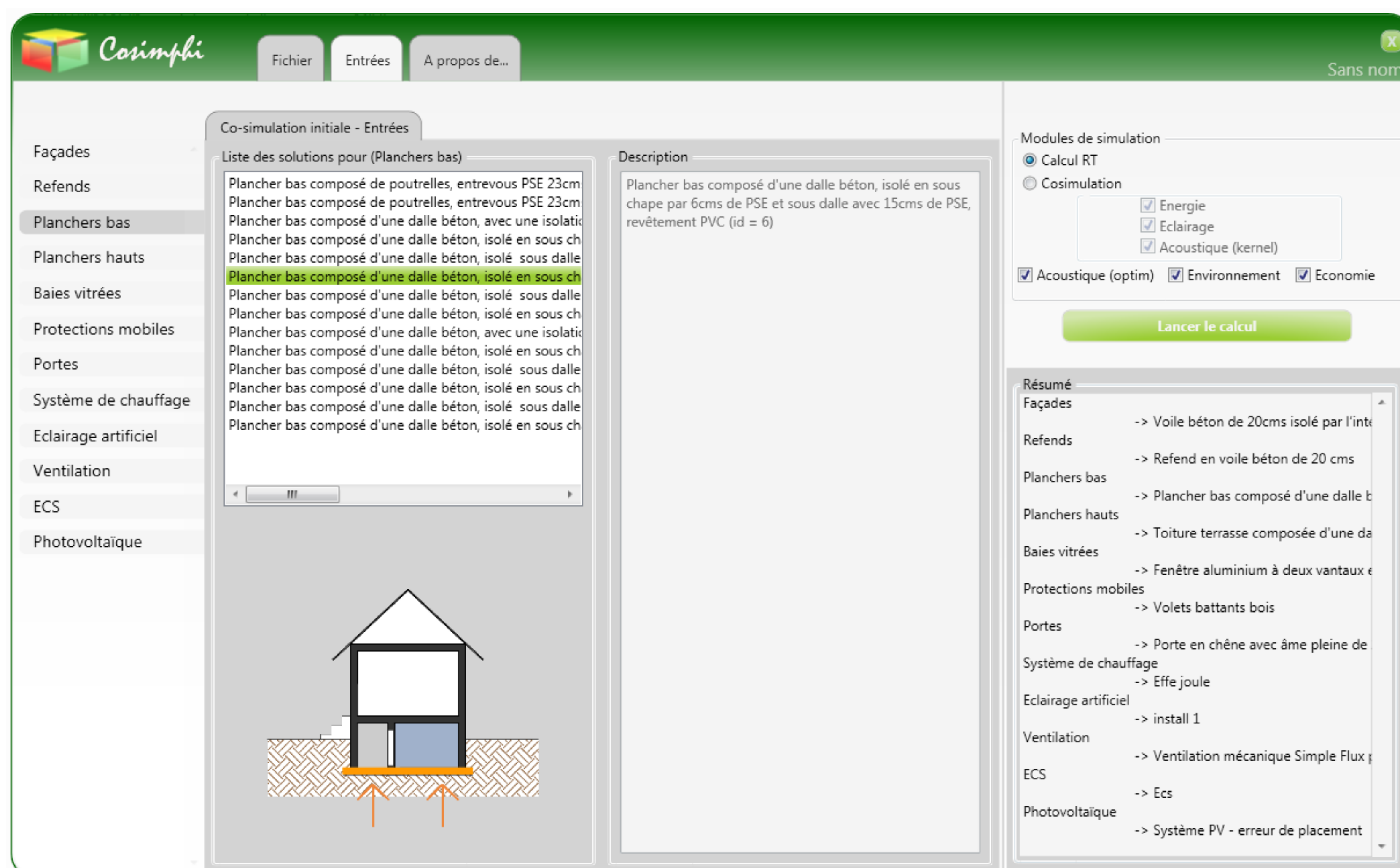


Figure 7 : Interface de saisie des configurations de solutions à appliquer à un bâtiment

Ce prototype n'est pas aujourd'hui pleinement fonctionnel mais il permet de réaliser les tâches suivantes en centralisant les appels de Web Services : chargement des solutions de la base de données de solutions multicritères (cf. §3.1.2), lancement de co-simulations gérant des interactions faibles et fortes, lancement de l'optimisation utilisant les algorithmes génétiques, classement multicritères (utilisant les méthodes de la somme pondérée, TOPIS et PROMETHEE II). La faisabilité technique a été validée, les suites du projet COSIMPHI permettront de consolider le prototype et de tester la méthodologie déployée sur une batterie d'études de cas.

5. DISCUSSIONS ET CONCLUSION

La plateforme de co-simulation multi-physique interactive, développée dans le cadre de COSIMPHI, fonctionne sur le cas d'étude (notons l'absence du WS Eclairage dans la plateforme de co-simulation dû notamment au niveau de description d'un local et de son environnement demandé dans Phanie, le simulateur d'éclairage) et peut être lancée à l'aide de l'IHM. Cette plateforme se caractérise par une approche pragmatique proche du (ou des) métiers(s) grâce à la création d'un jeu de données d'entrée commun issu des jeux de données des outils métiers et l'agrégation de connaissance dans le moteur de règles expertes, tout en restant scientifiquement robuste grâce à la co-simulation et la BDD multi-métier et orienté vers l'utilisateur avec l'IHM et le module d'optimisation.

Le chemin vers une large diffusion reste cependant long. La preuve de concept développée révèle qu'il est possible et pertinent de faire de la co-simulation ; que le verrou de la description multi-métier du bâtiment peut être levé par le Jeu De Données commun (JDD), intermédiaire entre le monde de la maquette numérique et le monde des outils métiers ; que l'approche par Web-Service (WS) est efficace et adaptée à des outils très hétérogènes ; et que l'utilisateur ne pourra s'approprier la complexité de l'approche multi-métier qu'avec des outils d'optimisation ou d'aide à la décision. Il nous paraît également indispensable de garder une autonomie entre les outils métiers. La maintenance d'une plateforme multi-métiers est un enjeu majeur (et la première des difficultés) pour assurer sa pérennité. Aussi, il faut que les concepteurs d'outils métiers puissent faire évoluer leur outil sans que sa simulation dans la plateforme multi-métier soit une contrainte.

Plusieurs sujets scientifiques ou organisationnels restent à approfondir comme le développement d'un retour d'expérience utilisateur plus large de la plateforme, l'enrichissement de la BDD de règles expertes pour capitaliser le savoir, le développement de la BDD produits en multi-métier, éventuellement par référencement avec d'autres BDD métier ce qui nécessitera de gérer les différents niveaux de description, la généralisation à des bâtiments ayant un autre usage, des bâtiments plus complexes,... Il est important d'envisager également des outils gérant le cycle de vie des services de la plateforme, comme des outils d'aide à la création et au déploiement des Web-Services, des outils de composition dynamique des co-simulations, des outils de suivi et de débogage des WS...

6. BIBLIOGRAPHIE

Sibiude, Galdric, Jean-Baptiste Videau, Benoît Delinchant, Abbass Raad, Samuel Carré, Simon Bailhache, Emmanuel Bozonnet, Boris Brangeon, Rémi Wrona, Benjamin Haas, «Structuration des données pour la Co-Simulation Multi-Physique dans l'évaluation multi-métier des bâtiments» IBPSA France, 2016.

Raad, Abbass, Vincent Reinbold, Benoit Delinchant, Frédéric Wurtz, «Energy building co-simulation based on the WRM algorithm for efficient simulation over FMU components of Web Service» 14th International Conference of the IBPSA, Hyderabad, 2015.

Brangeon, Boris et Emmanuel Bozonnet « Présentation d'un outil d'aide à la conception utilisant les IFC et les bases de données coûts ». Congrès du Bâtiment Durable, La Rochelle, 2015

Raad, Abbass, « Co-simulation et optimisation multi-critères en conception de bâtiment, par approche d'interopérabilité de services », Thèse de Doctorat de l'Université de Grenoble Alpes, spécialité Génie Electrique, Décembre 2017.

Couplage d'une PAC et d'un système de refroidissement d'eau par échanges radiatifs avec le ciel : modélisation et estimation de performances

Zakaria AKETOUANE^{1,3*}, Mustapha MALHA¹, Denis BRUNEAU², Philippe LAGIERE³, Saed RAJI⁴, Paul BONNAMY⁴, Benoît MICHEL⁵, Baptiste DURAND-ESTEBOE⁴, Abdellah BAH¹

1 CRE équipe ERTE UM5-ENSET, Avenue des Forces Armées Royales, Rabat, Maroc

2 GRECCAU (EA 7482), F-33405 Talence, France

3 I2M dept TREFLE (UMR CNRS 5295), F-33400 Talence, France

4 Nobatek/INEF4, 64600 Anglet, France

5 CETHIL (UMR 5008), 69621 Villeurbanne, France

*zakaria_aketouane@um5.ac.ma

RESUME. L'étude concerne une modélisation sous COMSOL du couplage entre un système de production d'eau froide par Radiative Sky Cooling (RSC) et une Pompe À Chaleur (PAC) air/eau, et l'estimation des performances de ce système couplé en vue d'assurer les besoins en climatisation d'un bâtiment tertiaire à Bordeaux. Ces panneaux RSC, permettent par circulation d'eau en face arrière, de refroidir celle-ci par échanges radiatifs aux Grandes Longueurs d'Ondes (GLO) avec le ciel. Les besoins de ce bâtiment tertiaire ont été préalablement estimés à l'aide d'une Simulation Thermique Dynamique (STD) sous DesignBuilder. Le schéma du couplage suppose que le condenseur de la PAC soit immergé dans un Ballon de Stockage (ST) refroidi à l'aide de la production d'eau froide issue des panneaux RSC. L'objectif ici est de diminuer la température au niveau du condenseur par rapport à la température de l'air extérieur, dans le but de pouvoir améliorer la performance énergétique de la PAC. Les résultats obtenus sont comparés à 2 autres configurations de systèmes couplés : un échangeur air/eau classique venant remplacer les panneaux RSC, et une PAC seule sans source d'eau froide (sans stockage ni production d'eau froide).

MOTS-CLÉS : Système de refroidissement d'eau, Radiative Sky Cooling, Pompe à Chaleur, GLO.

1. INTRODUCTION

La consommation énergétique du secteur du bâtiment pour la climatisation augmente rapidement durant le 21^{ème} siècle [1] à cause des vagues de chaleurs extrêmes qui deviennent de plus en plus intenses et fréquentes dans les différentes parties du globe [2]. L'amélioration des systèmes de production de froid est une priorité pour diminuer cette consommation et réduire les émissions des gaz à effet de serre, responsables du changement climatique.

La majorité des systèmes de production de froid reposent sur un cycle thermodynamique qui comprend un compresseur, un condenseur, un détendeur et un évaporateur. Il est à noter qu'une baisse de température de 1°C au niveau du condenseur réduit jusqu'à 3,5% la consommation électrique du compresseur [3]. D'autre part, la circulation d'un fluide (ici de l'eau) en face arrière de panneaux RSC, échangeant avec la voute céleste (ciel) dans le domaine Grandes Longueurs d'Ondes (GLO), permet de descendre la température de ce fluide à des valeurs plus faibles que celle de la température de l'air extérieur (et néanmoins plus élevée que la température de ciel). Ainsi, en utilisant un ballon de stockage intermédiaire, le couplage du condenseur d'une pompe à chaleur et de panneaux RSC paraît une solution prometteuse pour réduire la consommation électrique de la PAC.

2. MATERIELS ET METHODES

Dans le but d'estimer les performances du système de production de froid intégrant une production d'eau froide par utilisation de panneaux RSC, nous avons modélisé sous COMSOL le couplage des

différents composants du système tel qu'indiqué sur la Figure 1-c : pompe à chaleur, ballon de stockage et panneaux RSC. Nous avons d'autre part modélisé deux autres configurations en vue de réaliser une comparaison des performances thermiques du ballon de stockage et des consommations électriques de la PAC ; ceux-ci correspondent à un échangeur air/eau venant remplacer les panneaux RSC (voir Figure 1-b) et une PAC seule (Figure 1-a).

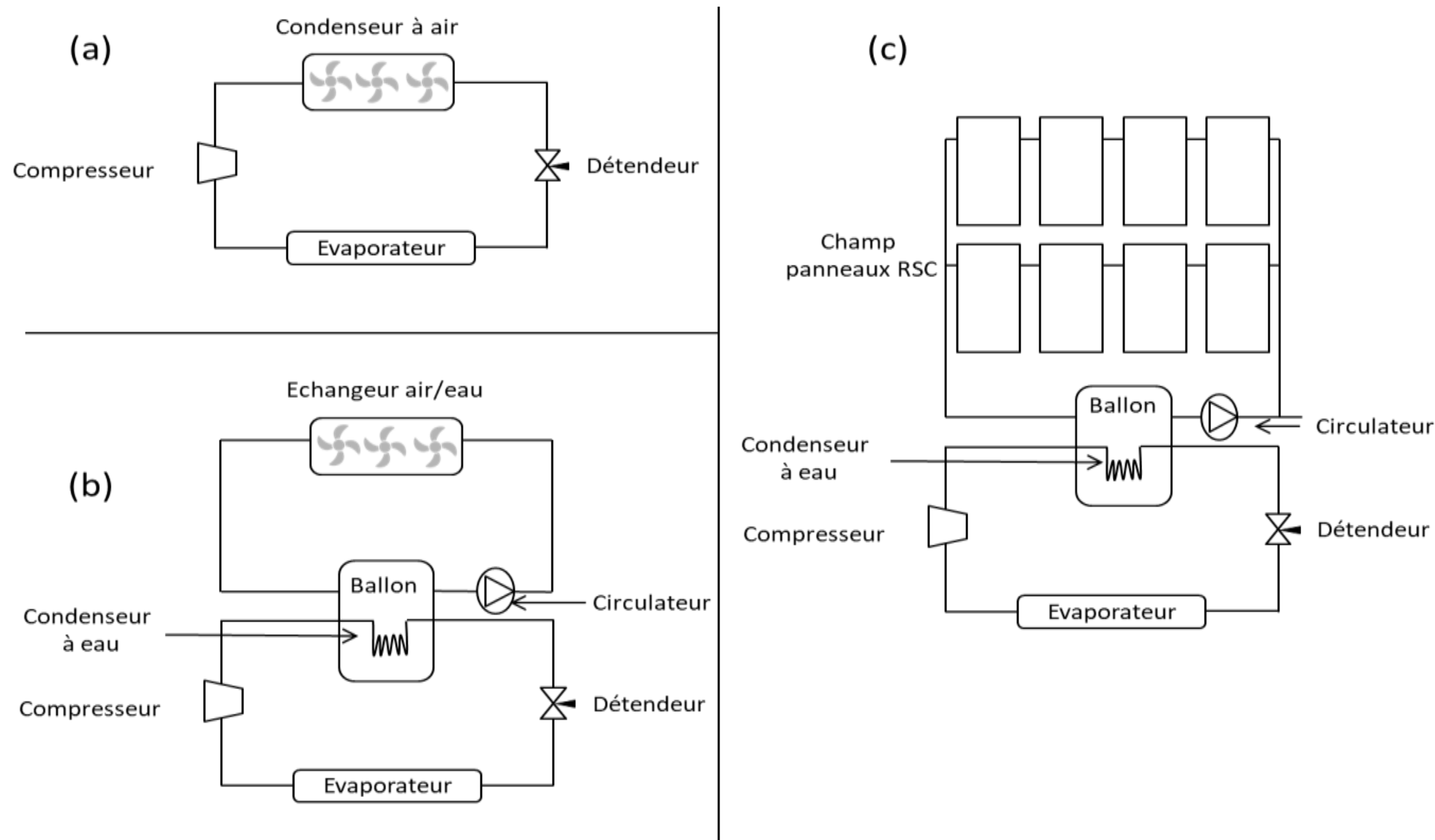


Figure 1 Configurations des systèmes de production de froid comparés (a) PAC seule, (b) PAC+ST+HX (c) PAC+ST+RSC

2.1. MODELE POMPE A CHALEUR

Le calcul des performances de la PAC est basé sur des informations fournies par le constructeur. La première donnée nécessaire pour la simulation est le COP_{ratio} et le Cap_{ratio} en fonction de la température de consigne souhaitée pour le refroidissement et pour une température de retour au niveau du condenseur. La seconde donnée indique la variation de la performance de la PAC (Fraction of Full Load Power –FFLP) lorsque celle-ci travaille en charge partielle. Les caractéristiques COP_{rated} et Cap_{rated} correspondent respectivement au coefficient de performance et à la capacité moyenne de la machine évaluée par le fabricant. P_{ev} étant la puissance au niveau de l'évaporateur, considéré ici en tant que charge de climatisation du bâtiment, on peut écrire :

$$COP_{nom} = COP_{rated} \times COP_{ratio} \quad (1)$$

$$Cap_{nom} = Cap_{rated} \times Cap_{ratio} \quad (2)$$

$$PLR = \frac{P_{ev}}{Cap_{com}} \quad (3)$$

$$P_{comp} = \frac{Cap_{nom}}{COP_{nom}} \times FFLP \quad (4)$$

La puissance au niveau du condenseur s'écrit alors:

$$P_{cd} = |P_{comp}| + |P_{ev}| \quad (5)$$

2.2. MODELE BALLON ET ECHANGEUR AIR/EAU

Le bilan énergétique sur le ballon de stockage permet de calculer la température du ballon en régime transitoire en considérant un volume à température homogène. Le modèle prend en compte la puissance au niveau du condenseur de la PAC, supposé immerger dans le ballon, la puissance de refroidissement au niveau de la boucle de refroidissement par panneaux RSC (Figure 1-c) ou de

l'échangeur air/eau (Figure 1-b), et les échanges par transmission entre les parois du ballon et l'air ambiant :

$$m_s C_{p,s} \frac{dT_s}{dt} = P_{cd} - (UA)_s (T_s - T_{env}) - \alpha m_p C_p (T_s - T_{cool}) \quad (6)$$

$$\alpha = \begin{cases} 1, & T_s > T_{cool} \\ 0, & \text{sinon} \end{cases} \quad (7)$$

où T_s est la température du ballon, T_{env} est la température de l'air environnant le ballon, T_{cool} est la température en sortie de la boucle de refroidissement du ballon (soit au niveau des panneaux RSC ou bien au niveau de l'échangeur air/eau), m_s est la masse du ballon, C_p est la chaleur spécifique de l'eau, $(UA)_s$ est le coefficient de transmission thermique du ballon et m_p est le débit massique du fluide caloporteur (eau) de la boucle de refroidissement du ballon.

On a choisi de modéliser l'échangeur air/eau, à partir de son efficacité, tout en supposant que l'eau est le fluide qui domine le transfert. Pour le calcul de la puissance de l'évaporateur, le débit d'eau considéré est identique à celui circulant dans les panneaux RSC. L'efficacité de l'échangeur peut donc s'écrire :

$$\varepsilon = \frac{T_{ec} - T_{sc}}{T_{ec} - T_{ef}} \quad (8)$$

Couplage avec ballon de stockage : $T_{cool} = T_{sc}$ (9)

2.3. MODELE PANNEAU RADIATIVE SKY COOLING

On considère la géométrie du capteur solaire non vitré Batisol® (voir Figure 2) développé et testé initialement par Nobatek-INEF4 pour la production d'eau chaude, mais utilisé dans le cadre de cette étude pour la production d'eau froide par échange radiatif dans les GLO avec le ciel. Ce panneau est constitué de 14 canaux dans lesquels circulent de l'eau en tant que fluide caloporteur. Un modèle numérique du panneau a été développé sous COMSOL où le transfert de chaleur dans les différents éléments du panneau a été pris en compte.

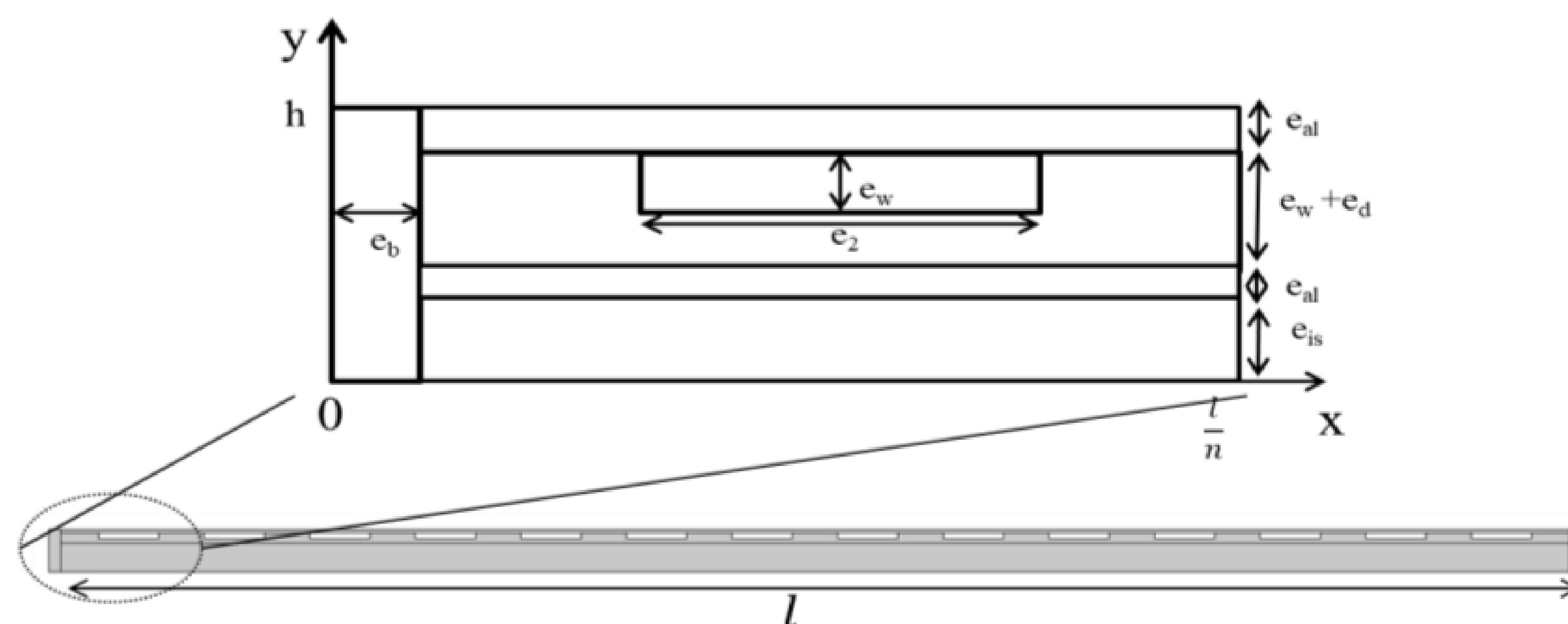


Figure 2 Schéma 2D du panneau Batisol

Partie solide du panneau :

$$\rho_\xi C p_\xi \frac{\partial T_\xi}{\partial t} = k_\xi \left(\frac{\partial^2 T_\xi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_\xi}{\partial y^2} \right) \quad (10)$$

Pour les 14 canaux dans lesquels circule de l'eau comme fluide caloporteur, le bilan énergétique permet de calculer la température en sortie de chaque canal. Celle-ci est prise comme température d'entrée du canal suivant :

Pour $j=1$ jusqu'à 14, on a :

$$T_w^j = \frac{q'_u{}^j L}{m c_{pw}} + T_w^{j-1} \quad (11)$$

$$q'_u{}^j = L h_f \int (T_{wm}^j - T) dP \quad (12)$$

$$T_{wm}^j = \frac{T_w^j + T_w^{j-1}}{2} \quad (13)$$

Couplage avec le ballon de stockage :

$$T_w^0 = T_s \quad (14)$$

$$T_{cool} = T_w^{14} \quad (15)$$

Conditions aux limites (pour chaque panneau):

- La face avant d'un panneau reçoit un flux de chaleur convectif (q_{cv}), absorbe une partie du rayonnement solaire (I_s), et absorbe un flux net échangé aux Grandes Longueurs d'Ondes avec le ciel (R):

$$\phi_o(t) = k_{al} \frac{\partial T_{al}(x, y = h, t)}{\partial x} = q_{cv}(t) + I_s(t) + R(t), \quad \forall x \in [0, l] \quad (16)$$

$$R(t) = \varepsilon \sigma (T_{al}^4 - T_{sky}^4(t)) \quad (17)$$

$$I_s(t) = \alpha q_s(t) \quad (18)$$

$$q_{cv}(t) = h_o (T_{al}(x, y = h, t) - T_o(t)) \quad (19)$$

- La face arrière d'un panneau est exposée à un flux de chaleur convectif avec l'air extérieur:

$$\phi_1(t) = k_{is} \frac{\partial T_{is}(x, y = 0, t)}{\partial y} = h_o (T_{is}(x, y = 0, t) - T_o(t)), \quad \forall x \in [0, l] \quad (20)$$

- Les deux flancs d'un panneau échangent de la chaleur avec de l'air extérieur par convection:

$$\phi_2(t) = k_b \frac{\partial T_b(x = 0, y, t)}{\partial y} = h_o (T_b(x = 0, y, t) - T_o(t)), \quad \forall y \in [0, h] \quad (21)$$

$$\phi_3(t) = k_b \frac{\partial T_b(x = l, y, t)}{\partial y} = h_o (T_b(x = l, y, t) - T_o(t)), \quad \forall y \in [0, h] \quad (22)$$

3. ETUDE DE CAS : BATIMENT NOBATEK/INEF4

Les besoins en climatisation du bâtiment Nobatek/INEF4 (auxquels sont associés les essais numériques des 3 systèmes de refroidissement présentés sur les Figures 1-a-b-c) sont issus d'une simulation thermique dynamique (STD) sous Designbuilder, effectuée pour les conditions climatiques de la ville de Bordeaux. Les besoins en climatisations de ce bâtiment, en termes d'énergie, sont de 7.3 MWh. De plus, comme l'indique la Figure 3, la charge de climatisation de tout le bâtiment dépasse rarement les 45kW sur toute la durée estivale ; par conséquent nous avons choisi d'utiliser une PAC d'une puissance frigorifique de 32kW correspondants à une valeur moyenne des pics maximaux de la charge thermique (aux alentours de 30kW).

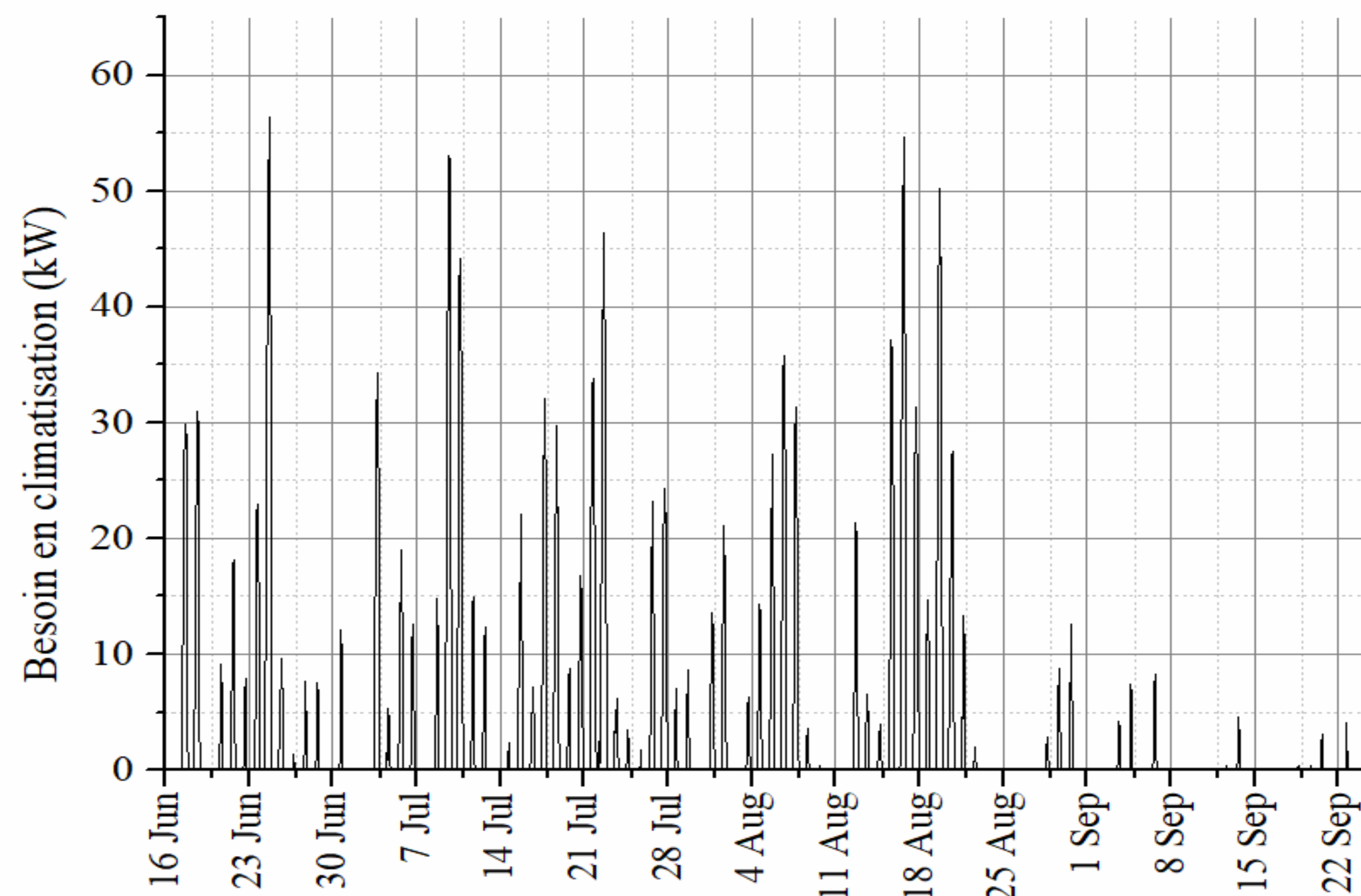


Figure 3 besoins en climatisation du bâtiment Nobatek/INEF4

4. RESULTATS ET DISCUSSIONS

4.1. CHOIX DES PARAMETRES D'ENTREE DES MODELES

En prenant la température extérieure comme température d'eau à l'entrée de chacune des 2 lignes de panneaux RSC (cf. Figure 1-c), le débit de fonctionnement a été choisi en se basant sur la valeur moyenne de l'écart de température entrée-sortie de l'eau obtenue au cours de la nuit entre le 13 et le 14 juillet pour un panneau RSC type. Cette différence de température diminue avec l'augmentation du débit comme l'indique la Figure 4 (a). Nous avons choisi de réguler ce débit en suivant une loi de pilotage linéaire en fonction de l'écart de température (cf. Figure 4(a)). Ainsi, la régulation du couple débit- ΔT autour du point (54 kg/h ; 2°C) se régule naturellement avec une loi de pilotage, linéaire, telle que celle proposée en Figure 4(b).

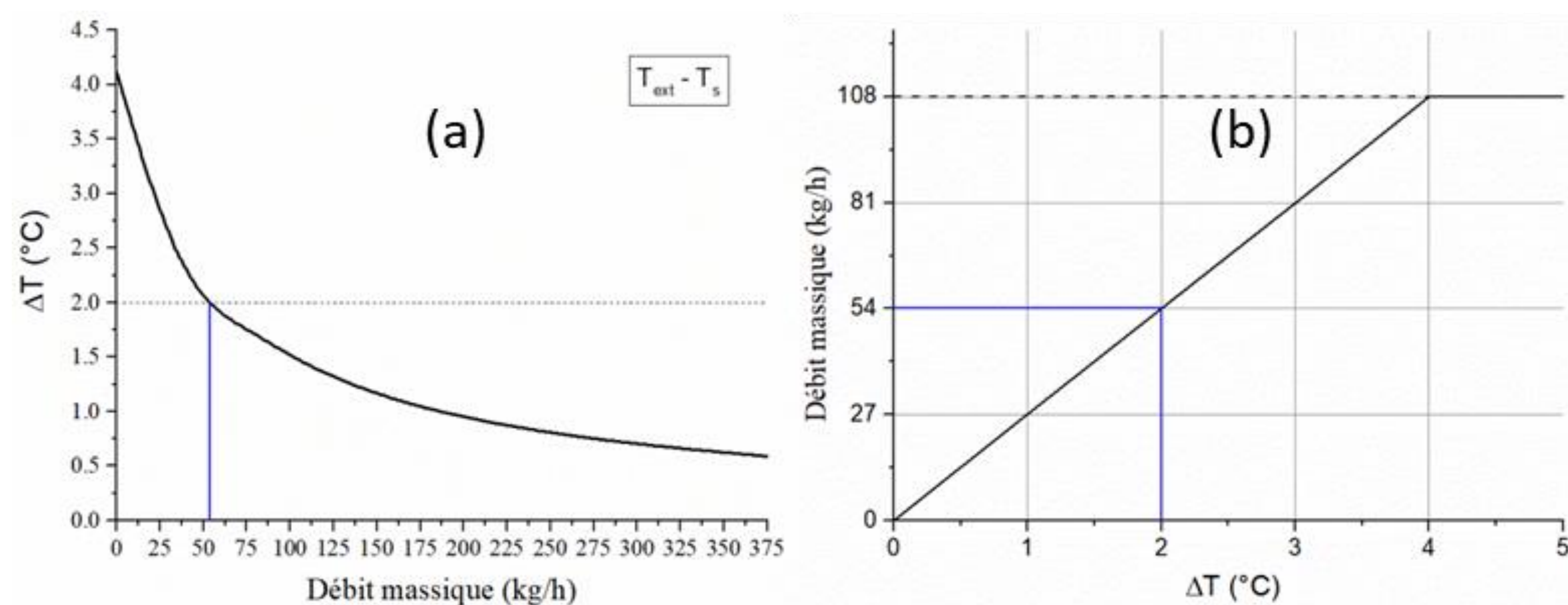


Figure 4 (a) Variation de l'écart de température entrée-sortie en fonction du débit. (b) Loi de pilotage du débit en fonction de l'écart de température ballon-sortie panneaux RSC

On choisit pour les simulations qui suivent une surface de panneaux RSC équivalente à 60% de la surface des zones à climatiser (ordre de grandeur de surface de toitures fréquemment disponibles), en prenant en compte les paramètres d'entrée suivants pour les différents composants :

Tableau 1 Caractéristiques dimensionnelles, et thermiques des sous systèmes

Matériau de la face avant des panneaux :	Aluminium anodisé clair
Absorption dans les CLO des panneaux RSC [4] :	35%
Emissivité dans les GLO des panneaux RSC [4]:	84%
Efficacité de l'échangeur air-eau :	75%
Surface de panneaux RSC :	265 m ²
Volume du ballon (équivalent énergie pour $\Delta T=10K$):	V = 40 m ³ (480 kWh)

4.2. PERFORMANCES THERMIQUES DURANT DES JOURS REPRESENTATIFS

La Figure 5 montre la variation des températures en différents points des systèmes pendant la période du 15 au 19 Juillet où les besoins en climatisation correspondent à la capacité nominale de la PAC. La température de l'air extérieur la plus basse, la nuit, est de 9°C et la température maximale, le jour, est de 29°C. La température de l'eau en sortie des panneaux RSC est toujours inférieure à la température ambiante d'environ 3°C durant la nuit. Tant que la température du ballon est supérieure à la température des panneaux RSC, ceux-ci refroidissent le ballon jusqu'à atteindre des températures au-dessous de la température extérieure durant la nuit. D'autre part, le ballon refroidi par l'échangeur air/eau de la deuxième configuration a toujours une température supérieure à celle du ballon couplé aux panneaux RSC d'environ 2.5°C.

Pendant le jour, on voit un effet de déphase du pic des températures des ballons par rapport au pic des besoins en climatisation du bâtiment, ceci est lié à l'inertie des ballons qui sont à des températures très basses par rapport à la température extérieure lorsque la PAC commence à fonctionner. De plus, la température du ballon couplé à l'échangeur air/eau est toujours supérieure à la température de l'air extérieur à partir de 22:00 jusqu'à 08:00 du jour suivant pendant les 4 jours représentatifs étudiés, alors que la température du ballon couplé aux panneaux RSC est toujours inférieure à la température extérieure pendant la même période.

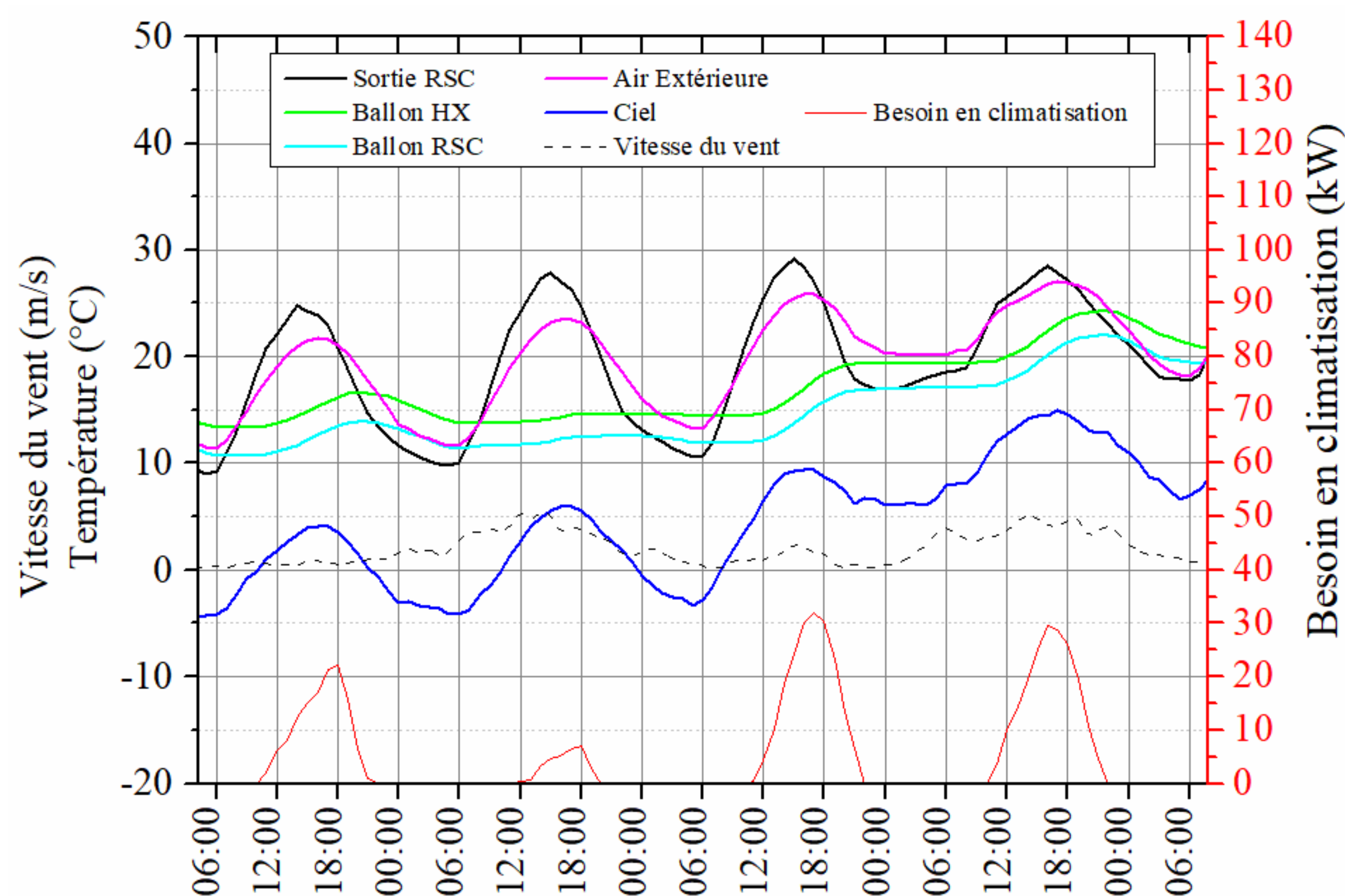


Figure 5 Températures en différents points des systèmes de production du froid et besoin en climatisation du bâtiment Nobatek-INEF4 du 15 au 19 juillet

La Figure 6 représente la variation des températures en différents points des systèmes pendant 4 jours représentatifs durant lesquels les besoins en climatisation sont les plus importants (du 15 au 19 Aout). La température extérieure minimale est de 15°C alors que la température maximale est de 37°C. La température en sortie des panneaux RSC est inférieure à la température de l'air extérieur d'environ 1.5°C pendant la nuit. Contrairement aux jours représentatifs de juillet, on voit clairement que les températures des deux ballons de stockage dépassent la température extérieure à partir de 18:00 jusqu'à 8:00 du jour suivant. Ceci est dû à l'importante quantité de chaleur à évacuer par le condenseur de la PAC, supposé immerger dans le ballon, durant cette période de fort besoin en climatisation.

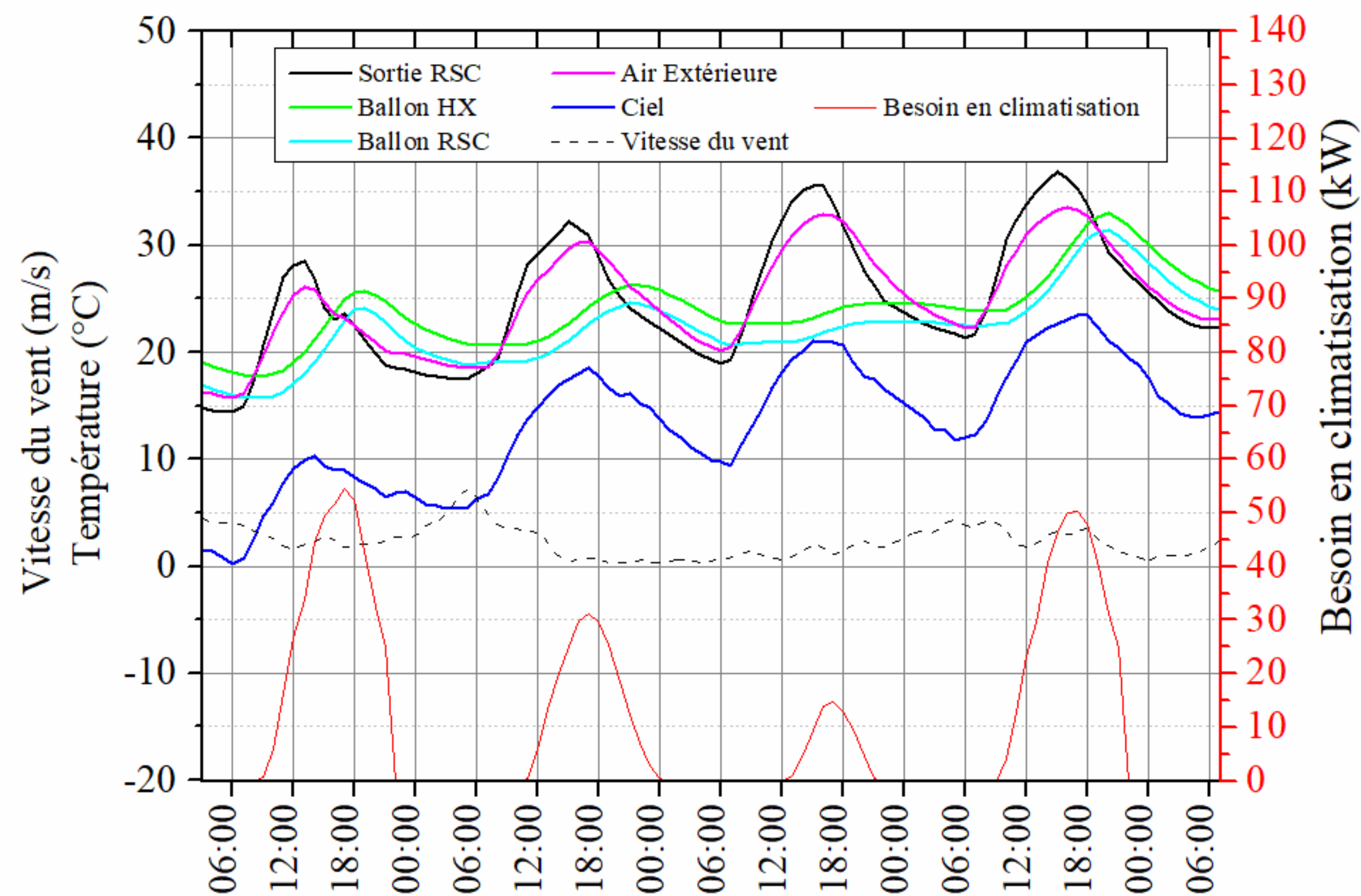


Figure 6 Températures de différents points des systèmes de production du froid et besoin en climatisation du bâtiment Nobatek-INEF4 du 15 au 19 Août

4.3. ECONOMIE D'ENERGIE EN FONCTION DU STOCKAGE

La Figure 7 représente la consommation électrique de la PAC pour les 3 configurations de production de froid étudiées en fonction de la capacité journalière de stockage de chaleur du ballon d'eau couplé à la PAC. Les résultats montrent que l'augmentation de la capacité de stockage pour les deux configurations utilisant celui-ci permet de réduire la consommation électrique d'une façon significative. En effet, le ballon de stockage, refroidi la nuit par les panneaux RSC (ou l'échangeur air/eau), aura une température inférieure à la température de l'air extérieur pendant la journée ; par conséquent la PAC verra sa consommation électrique diminuer par rapport à une PAC seule dont le condenseur échange de la chaleur avec de l'air extérieur. La différence de consommation est d'autant plus importante que le volume d'eau froide stockée pendant la nuit est important ; cette différence diminue d'une façon exponentielle et commence à stagner à partir d'un stockage équivalent à 480 kWh ; les économies d'énergies sont alors de l'ordre de 18% pour la configuration avec panneaux RSC et 14.5% pour une configuration avec échangeur air/eau.

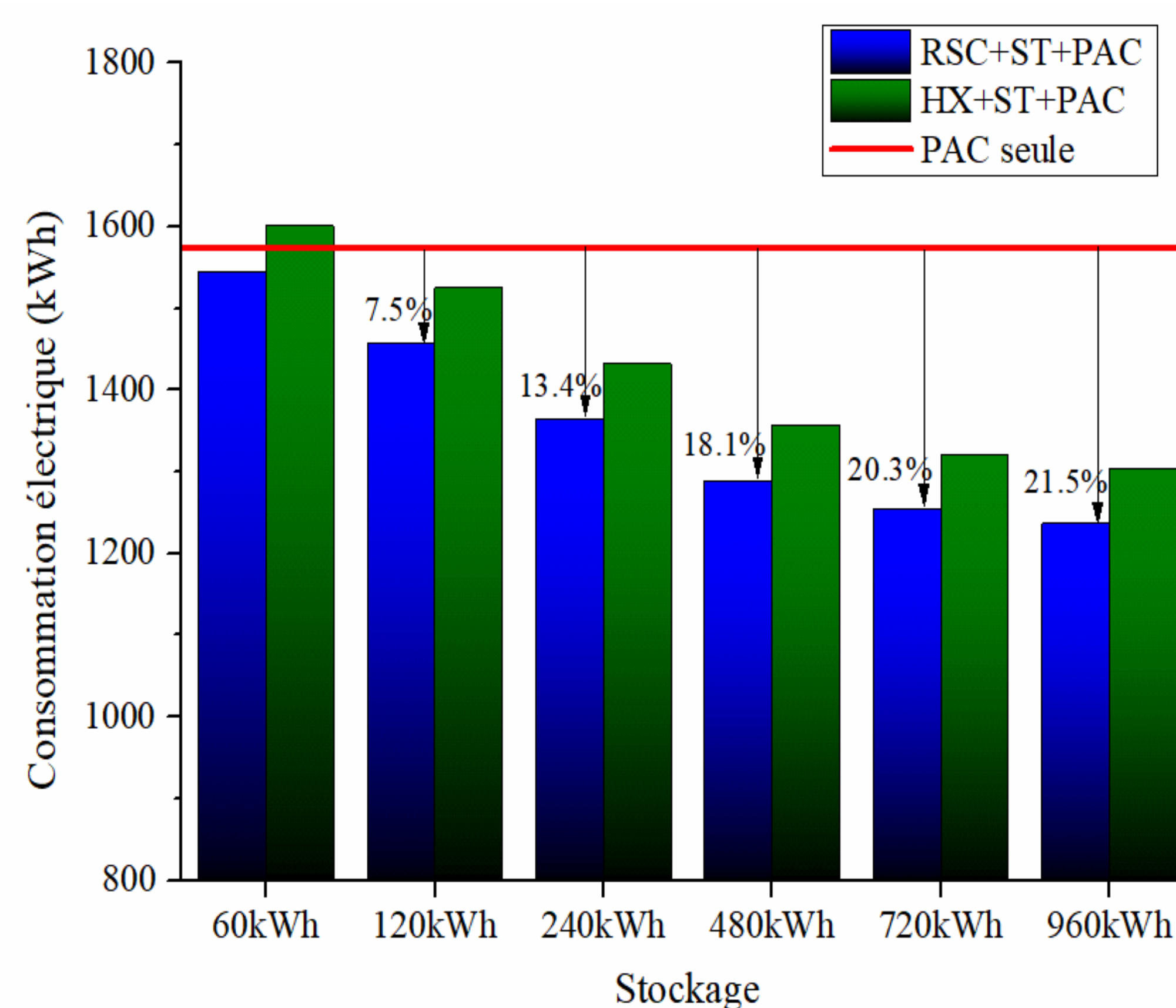


Figure 7 Consommation électrique de la PAC en fonction de la capacité de stockage pour les 3 configurations étudiées

4.4. ECONOMIE D'ENERGIE EN FONCTION DE LA SURFACE INSTALLEE

En se fixant une valeur de stockage de froid égale à 480 kWh par jour (et en utilisant les paramètres d'entrées présentées dans le Tableau 1), nous avons prédit la consommation électrique de la PAC en fonction de la surface des panneaux RSC installées (en pourcentage de la surface de toiture). Les résultats de la Figure 8 montrent que 20% de la surface total disponible est suffisant pour diminuer d'environ 15.2% la consommation électrique de la PAC. A partir de 40% de toiture utilisée (soit 24% de la surface à climatiser), la diminution de la consommation électrique de la PAC ne varie que très lentement jusqu'à atteindre 19% lorsque l'ensemble de la surface de toiture disponible (100%) est utilisée pour les panneaux RSC.

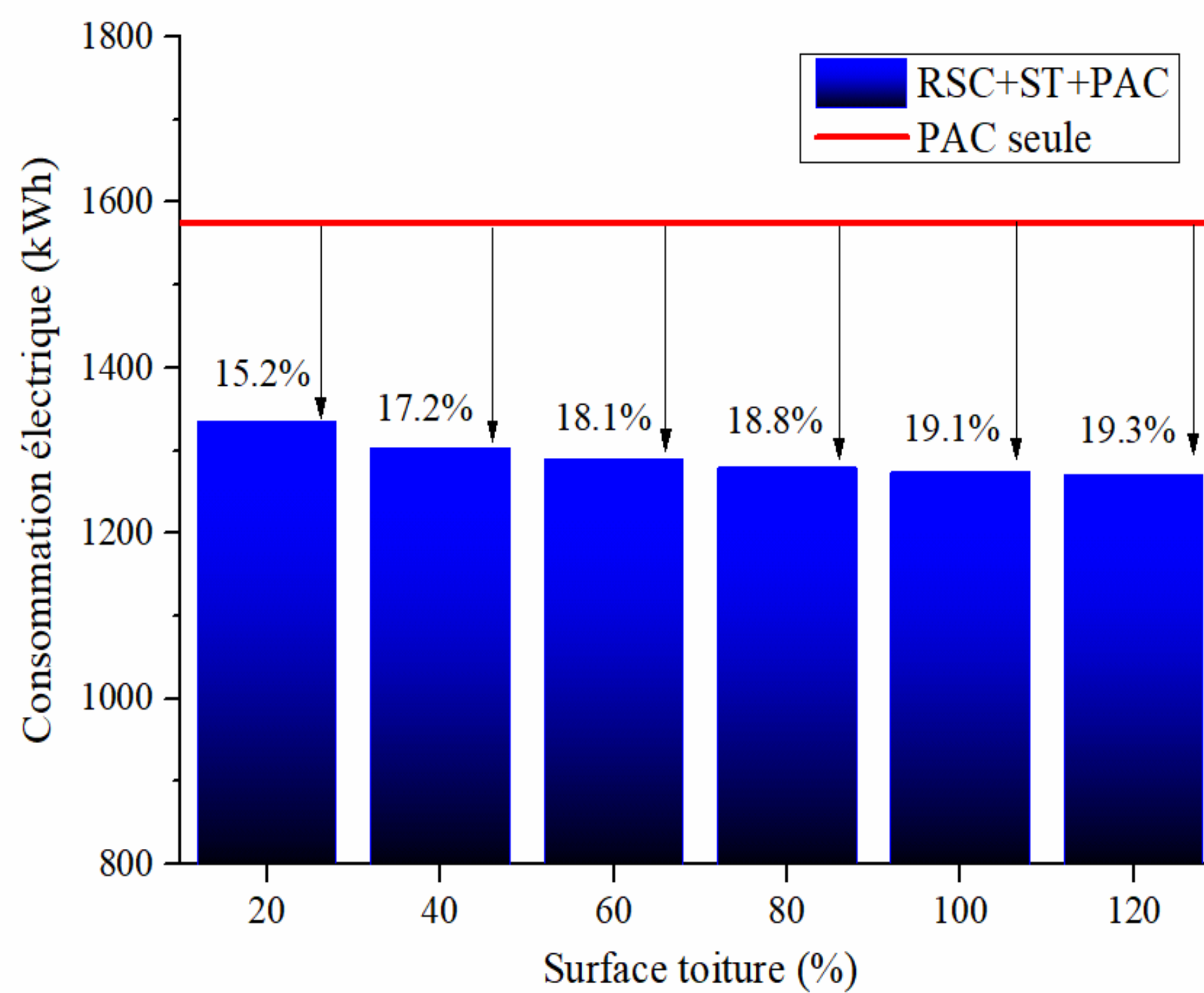


Figure 8 Consommation électrique de la PAC en fonction de la surface de panneaux RSC installés sur la toiture (en pourcentage de la surface de toiture), pour les 3 configurations étudiées

5. CONCLUSION

Les travaux présentés dans ce papier consistent en une modélisation numérique d'une pompe à chaleur couplée à des panneaux Radiative Sky Cooling et intégrant un ballon de stockage. A partir de ce modèle, les performances thermiques et électriques du système ont été évaluées et comparées à deux autres configurations de la PAC (avec ballon de stockage et échangeur air/eau et sans ballon de stockage), pour une application de refroidissement d'un bâtiment tertiaire situé à Bordeaux. Les résultats montrent qu'une configuration PAC+ST+RSC permet de diminuer jusqu'à 20% la consommation électrique de la PAC sur la période estivale.

6. REMERCIEMENTS :

Les auteurs tiennent à remercier le programme MIC ERASMUS + 2016-2018 pour la bourse de mobilité doctorale accordée à Zakaria AKETOUANE.

7. REFERENCES

- [1] M. Isaac and D. P. van Vuuren, *Modeling global residential sector energy demand for heating and air conditioning in the context of climate change*, *Energy Policy*, vol. 37, no. 2, pp. 507–521, 2009.
- [2] M. Gerald and C. Tebaldi, *More Intense , More Frequent , and Longer Lasting Heat Waves in the 21st Century*, *Science (80-.)*, vol. 305, no. August, pp. 994–997, 2004.
- [3] T. Facius, *Benefits of Water Cooled vs Air Cooled Equipment in Air Conditioning Applications*, *Cool. Technol. Inst.*, 2011.
- [4] J. H. Henninger, *Solar Absorptance and Thermal Emittance of Some Common Spacecraft Thermal-Control Coatings*, *NASA Ref. Publ.*, vol. 1121, no. April, 1984.

Etude numérique des performances d'un système solaire combiné destiné à la production d'eau chaude sanitaire ainsi qu'au préchauffage de l'air de ventilation dans la maison individuelle

Patricia Carbajo Jiménez*^{1,2}, Antoine Leconte¹, Ophélie Ouvrier Bonnaz¹, Gilles Fraisse², Etienne Wurtz¹

¹*Univ. Grenoble Alpes, CEA, LITEN, INES, 73375 Le Bourget-du-Lac, France.*

²*Univ. Grenoble Alpes, Univ. Savoie Mont Blanc, CNRS, LOCIE, 73000 Chambéry, France.*

*patricia.carbajo-jimenez@univ-smb.fr

RESUME. En réponse à l'évolution de la réglementation thermique, les bâtiments tendent à être mieux isolés et plus étanches, diminuant leurs besoins de chauffage. La ventilation, nécessaire pour garantir la qualité de l'air intérieur, représente une perte énergétique non négligeable. De plus, les besoins d'eau chaude sanitaire (ECS) deviennent prépondérants par rapport à ceux de chauffage. Dans ce contexte, les systèmes solaires thermiques peuvent fournir une part importante des besoins du bâtiment. Cet article étudie ainsi un système solaire combiné qui produit de l'ECS et préchauffe l'air de ventilation. Une co-simulation entre Dymola (langage Modelica) et EnergyPlus permet de prédire les performances du système pour une maison individuelle respectant la RT 2012. Les résultats montrent un meilleur rendement des capteurs et du ballon par rapport à un CESI classique, ainsi qu'une augmentation de la fraction solaire pour la production simultanée d'ECS et de préchauffage d'air.

MOTS-CLÉS : système solaire combiné, préchauffage d'air, co-simulation

ABSTRACT. As a result of the evolution of the thermal regulation, buildings are better isolated and more airtight, reducing their heating needs. The air renewal, necessary to guarantee the indoor air quality (IAQ), represents a significant thermal loss. Moreover, domestic hot water (DHW) needs become more important than those for space heating. In this context, solar thermal systems are appropriate for supplying an important part of the building needs. Thus, this paper focuses on a solar thermal combi-system producing DHW and pre-heating the fresh air. A co-simulation between Dymola (Modelica language) and EnergyPlus forecasts the system performance for an individual house respecting the French thermal regulation of 2012. The results show an improved thermal collector yield as well as a better storage efficiency in comparison with a classic individual water heating system. The global solar fraction is also increased when considering both DHW and air pre-heating.

KEYWORDS : solar combi-system, air pre-heating, co-simulation

1. INTRODUCTION

Le secteur du bâtiment, responsable de presque 40% de la consommation d'énergie finale et d'environ 36% des émissions de gaz à effet de serre de l'Union Européenne (European Commission 2013), représente un axe majeur de la politique actuelle d'efficacité énergétique au niveau européen et mondial. En effet, il est essentiel d'augmenter la performance énergétique des bâtiments pour respecter les exigences du « Paquet 2020 » approuvé par la Commission Européenne en 2007 après la ratification du protocole de Kyoto en 2002, mais aussi pour atteindre les objectifs plus exigeants fixés à l'horizon 2050 (European Commission 2011). Dans ce but, la Commission Européenne a lancé les Directives de 2010 (Official Journal of the European Union 2010) et 2012 (Official Journal of the European Union

2012) sur la performance énergétique des bâtiments, obligeant tous les nouveaux bâtiments à être zéro-énergie en 2020 (2018 pour les bâtiments publics).

Depuis les années 70, différentes stratégies ont été adoptées afin de réduire la consommation énergétique du bâtiment. Les premières mesures ont consisté à améliorer l'isolation et l'étanchéité de l'enveloppe dans le but de diminuer la consommation de chauffage (Ionescu et al. 2015). La réduction des infiltrations rend nécessaire un taux minimal de renouvellement d'air afin de garantir la qualité de l'air intérieur et la pérennité du bâtiment. Dans ce but, la ventilation naturelle est plus efficace du point de vue énergétique mais, étant imprévisible, la ventilation mécanique, simple flux, double flux ou par insufflation, est plus fiable. Le type simple flux impose la quantité d'air extrait du bâtiment sans maîtriser les conditions d'insufflation. La ventilation double flux, plus complexe, permet la récupération d'une partie de l'énergie de l'air vicié, diminuant ainsi les pertes liées au renouvellement d'air. Enfin, la ventilation par insufflation maîtrise l'injection d'air dans le bâtiment, rendant ainsi possible le contrôle de la température de soufflage pour un meilleur confort thermique (Rahmeh 2014).

Les nouveaux bâtiments, supposés zéro-énergie ou à énergie positive, ont des besoins de chauffage fortement réduits. Les besoins d'ECS et en ventilation occupent désormais une part importante dans le bilan énergétique du bâtiment (Feist et al. 2005). Dans ce contexte, les systèmes solaires thermiques peuvent contribuer de manière significative à l'apport d'énergie nécessaire (Bois 2017). Ce travail étudie ainsi un système solaire combiné destiné à produire de l'ECS et à préchauffer l'air provenant d'un système de ventilation par insufflation dans une maison individuelle.

Les nombreux logiciels de simulation existants constituent un moyen très puissant pour étudier et développer de nouveaux systèmes adaptés à l'évolution de la réglementation thermique (Peuportier 2016). Ces outils numériques, dans l'optique de fournir des résultats fiables et rapides, peuvent communiquer entre eux afin de profiter de leurs spécificités, tout en respectant le caractère multi physique des systèmes (Trčka, Hensen, et Wetter 2009). Cette étude s'appuie ainsi sur une co-simulation au moyen d'une « *Functional MockUp Interface* » (FMI) entre Dymola (langage Modelica) et EnergyPlus. Par la suite, l'article présente en détail le système ciblé, puis le modèle numérique développé pour son étude et, enfin, ses performances.

2. FONCTIONNEMENT DU SYSTEME INNOVANT

La Figure 1 représente le système étudié. En plus de la production d'ECS, le système solaire participe au préchauffage de l'air insufflé, limitant ainsi l'énergie de chauffage nécessaire dans la maison. La température de soufflage doit respecter une température minimale de consigne pour des raisons de confort. Les différents modes de fonctionnement du système sont représentés dans la Figure 2.

Le circuit solaire primaire connecte les capteurs à l'échangeur interne du ballon d'ECS à l'aide de la pompe P1, ainsi qu'à la batterie de préchauffage de l'air avec la pompe P2. L'énergie solaire peut être utilisée directement pour chauffer seulement le ballon d'ECS (mode a), pour chauffer seulement l'air insufflé (mode b), pour chauffer en même temps le ballon d'ECS et l'air (mode c) ou indirectement pour chauffer l'air grâce à l'énergie stockée dans le ballon (mode d). L'utilisation d'une vanne 3 voies (V3V) permet d'orienter la circulation du fluide caloporteur vers les capteurs pour les modes a, b et c ou vers le ballon pour le mode d. Un système d'appoint est présent dans le ballon d'ECS (AuxTank). Une énergie auxiliaire doit aussi être fournie pour le préchauffage d'air (AuxAir) en absence d'énergie solaire suffisante pour atteindre la température de soufflage de confort. Les deux systèmes d'appoint considérés

dans cette étude sont des résistances électriques. De plus, un système de chauffage doit compléter la chaleur manquante pour couvrir les besoins.

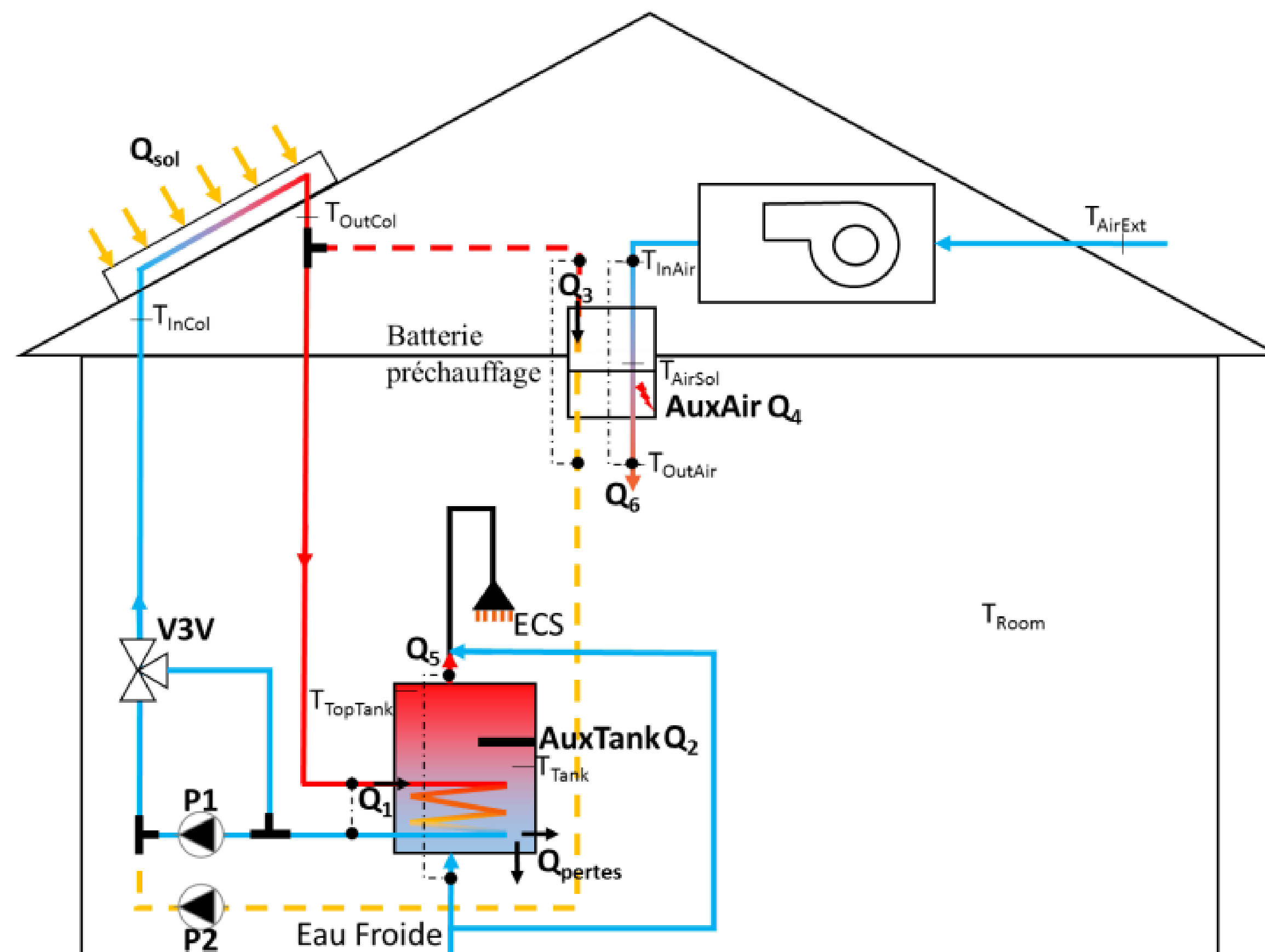


Figure 1. Schéma du système.

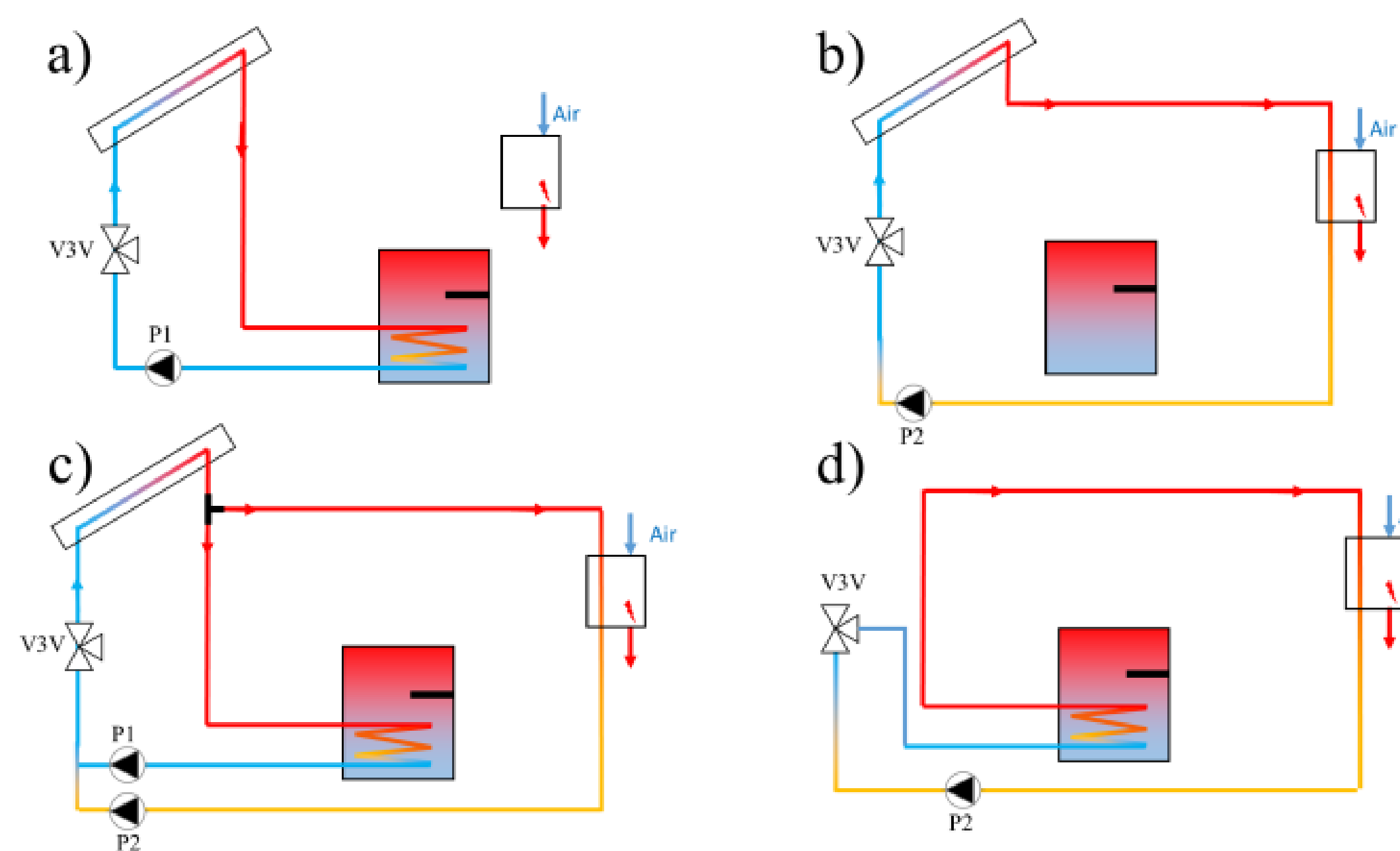


Figure 2. Modes de fonctionnement du système combiné.

L'algorithme de contrôle testé dans cette étude est représenté dans les Figures 3 et 4. Un des challenges de ce système est la définition des priorités dans la répartition de l'énergie solaire.

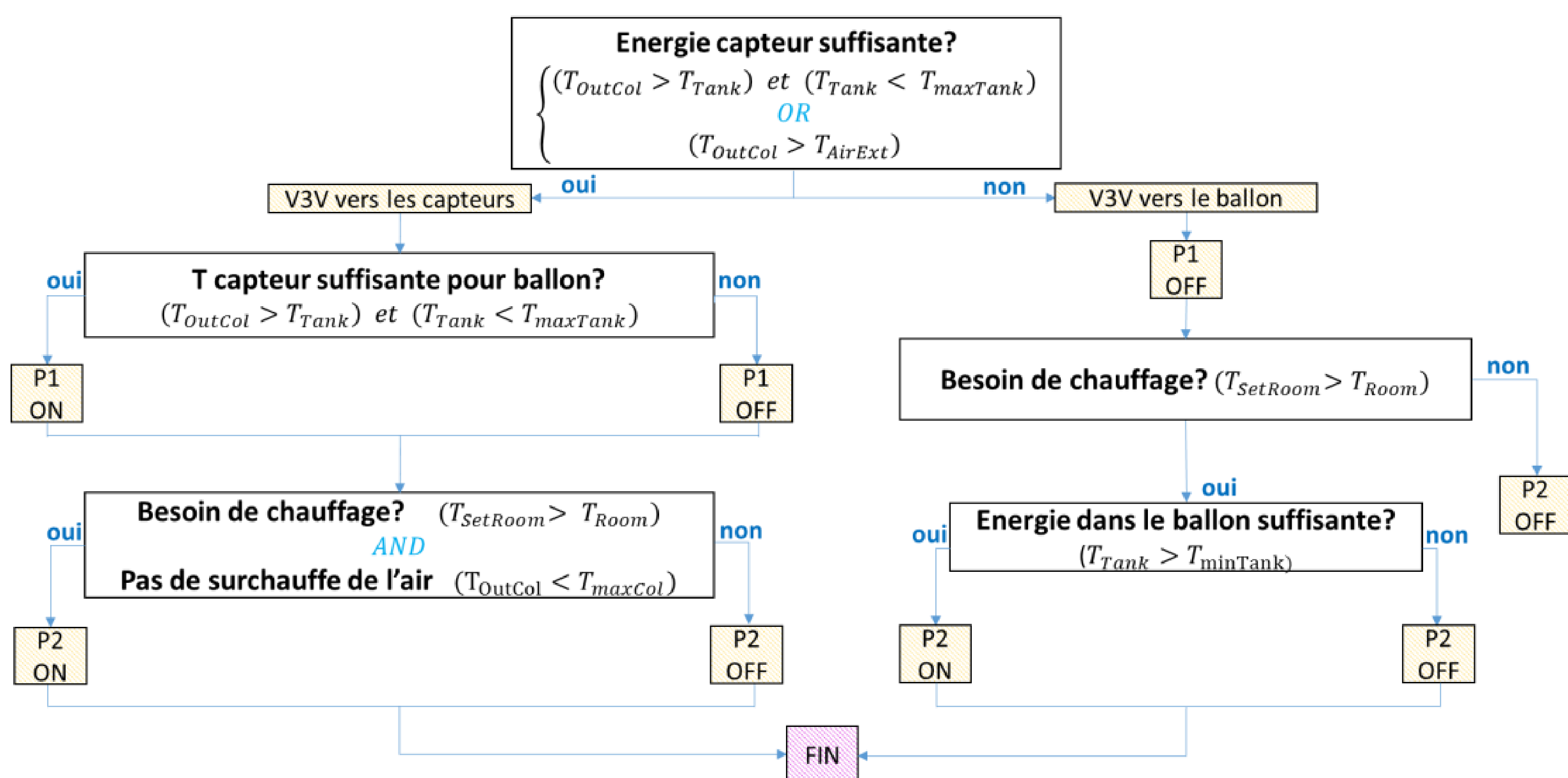


Figure 3. Algorithme de contrôle pour la répartition de l'énergie solaire.

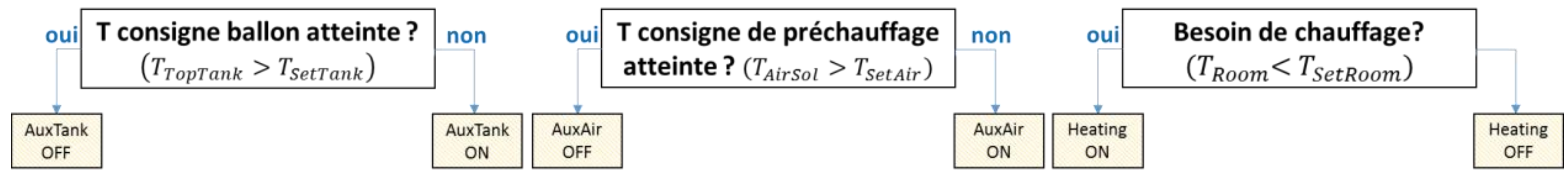


Figure 4. Algorithme de contrôle pour les systèmes d'appoint (à gauche pour le ballon d'ECS et au centre pour la ventilation) ainsi que pour le chauffage (à droite).

La position des capteurs est représentée dans la Figure 1. $T_{\max\text{Tank}}$ est la température maximale du ballon fournie par le fabricant, T_{SetRoom} est la température de consigne à l'intérieur du bâtiment, $T_{\min\text{Tank}}$ est la température minimale dans le ballon pour pouvoir fonctionner en mode d et $T_{\max\text{Col}}$ est la température maximale acceptée à la sortie des capteurs pour chauffer l'air et éviter d'atteindre une température supérieure à 50°C , qui représente la limite des particules carbonisées dans l'air (Feist et al. 2005). T_{SetAir} est la température de consigne minimale définie pour le préchauffage de l'air.

La Figure 3 illustre le fonctionnement de la V3V ainsi que des pompes. Si l'énergie solaire est suffisante pour chauffer le ballon ou l'air lorsqu'il y a un besoin, la V3V s'oriente vers les capteurs solaires. Les pompes P1 et P2 s'activent en conséquence, fonctionnant à vitesse variable par moyen d'une régulation PID. Au contraire, si l'air a besoin d'être chauffé mais que l'énergie solaire n'est pas disponible (pendant la nuit ou des périodes nuageux par exemple), la V3V peut diriger le fluide solaire à travers le ballon pour chauffer ensuite l'air circulant dans la batterie de préchauffage. Dans ce cas-là, P1 est à l'arrêt et P2 en fonctionnement. La Figure 4 explique la mise en route des systèmes d'appoint pour l'ECS (AuxTank) et pour l'air (AuxAir) si les températures de consigne ne sont pas atteintes. Le chauffage (Heating) s'active également si la température du bâtiment diminue en-dessous de la consigne.

3. LE MODELE NUMERIQUE

3.1. CO-SIMULATION

Le modèle est construit en plusieurs étapes. Premièrement, le système combiné ainsi que le mécanisme de contrôle sont modélisés avec le langage Modelica dans l'environnement Dymola. L'approche orientée objet de ce langage permet de prendre en compte le caractère multi physique du système étudié en ce qui concerne le système solaire, la ventilation et l'algorithme de contrôle (Wetter, Bonvini, et Nouidui 2016). Ensuite, le bâtiment est représenté à l'aide du logiciel EnergyPlus (Crawley et al. 2001), offrant un meilleur compromis entre le niveau de détail du bâtiment et le temps de calcul. Finalement, les deux modèles sont couplés à l'aide d'une co-simulation par moyen d'une « *Functional Mockup Interface* » (FMI) (Blochwitz et al. 2011). Pour cela, le modèle du bâtiment est encapsulé sous forme de « *Functional Mockup Unit* » (FMU) et importé dans le logiciel Dymola. Le solveur DASSL de Dymola suit un pas de temps variable tandis que le pas de temps pour l'échange des données entre logiciels est fixé à 10 minutes, ce qui correspond au pas de temps constant du modèle EnergyPlus. Le modèle du système envoie à celui du bâtiment les informations concernant les débits d'air et la température de soufflage pour chaque zone chauffée. En même temps, le modèle du bâtiment transmet à celui du système les températures intérieures à rentrer dans l'algorithme de contrôle ainsi que les conditions météo. Le temps de simulation pour une année avec un processeur Intel Core i3-370M de 2,4 GHz et 4 Go de mémoire RAM est de 26 minutes. Le pas de temps de 10 minutes permet de trouver un bon compromis entre le temps de calcul et le niveau de précision pour une année de simulation. Cependant, une réduction du pas de temps serait nécessaire pour représenter fidèlement le comportement dynamique de l'air.

3.2. HYPOTHESES DE MODELISATION

Le bâtiment modélisé est la maison I-BB présente sur la plateforme INCAS au CEA INES. Les dimensions intérieures sont de 7,5 m x 6,5 m avec une hauteur sous plafond de 2,7 m au rez-de-chaussée (RDC) et de 2,4 m à l'étage. La surface habitable est de 89 m². Le modèle divise la maison en quatre zones thermiques (vide sanitaire, RDC, étage, combles), où seulement le RDC et l'étage sont considérées comme zones chauffées. La ventilation injecte l'air en deux points : à l'étage et au RDC. Si l'insufflation avait lieu pièce par pièce, il serait nécessaire de considérer plus de zones thermiques afin d'obtenir des résultats réalistes. Le scénario des apports internes et d'occupation est pris de la littérature (Spitz 2012).

Pour la modélisation du système avec Modelica, nous avons utilisé la librairie *Buildings* et la librairie de base *Modelica* sur Dymola. Le Tableau 1 montre les paramètres renseignés pour les principaux composants ainsi que les seuils de contrôle qui apparaissent dans les Figures 3 et 4. Le dimensionnement du système est réalisé pour une famille de 4 personnes. La température de consigne du bâtiment est fixée à 19°C pendant les périodes d'occupation en journée, 18°C pendant la nuit et 16°C en périodes d'inoccupation. La consommation d'ECS est de 200 l/jour à 40°C selon un profil statistique annuel.

Paramètres	Valeurs	Paramètres de contrôle	Valeurs
Surface totale de capteurs	2 x 2,32 m ²	T _{SetTank}	55 °C
Inclination des capteurs	33°	T _{minTank}	10 °C
Volume du ballon d'ECS	300 l	T _{maxCol}	60 °C
Nombre de couches du ballon	12	T _{SetAir}	15 °C si T _{Room} < T _{SetRoom} 10 °C si T _{Room} > T _{SetRoom}
Débit d'air	135 m ³ /h	T _{maxTank}	90 °C
Efficacité de l'échangeur	80%		

Tableau 1. a) Paramètres de dimensionnement (à gauche). b) Paramètres de contrôle (à droite).

4. RESULTATS

4.1. LES INDICATEURS

Avant d'étudier le système combiné, il est essentiel de définir les critères d'analyse utilisés (Nowag et al. 2012). La Figure 1 montre les flux de chaleur qui apparaissent dans la définition des indicateurs.

- Le rendement des capteurs (η_{col}), équation 1, est le rapport de l'énergie livrée par le fluide caloporteur dans le ballon (Q_1) et dans l'échangeur avec l'air (Q_3) sur l'irradiation solaire qui arrive aux capteurs (Q_{sol}) pendant une durée spécifique.

$$\eta_{col} = \frac{Q_1 + Q_3}{Q_{sol}} \quad (1)$$

- La fraction solaire exprime le rapport entre l'énergie fournie par le solaire et la charge totale du système (Q_5 pour l'ECS et Q_6 pour l'air). L'énergie solaire utile est calculée comme la différence entre la charge et l'énergie d'appoint fournie (Q_2 pour le ballon et Q_4 pour l'air). Dans le cas de l'ECS, il faut tenir compte de la part d'appoint perdue à travers les parois du ballon ($Q_{pertesApp}$). Celle-ci est définie en pondérant les pertes totales du ballon (Q_{pertes}) en fonction du rapport entre l'énergie auxiliaire (Q_2) et l'énergie totale fournie au ballon (solaire Q_1 + appoint Q_2) (ADEME 2016). Cette étude considère les fractions solaires pour l'ECS ($F_{solIECS}$), pour le préchauffage d'air (F_{solAir}) ainsi que la fraction solaire totale (F_{solGlo}) selon les expressions 2, 3 et 4.

$$F_{SolECS} = \frac{Q_5 - (Q_2 - Q_{pertesApp})}{Q_5} \text{ avec } Q_{pertesApp} = \frac{Q_{pertes} \cdot Q_2}{Q_1 + Q_2} \quad (2)$$

$$F_{SolAir} = \frac{Q_6 - Q_4}{Q_6} \quad (3)$$

$$F_{SolGlo} = \frac{Q_5 - (Q_2 - Q_{pertesApp}) + Q_6 - Q_4}{Q_5 + Q_6} \quad (4)$$

- L'efficacité thermique du stockage (η_{st}) est définie dans l'équation 5 comme le rapport entre la quantité d'énergie solaire stockée et la quantité totale d'énergie (solaire Q_1 + appoint Q_2) fournie au ballon, déterminée à partir des déperditions (Q_{pertes}).

$$\eta_{st} = 1 - \frac{Q_{pertes}}{Q_1 + Q_2} \quad (5)$$

4.2. LES PERFORMANCES DU SYSTEME

Nous comparons ici les performances annuelles du système couplé pour la production d'ECS et le préchauffage d'air à l'aide d'un chauffe-eau solaire individuel (CESI) classique où le préchauffage se fait seulement avec une résistance électrique (système découplé, toujours avec une ventilation par insufflation). Les résultats sont obtenus pour le climat de Lyon.

	η_{col} (%)	η_{st} (%)	F_{SolECS} (%)	F_{SolAir} (%)	F_{SolGlo} (%)	Aux_{ECS} (J)	Aux_{Air} (J)	Heating (J)
Système découplé	35,4	77,5	71,5	0	44,1	$3,06 \cdot 10^9$	$5,19 \cdot 10^9$	$4,26 \cdot 10^9$
Système couplé	38,5	81,4	57,9	37,6	49,4	$4,31 \cdot 10^9$	$3,72 \cdot 10^9$	$3,89 \cdot 10^9$

Tableau 2. Résultats des performances annuelles du système.

Le Tableau 2 montre que le système couplé améliore le rendement des capteurs (η_{col}) car l'énergie solaire peut être aussi utilisée à basse température pour chauffer l'air. Le rendement du ballon (η_{st}) est également amélioré, d'une part avec la diminution d'énergie solaire fournie au ballon au profit de l'air et d'autre part avec l'utilisation du système en mode d (Figure 2). La figure 5 compare les diagrammes de Sankey concernant le bilan énergétique du ballon pour le cas découplé et le cas couplé. Le ballon se charge grâce à l'apport solaire et au système d'appoint, fournissant de l'énergie à l'ECS et à l'air dans le cas couplé (mode d). L'énergie restante est perdue à travers les parois du ballon. Logiquement, la fraction solaire pour le préchauffage d'air (F_{SolAir}) est plus importante dans le cas couplé en détriment de la diminution de la couverture solaire de l'ECS (F_{SolECS}). Cependant, la fraction solaire globale pour l'ECS et le préchauffage d'air (F_{SolGlo}) s'améliore de 5 % en utilisant le système solaire combiné.

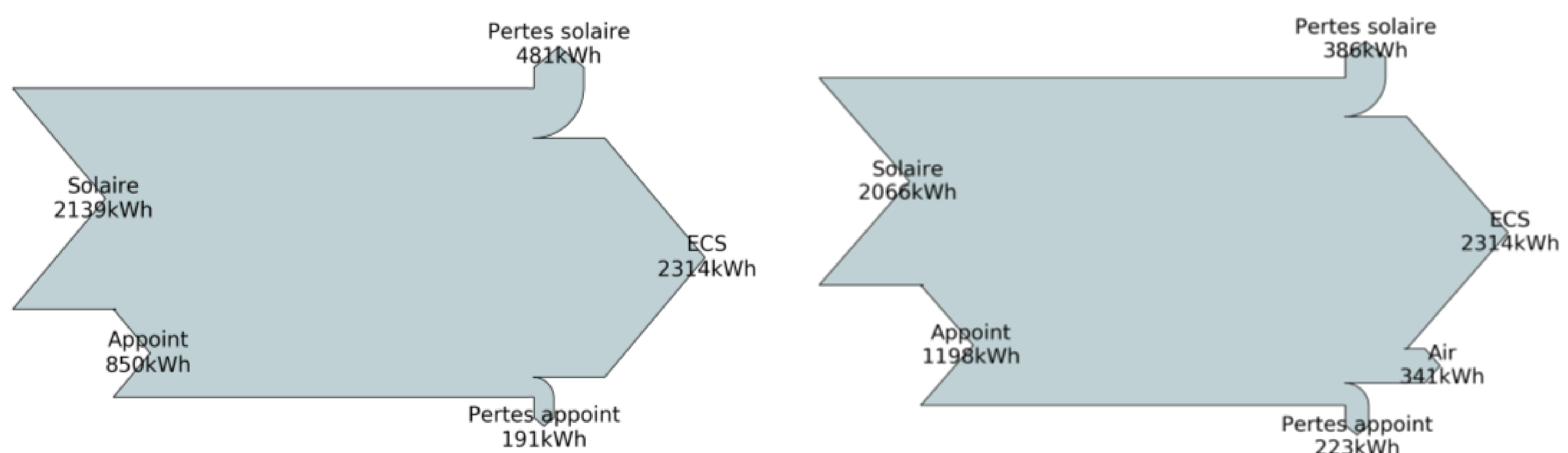


Figure 5. Diagramme de Sankey du ballon dans le cas découplé (à gauche) et le cas couplé (à droite).

La Figure 6 représente la température d'air insufflé pendant la période de chauffe (de janvier à mi-mai et d'octobre à décembre). La représentation de la température extérieure (T_{Ext}), avec une moyenne de 7,6 °C pendant la même période, permet d'observer l'amélioration du confort grâce au préchauffage

de l'air avec le solaire et une résistance d'appoint (cas couplé) ou seulement avec une résistance (cas découplé). La température de soufflage est supérieure avec le système couplé qu'avec le système découplé (14,3 °C et 13,4 °C en moyenne respectivement). Cela permet de diminuer de 20% l'énergie totale nécessaire au préchauffage de l'air et au chauffage en comparaison avec un système découplé et de 5% si nous considérons aussi l'énergie d'appoint dans le ballon (Tableau 2).

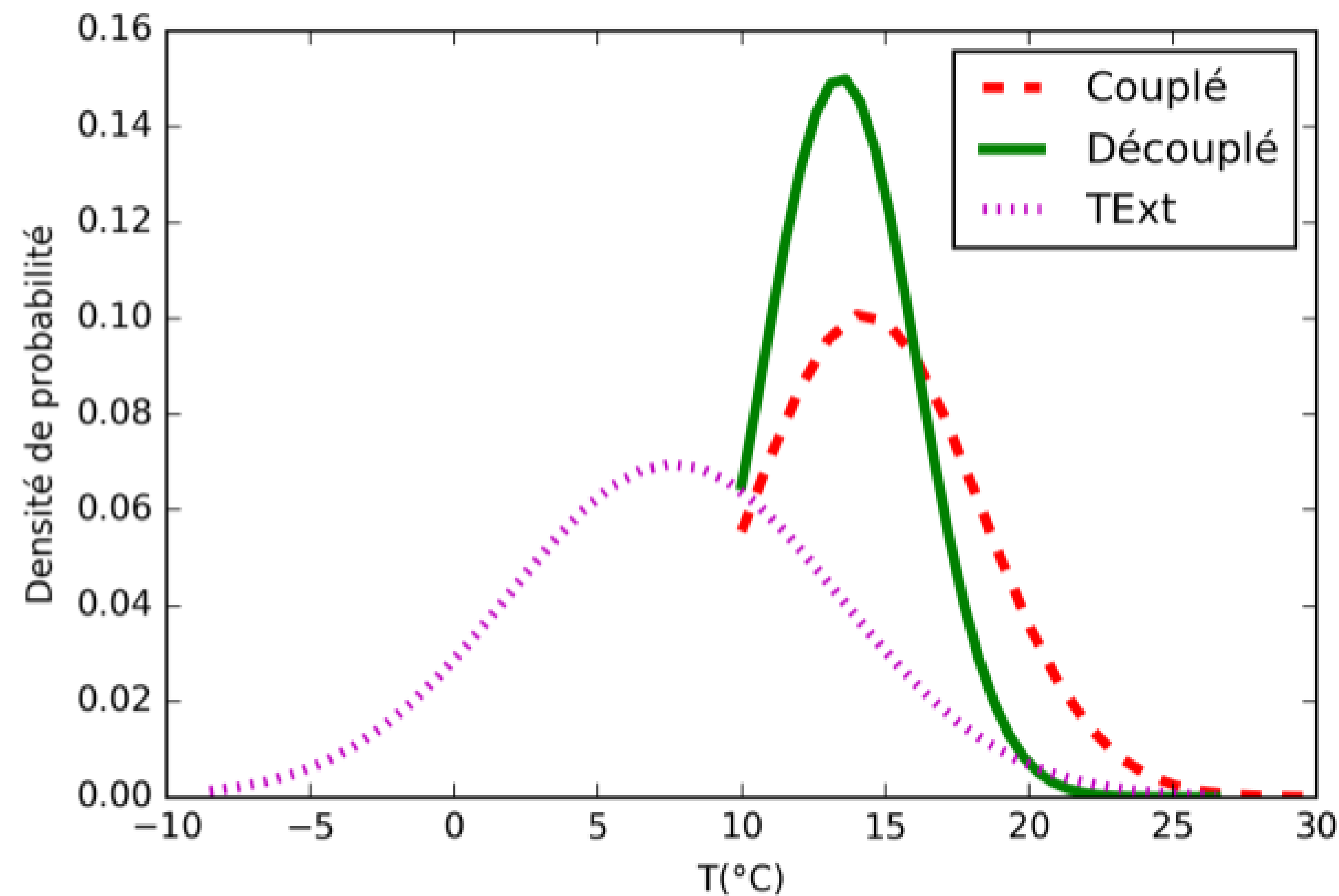


Figure 6. Histogrammes des températures de l'air insufflé et de la température extérieure approximés à la loi normale pendant la période de chauffe.

5. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Les dernières réglementations modifient la distribution de besoins dans le bâtiment et renforcent l'utilisation des énergies renouvelables pour rendre les bâtiments zéro-énergie ou à énergie positive. Ce contexte nous a conduits à étudier un système solaire combiné pour l'ECS et le préchauffage d'air grâce à un dispositif de ventilation par insufflation. Le modèle développé pour l'étude utilise une co-simulation de type FMI, permettant d'étudier un système multi-physique grâce au langage orienté objet Modelica (logiciel Dymola), tout en profitant d'un logiciel dédié au bâtiment comme EnergyPlus. La modélisation du bâtiment en une zone thermique par étage est une approche adaptée aux systèmes de ventilation centralisés. Cependant, une ventilation pièce par pièce aurait besoin d'un modèle plus fin.

La comparaison entre le système combiné et un CESI classique utilisé avec une résistance électrique pour le préchauffage de l'air montre qu'il est possible d'augmenter le rendement des capteurs et du ballon d'environ 3% en plus d'améliorer la fraction solaire simultanée d'ECS et de préchauffage d'air de 5%. Il est aussi possible d'économiser 5% d'énergie sur la somme du chauffage et des appoints d'ECS et de préchauffage d'air. Cette étude montre ainsi le potentiel du couplage entre le solaire thermique et le vecteur air dans le bâtiment. Des travaux sont en cours pour d'autres cas concernant le climat, le dimensionnement et le contrôle dans le but de trouver les conditions de fonctionnement optimales du système étudié. Une analyse de sensibilité permettra ainsi d'identifier les paramètres les plus influents sur les performances énergétiques en amont de l'optimisation. Etant donné que cela entraîne de nombreuses simulations, des progrès concernant le temps de calcul peuvent et doivent être encore effectués. Les pistes s'orientent vers une amélioration du code de simulation (Jorissen, Wetter, et Helsen 2015), l'utilisation de méta modèles ou d'une période de temps réduite pour calculer les performances annuelles du système (Leconte 2011).

Enfin, cette étude a considéré l'air exclusivement du point de vue énergétique, supposant un mélange parfait avec l'intérieur du bâtiment. Cependant, l'insufflation de l'air est un mécanisme complexe de

convection mixte. Il serait ainsi intéressant de faire des études numériques de type CFD et/ou expérimentales à la fois sur le mélange de l'air dans les pièces et en lien avec le confort de l'occupant.

6. REMERCIEMENTS

Ce travail a été en partie financé par le Conseil Savoie Mont Blanc et a aussi bénéficié d'une aide de l'Etat au titre du programme d'Investissements d'avenir portant la référence ANR-10-ITE-0003.

7. BIBLIOGRAPHIE

- ADEME. 2016. « Etude de faisabilité et de dimensionnement d'une installation solaire thermique collective. Guide à la rédaction d'un cahier de charges. »
- Blochwitz, T., M. Otter, M. Arnold, C. Bausch, C. Clauß, H. Elmqvist, A. Junghanns, et al. 2011. « The Functional Mockup Interface for Tool independent Exchange of Simulation Models ». In *Proceedings of the 8th International Modelica Conference*.
- Bois, Jérémy. 2017. « Aide à la conception de maisons à énergie positive à forte ouverture solaire ». PhD thesis, Université de Bordeaux.
- 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* 33 (4): 319-31.
- European Commission. 2011. A Roadmap for moving to a competitive low carbon economy in 2050. »
- European Commission. 2013. *Energy, Transport and Environment Indicators, 2013 Edition*. Luxembourg: Publications Office of the European Union.
- Feist, Wolfgang, Jürgen Schnieders, Viktor Dorer, et Anne Haas. 2005. « Re-inventing air heating: Convenient and comfortable within the frame of the Passive House concept ». *Energy and Buildings, Research That Inspires 125 Years of EMPA*, 37 (11): 1186-1203.
- Ionescu, Constantin, Tudor Baracu, Gabriela-Elena Vlad, Horia Necula, et Adrian Badea. 2015. « The historical evolution of the energy efficient buildings ». *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 49 (septembre): 243-53.
- Jorissen, Filip, Michael Wetter, et Lieve Helsen. 2015. « Simulation Speed Analysis and Improvements of Modelica Models for Building Energy Simulation ». In *Proceedings of the 11th International Modelica Conference*.
- Leconte, Antoine. 2011. « Identification de caractéristiques réduites pour l'évaluation des performances des systèmes solaires combinés ». Phd thesis, Université de Grenoble.
- Nowag, Julia, François Boudéhen, Amandine Le Denn, Franck Lucas, Olivier Marc, Mihai Radulescu, et Philippe Papillon. 2012. « Calculation of Performance Indicators for Solar Cooling, Heating and Domestic Hot Water Systems ». *Energy Procedia, 1st International Conference on Solar Heating and Cooling for Buildings and Industry (SHC 2012)*, 30 (janvier): 937-46.
- Official Journal of the European Union. 2010. « Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings. »
- Official Journal of the European Union. 2012. « Directive 2012/27/EU of the European Parliament and of the Council of 25 October 2012 on energy efficiency, amending Directives 2009/125/EC and 2010/30/EU and repealing Directives 2004/8/EC and 2006/32/EC. »
- Peuportier, Bruno. 2016. *Energétique des bâtiments et simulation thermique: Modèles - Mise en oeuvre - Études de cas*. 1^{re} éd. Eyrolles.
- Rahmeh, Mireille. 2014. « Etude expérimentale et numérique des performances de la ventilation mécanique par insufflation : qualité de l'air intérieur dans les bâtiments résidentiels ». Phd thesis, Université de La Rochelle.
- Spitz, Clara. 2012. « Analyse de la fiabilité des outils de simulation et des incertitudes de métrologie appliquée à l'efficacité énergétique des bâtiments ». PhD thesis, Université de Grenoble.
- Trčka, Marija, Jan L. M. Hensen, et Michael Wetter. 2009. « Co-simulation of innovative integrated HVAC systems in buildings ». *Journal of Building Performance Simulation* 2 (3): 209-30.
- Wetter, Michael, Marco Bonvini, et Thierry S. Noudui. 2016. « Equation-based languages – A new paradigm for building energy modeling, simulation and optimization ». *Energy and Buildings* 117 (avril): 290-300.

Détermination des paramètres sensibles pour la conception de bassin de toit ouvert pour le rafraîchissement passif

Renaud Geoffroy¹, Emmanuel Bozonnet*¹, Patrick Salagnac¹

¹Université de la Rochelle, LaSIE UMR CNRS 7356

Avenue Michel Crépeau, 17042 la Rochelle

*emmanuel.bozonnet@univ-lr.fr

RESUME. Dans ce papier, nous étudions une technique de rafraîchissement passif, à fort potentiel, basée sur la rétention d'eau en toiture (bassin de toit ouvert). Ce système utilise le phénomène d'évaporation pour réduire les flux de chaleur en toiture. Le sujet porte sur la simulation de ce dispositif via un modèle simplifié unidimensionnel de type nodal d'une toiture avec lame d'eau. Une étude paramétrique sur les performances thermiques du dispositif a été réalisée afin d'améliorer la compréhension du comportement de ce système de rafraîchissement passif. Ce travail est une première étape pour le développement de dispositifs évaporatifs en toiture, contrôlés et dimensionnés de façon optimisée.

MOTS-CLÉS : Bassin de toit, Rafraîchissement passif, Evaporation, Simulation

ABSTRACT. In this paper, we propose to study an emerging technique, at high potential, based on water retention: the open roof pond. To reduce the heat flux through the flat roof, this system mainly uses the natural phenomenon of evaporation. This subject focuses on the simulation of this apparatus with a nodal type and unidimensional simplified model of a flat roof with a "water sheet". A parametrical study on the thermal performances of the system is carried in order to better understand the behavior of this passive cooling system. This work is the first step on the road to the development of evaporative devices on roofs, monitored and scaled in an optimized way.

KEYWORDS: Roof pond, Passive cooling, Evaporation, Simulation

1. INTRODUCTION

En France, le secteur commercial est le principal consommateur d'énergie du secteur tertiaire, et la climatisation y représente une part importante. La toiture-terrasse, élément le plus exposé au rayonnement solaire estival, est la principale cause de surchauffes de ce type de bâtiment. C'est aussi l'élément d'enveloppe avec le plus grand potentiel de rafraîchissement par échange avec l'air extérieur et par rayonnement vers la voûte céleste. Le rafraîchissement passif de toiture, dont les techniques les plus répandues aujourd'hui sont le traitement radiatif type « cool-roof » et la toiture végétale, peut permettre de réduire ces consommations. Associant propriétés radiatives et échanges latents, nous proposons l'étude d'un bassin de toit, technique moins répandue et potentiellement intéressante.

Le bassin de toit fournit du froid au bâtiment de par les phénomènes d'évaporation et d'échange radiatif nocturne. Celui-ci agit donc comme un puit pour les flux de chaleur intérieurs et extérieurs. Les

potentiels de rafraîchissement par évaporation et rayonnement de grandes longueurs d'ondes sont respectivement liés à la différence de pression de vapeur en toiture et aux basses températures de ciel. Ce dispositif est comparable aux toitures végétales avec en plus la possibilité d'utiliser de l'eau salée, un gain sur la maintenance de végétation de toiture et pas de membrane spécifique contre les racines à installer.

Des expériences ont montré que ce type de dispositif est efficace sur le confort thermique dans les zones arides et tempérées. En effet, une étude réalisée en Afrique du Sud montre par exemple que le pic de température intérieure passe de 33,97 °C à 28,41 °C grâce à ce système (Vorster et Dobson 2011). Cela a conduit à une réduction de la charge de climatisation et du flux de chaleur transféré dans la cellule expérimentale de respectivement 51,07 % et 40,62 %.

De nombreuses variantes ont été conçues et proposées pour améliorer l'efficacité des bassins de toit : isolation flottante ou mobile, ombragé, fermé, ventilé, avec asperseurs d'eau... Diverses études ont montré que ces variantes étaient en général plus performantes que le bassin de toit ouvert (Sharifi 2015; Runsheng et al. 2003). Par exemple, à New Delhi à 40 °C, la version ombragée préserve la température intérieure à 28 °C, alors que le bassin de toit ouvert ne limite la température qu'à 31,5 °C (Yadav et Rao 1983).

Malgré cela, le bassin de toit ouvert reste une solution intéressante pour les climats méditerranéen et océanique, comparable aux autres dispositifs de rafraîchissement passif. Pour étudier son potentiel, nous analyserons dans un premier temps les phénomènes physiques agissant sur la toiture, qui seront par la suite introduits dans un modèle numérique. Après une brève description de ce modèle, les résultats d'une étude paramétrique seront présentés afin de définir les paramètres influents sur la performance du bassin de toit ouvert, ainsi que leurs interactions.

2. PRESENTATION DU MODELE

2.1. DESCRIPTION DU BATIMENT COMMERCIAL

Pour cette étude, le bâtiment choisi possède une surface de toiture importante afin de bénéficier au maximum du rafraîchissement passif. Le bâtiment commercial, d'une surface au sol de $36 \times 36 \text{ m}^2$ et d'une hauteur de 10 m, est situé à Carpentras. Les parois verticales comprennent un tiers de surface vitrée. Les murs extérieurs sont isolés et ont une épaisseur totale de 34 cm (2 cm de plâtre, 12 cm de laine de verre, 20 cm de béton). L'inertie thermique du sol de ce bâtiment est principalement due à la dalle en béton de 20 cm d'épaisseur. Le plancher est isolé avec 12 cm de laine de verre. Un carrelage de 2 cm recouvre le sol. Le bâtiment est équipé d'un système de chauffage et d'une climatisation dont les températures de consigne de jour et de nuit sont fixées à 24°C et 26°C respectivement. Afin d'assurer le renouvellement d'air, une ventilation mécanique contrôlée (VMC) fournit un débit d'air Q_v de 0,42 vol/h pendant la journée. Les infiltrations du bâtiment Q_{inf} sont évaluées à 0,16 vol/h. Un scénario d'apports internes est introduit (12,5 W/m² le jour et 5 W/m² la nuit).

2.2. MODELISATION DU BATIMENT

Dans ce travail, nous avons choisi de modéliser de façon simplifiée le bâtiment. La lame d'eau est décomposée en deux nœuds, un en surface et un au fond du bassin. Les éléments de structures (parois) sont discrétisés à l'aide de la méthode des différences finies (Figure 3). Les différentes équations de

bilan (partie 2.4.) sont assemblées en un système d'EDO. Pour la discrétisation temporelle, un schéma de type Euler implicite a été utilisé. Le système se met alors sous la forme :

$$\mathbf{C} \frac{\vec{T}^t - \vec{T}^{t-1}}{\Delta t} = \mathbf{A}^t \vec{T}^t + \vec{B}^t \quad (1)$$

où \mathbf{C} est une matrice diagonale regroupant les capacités thermiques, \mathbf{A} est une matrice tridiagonale regroupant les termes de transfert de chaleur (conduction, convection ou rayonnement), \vec{T}^{t-1} et \vec{T}^t sont les vecteurs de température aux instants t et $t-\Delta t$, et \vec{B}^t est le vecteur des sollicitations thermiques.

2.3. MODELE PHYSIQUE DE LA TOITURE

Le premier objectif du modèle est de calculer les températures et les flux de masse et de chaleur en toiture. Comme on peut le voir sur la Figure 1, de multiples phénomènes interagissent et sont décrits dans les parties suivantes.

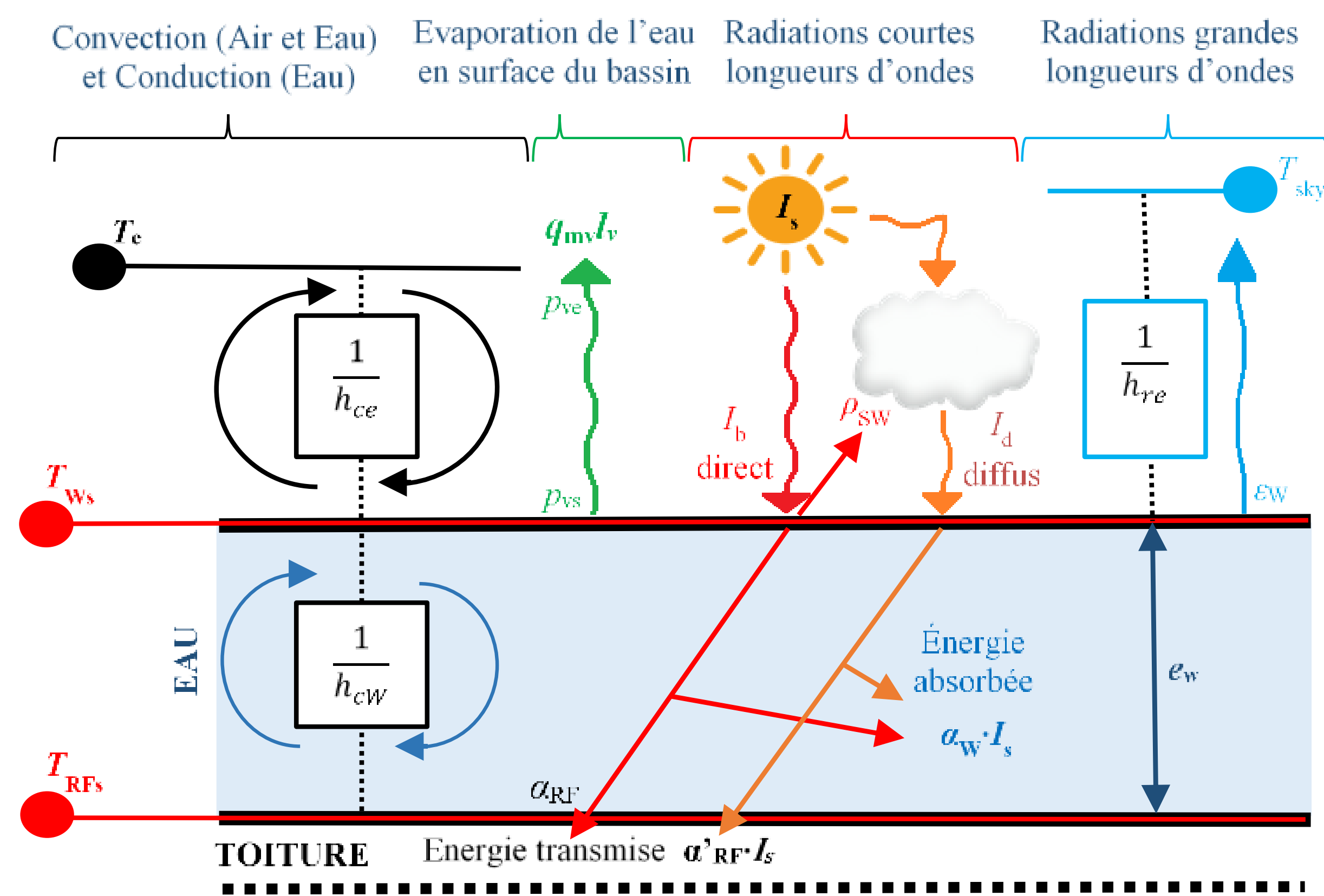


Figure 1 : Mécanismes thermohydrauliques en toiture-terrasse avec présence d'une lame d'eau

2.3.1. Échanges convectifs

Les coefficients d'échanges convectifs (convection forcée ou mixte) entre la surface de la lame d'eau et l'air extérieur (h_{ce}) et au sein de la lame d'eau (convection naturelle) sont déterminés à partir de la corrélation suivante :

$$Nu = C X^n \quad (2)$$

où C et n sont des constantes (Eyglunet 1997 ; Taine et Petit 1997) et X représente le nombre de Rayleigh (convection naturelle) ou de Reynolds (Convection forcée). Nu est le nombre de Nusselt.

2.3.2. Évaporation

L'énergie d'évaporation $q_{mv} l_v$ à la surface de la lame d'eau est calculée par la loi de Stefan (Kishore et Joshi 1984), qui prend en compte le coefficient de convection de l'air h_{ce} , la pression partielle de vapeur de l'air p_{ve} et la pression de vapeur saturante à la surface du bassin p_{vs} .

$$q_{mv} l_v = \frac{l_v M_w}{\rho_e c_e R T_e} h_{ce} (p_{vs} - p_{ve}) \quad (3)$$

où l_v est la chaleur latente d'évaporation (kJ/kg), R est la constante des gaz parfaits (J/(mol·K)), M_w est la masse molaire de l'eau (g/mol), $\rho_c c_c$ est la chaleur spécifique de l'air (kJ/(kg·K)), et T_e est la température extérieure (K).

2.3.3. Absorption du rayonnement solaire par la lame d'eau

L'éclairement solaire est en parti absorbé par la lame d'eau et la toiture. Wu et al. (2009) ont proposé un modèle physique pour évaluer les coefficients d'absorption de l'eau et de la toiture. L'éclairement solaire I_S (W·m²) est d'abord décomposé en 12 bandes spectrales I_{Sj} réparties dans les éclairagements directs et diffus. On détermine ensuite le coefficient de réflexion dû à l'éclairement solaire direct sur l'eau $\rho_{SW,b}$ à partir de l'angle d'incidence de l'éclairement solaire sur la toiture θ_s . Pour l'éclairement pénétrant la lame d'eau, il faut considérer les coefficients d'extinction de l'éclairement dans le bassin par bande spectrale, le coefficient d'absorption de la toiture sans lame d'eau α_{RF} , ainsi que les inter-réflexions à l'interface eau-air.

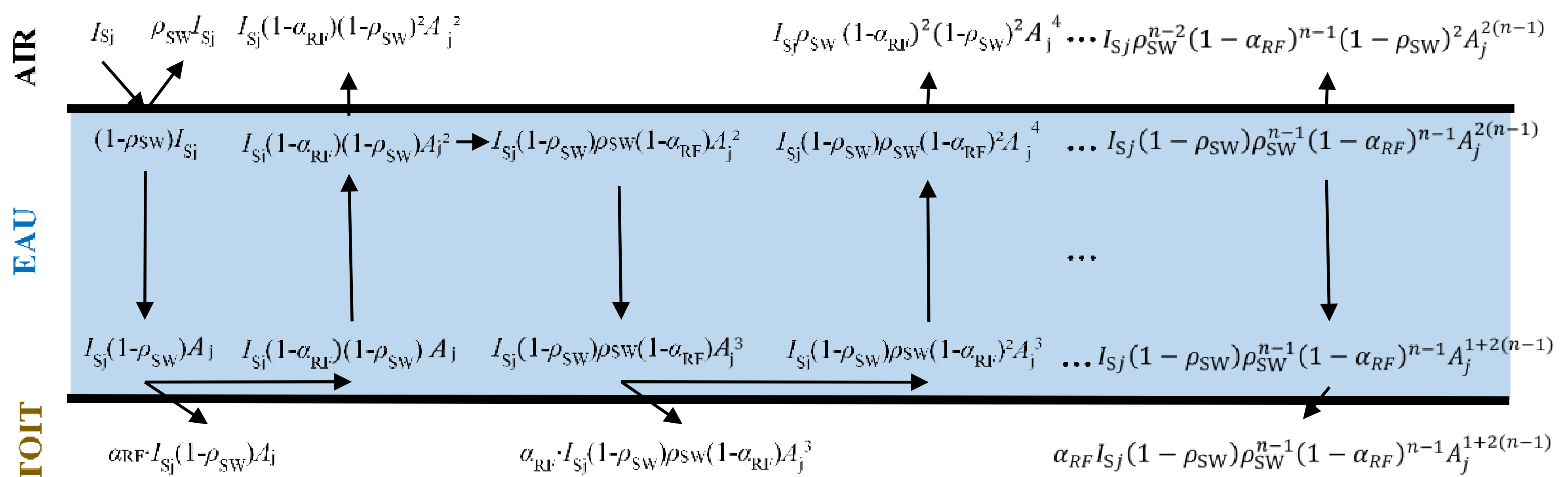


Figure 2 : Cheminement d'une bande spectrale du rayonnement solaire dans une lame d'eau

A_j est le coefficient représentant l'extinction d'une bande spectrale de l'énergie solaire dans la lame d'eau. A_j et ρ_{SW} se calculent différemment pour l'éclairement solaire diffus. En sommant les énergies arrivant au fond du bassin et repartant dans l'air affichés sur la Figure 2, on obtient des sommes géométriques de raisons positives, non nulles et strictement inférieures à 1 : ces sommes sont finies. Il ne reste plus qu'à sommer maintenant les bandes spectrales pour obtenir l'éclairement solaire absorbé par la toiture $I_{Sabs,RF}$ et celui repartant dans l'air $I_{Sr,WRF}$. On obtient finalement les coefficients d'absorption de la toiture et de la lame d'eau α'_{RF} et α_w :

$$\alpha_w = \frac{I_S - I_{Sabs,RF} - I_{Sr,WRF}}{I_S} \quad \alpha'_{RF} = \frac{I_{Sabs,RF}}{I_S} \quad (4), (5)$$

2.3.4. Échange radiatif en grandes longueurs d'ondes du bassin vers le ciel

En linéarisant l'échange radiatif en grandes longueurs d'ondes (GLO), celui-ci peut s'exprimer par le coefficient d'échange radiatif extérieur h_{re} .

$$h_{re} = 4\sigma \varepsilon_w T_{SKY}^3 \quad (6)$$

avec ε_w l'émissivité GLO de l'eau, σ la constante de Stefan-Boltzmann (W/(m²·K⁴)) et T_{SKY} la température de ciel (K).

2.4. MODELE NUMERIQUE DE LA TOITURE

Chaque matériau, excepté la lame d'eau, est découpé en un nombre fini de couches (Figure 3).

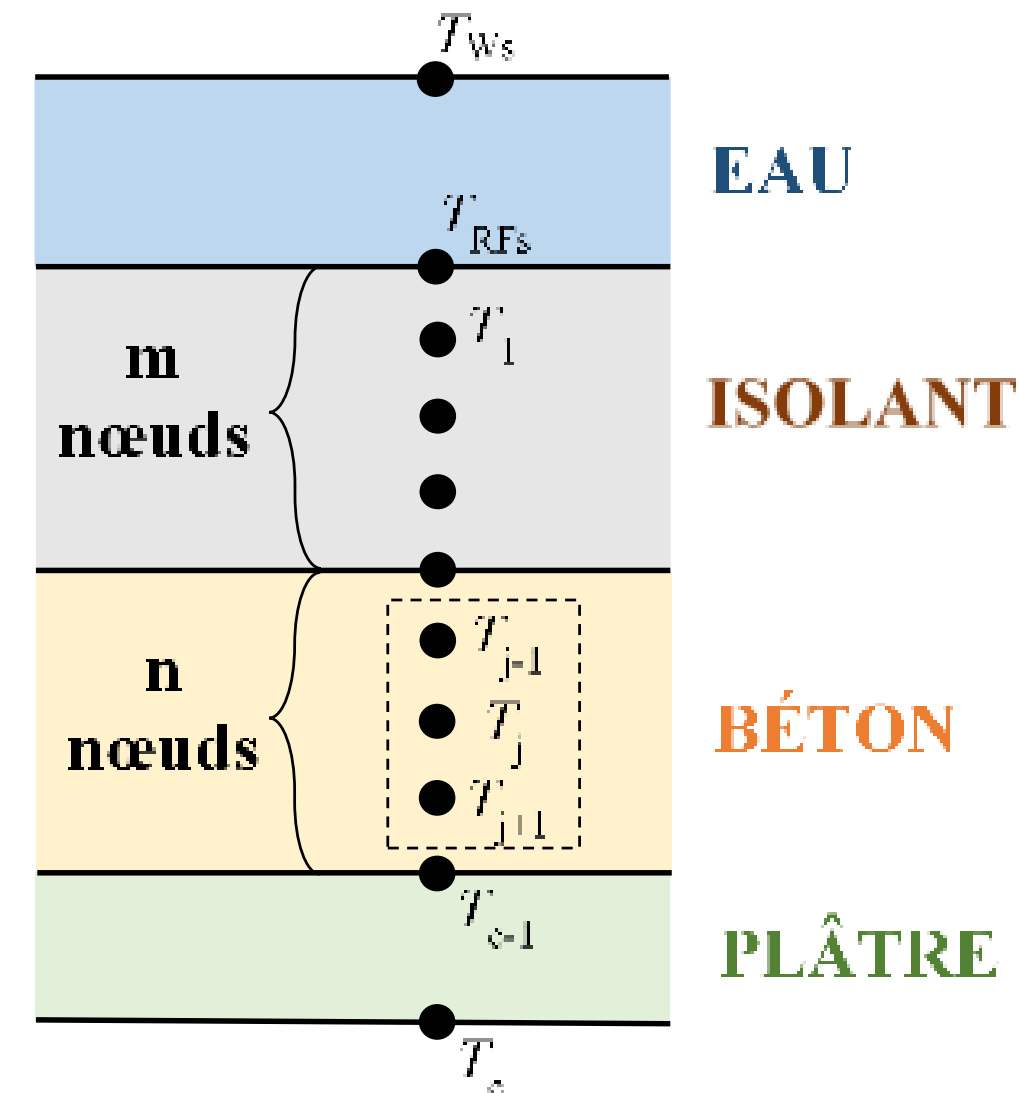


Figure 3 : Discretisation de la toiture

Les équations de bilan pour la toiture sont :

- Bilan thermique du nœud (T_{Ws}) à la surface de l'eau :

$$\left(\rho c \frac{e}{2}\right)_W \frac{dT_{Ws}}{dt} = h_{ce}(T_e - T_{Ws}) + h_{re}(T_{sky} - T_{Ws}) + h_{cw}(T_{RFS} - T_{Ws}) + \frac{\alpha_W I_S}{2} - q_{mv} l_v \quad (7)$$

où ρc est la capacité thermique volumique du volume étudié ($J/(m^3 \cdot K)$) et e est l'épaisseur de la couche d'eau.

- Bilan thermique du nœud (T_{RFS}) à l'interface eau-toiture :

$$\left[\left(\rho c \frac{e}{2}\right)_W + \left(\rho c \frac{e}{2}\right)_{RF}\right] \frac{dT_{RFS}}{dt} = \left(\frac{2\lambda}{e}\right)_{RF} (T_1 - T_{RFS}) + h_{cw}(T_{Ws} - T_{RFS}) + \frac{\alpha_W I_S}{2} + \alpha'_{RF} I_S \quad (8)$$

où λ est la conductivité thermique du volume étudié ($W/(m \cdot K)$).

- La toiture multicouche est discrétisée en couches indicées i (Figure 3). L'équation du bilan thermique du nœud j (T_j) s'écrit :

$$\left[\left(\rho c \frac{e}{2}\right)_{j-1/2} + \left(\rho c \frac{e}{2}\right)_{j+1/2}\right] \frac{dT_j}{dt} = \left(\frac{2\lambda}{e}\right)_{j-1/2} (T_{j-1} - T_j) + \left(\frac{2\lambda}{e}\right)_{j+1/2} (T_{j+1} - T_j) \quad (9)$$

- Bilan thermique du nœud (T_c) à l'interface plafond / ambiance intérieure :

$$\left(\rho c \frac{e}{2}\right)_{c-1/2} \frac{dT_c}{dt} = \left(\frac{2\lambda}{e}\right)_{c-1/2} (T_{c-1} - T_c) + h_{RFi}(T_i - T_c) \quad (10)$$

où h_{RFi} est le coefficient d'échange global entre le plafond et l'ambiance intérieur et T_i la température opérative intérieure.

2.5. CALCUL DE LA PUISSANCE DE CLIMATISATION

Pour déterminer l'effet du dispositif sur le rafraîchissement du bâtiment, nous déterminons la puissance de climatisation P_{cool} (W) du bâtiment par la relation suivante :

$$P_{cool} = \sum_{i \in \{wall, m, c\}} h_{RCi} A_i (T_i - T_{spc}) + [A_{win} U_{win} + 0,34(Q_v + Q_{inf})](T_e - T_{spc}) + A_{win} I_s f_{sol} + P_{apin} \quad (11)$$

où h_{RCin} sont les coefficients d'échange global à l'intérieur du bâtiment, T_{spc} est la température de consigne de climatisation, T_i est la température opérative intérieure, A_{win} est la surface vitrée et U_{win} le coefficient de déperdition des fenêtres ($W/(K \cdot m^2)$), Q_v et Q_{inf} sont les débits de ventilation et d'infiltration (m^3/s), f_{sol} est le facteur solaire du bâtiment et P_{apin} représente les apports internes (W).

3. RESULTATS ET ANALYSE

A partir du modèle de bâtiment et de toiture, nous avons réalisé une étude paramétrique. La première partie s'intéresse aux paramètres liés à la toiture et la seconde à l'impact des conditions météorologiques.

3.1. PARAMETRES DE DIMENSIONNEMENT DE LA TOITURE

Dans cette étude, nous analysons les paramètres de sortie concernant le potentiel de rafraîchissement du dispositif en toiture, soit : l'écart du besoin en froid et la différence de température en surface de toiture pour une toiture conventionnelle avec et sans lame d'eau. Dans un premier temps, nous avons choisi d'étudier la réponse de ce système sur une période de quatre jours correspondant aux jours les plus chauds extraits du fichier météorologique de la ville de Carpentras. Les paramètres étudiés sont : le coefficient d'absorption en courtes longueurs d'ondes de la toiture (0,2 ; 0,5 ; 0,8), l'épaisseur de l'isolation en toiture (2, 10 et 20 cm) et l'épaisseur de la lame d'eau (2, 10 et 20 cm).

Dans le cas de la toiture conventionnelle, la **Error! Reference source not found.** présente l'évolution des besoins en froid et de la température de surface de la toiture en fonction de l'épaisseur de l'isolation et du coefficient d'absorption solaire. On peut noter que pour une même absorptivité, le renforcement de l'isolation diminue considérablement les besoins en froid, la température de surface quant-à-elle évolue très peu. En ce qui concerne l'absorptivité, celle-ci a un impact important sur la température. Pour les besoins en froid, son impact est relativement important pour une toiture faiblement isolée et moindre dans le cas d'une toiture fortement isolée.

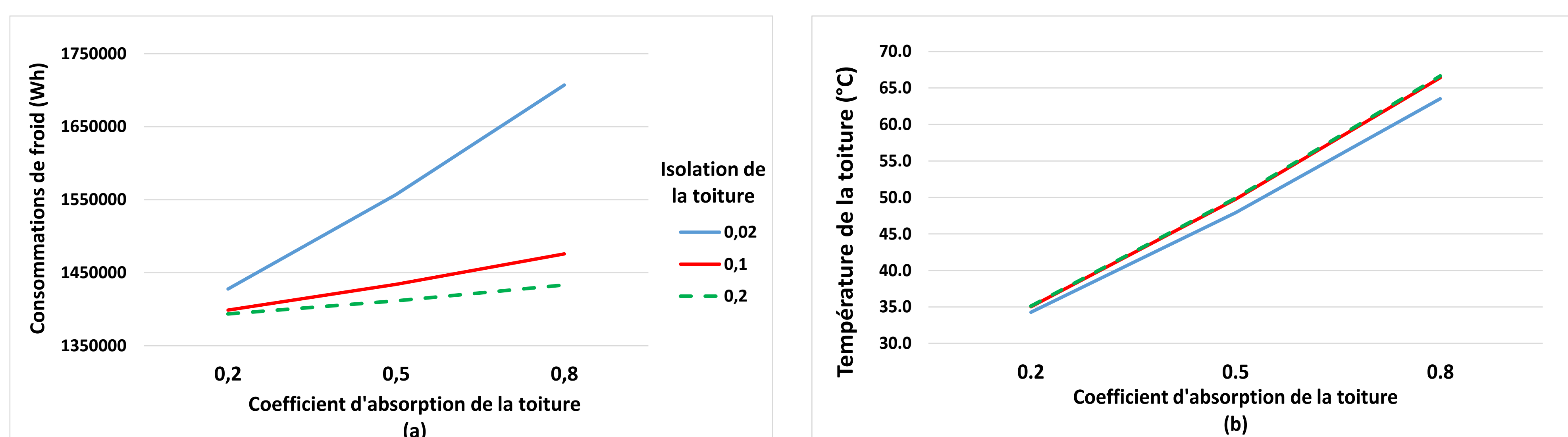


Figure 4 : Besoins en froid (a) et températures de toiture (b)
pour une toiture conventionnelle sans lame d'eau

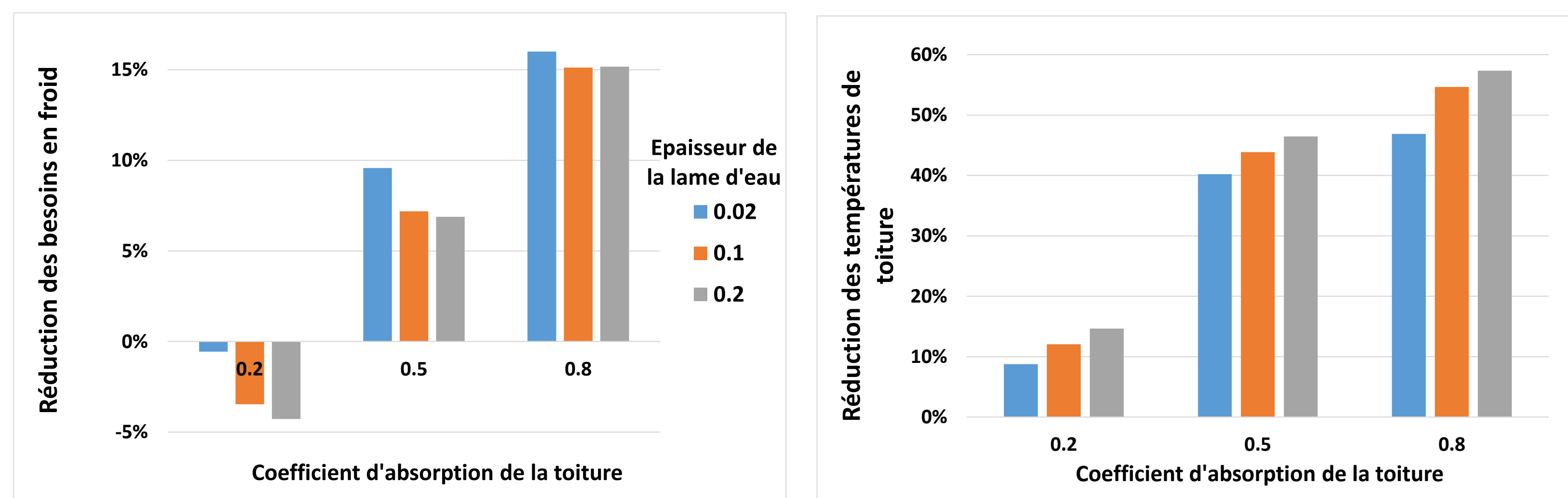


Figure 5 : Réduction des besoins en froid et températures de toiture selon l'épaisseur de la lame d'eau et la réflectivité solaire de la toiture

Pour la toiture avec lame d'eau, comme pour la toiture conventionnelle, l'isolation de la toiture a un impact négligeable sur la température de celle-ci, contrairement à l'absorptivité de la toiture. Toutefois, selon la Figure 5, augmenter l'épaisseur de la lame d'eau permet de réduire davantage la température de toiture mais rend le dispositif moins efficace dans la réduction des besoins en froid.

Le Tableau 1 montre qu'ajouter une lame d'eau, quelque-soit son épaisseur, réduit de moitié l'impact des autres paramètres physiques sur les besoins en froid du bâtiment.

Besoins en froid	Toiture conventionnelle	Toiture avec lame d'eau
Minimum [kWh]	142,2	137,2
Maximum [kWh]	185,8	157,7
Variation des besoins [%]	26,6	13,9

Tableau 1 : Variation de la consommation de froid selon l'épaisseur de la lame d'eau et la réflectivité de la toiture (épaisseur d'isolant de 2 cm)

3.2. EFFET DE LA METEOROLOGIE SUR LES PERFORMANCES DE RAFRAICHISSEMENT DE LA TOITURE

Les résultats du paragraphe précédent ont montré qu'une faible épaisseur d'isolant améliore l'efficacité de la toiture évaporative. Nous fixerons donc celle-ci à 2 cm. Voyons d'abord le comportement de la toiture évaporative aux variations d'ensoleillement :

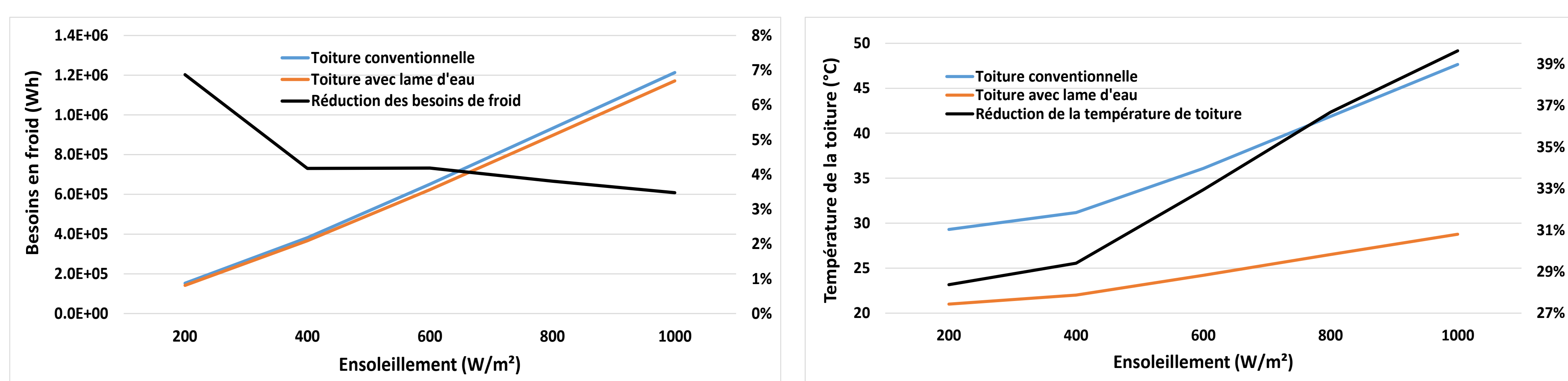


Figure 6 : Consommation de froid (a) et température (b) des toitures conventionnelle et avec lame d'eau selon l'ensoleillement (absorptivité solaire de 0,8 et épaisseur d'eau de 2 cm)

D'après la Figure 6, la performance de la toiture évaporative augmente avec l'ensoleillement pour la température de toiture, mais pas pour les besoins en froid. La lame d'eau permet de contenir la surchauffe d'une toiture.

La Figure 7 nous montre que le vent a un impact non négligeable sur l'efficacité du dispositif. Ce dernier est plus efficace pour des vents faibles et un coefficient d'absorption de la toiture élevé. Pour une toiture très réfléchive par contre, le bassin de toit se révèle plus efficace pour les hautes vitesses de vent.

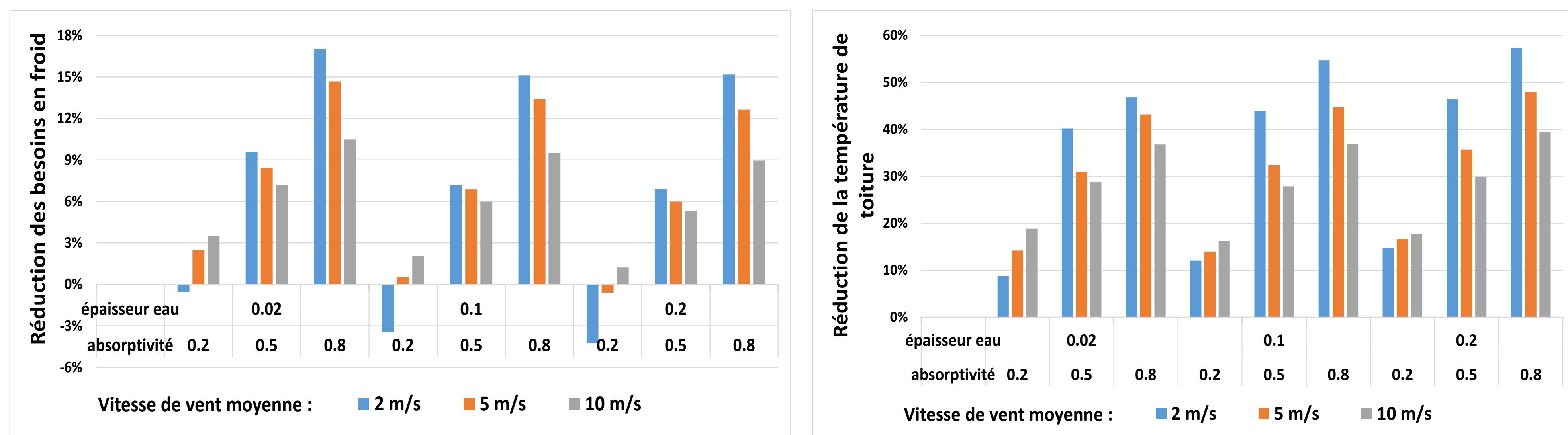


Figure 7 : Réductions des besoins en froid et températures de toiture selon la vitesse du vent

4. CONCLUSIONS

Ce travail a consisté à évaluer l'impact de l'ajout d'une lame d'eau sur une toiture conventionnelle sur la réduction de la surchauffe du bâtiment en été. L'étude paramétrique réalisée sur le modèle numérique simplifié unidimensionnel de simulation du comportement thermique du bâtiment a permis de déceler les atouts et faiblesses de la toiture évaporative. D'abord, la lame d'eau permet de réduire les consommations de froid et la température de toiture jusqu'à 14 % et 55 % respectivement. Ensuite, elle permet de réduire de moitié les effets de l'isolation et de la réflectivité de la toiture sur les consommations de froid et la température de toiture. On a même pu constater que l'efficacité de la toiture évaporative augmente avec l'ensoleillement et des vitesses de vent modérées. Toutefois, la conception optimale du dispositif doit intégrer le bâtiment et ses sollicitations ; en effet les simulations ont montré de possibles effets négatifs pour une toiture fortement isolée et réfléchive.

En perspective, la fiabilité du modèle de toiture et les simplifications du modèle de bâtiment devront être analysées. De plus, les simulations ont mis en avant la très grande sensibilité des coefficients d'échange intérieurs et extérieurs sur l'efficacité du dispositif, et donc de la fiabilité des corrélations utilisées pour les échanges convectifs. Il est ainsi prévu de réaliser une série d'expérimentations afin de confirmer les résultats numériques.

5. BIBLIOGRAPHIE

- Eyglunet B., 1997. *Manuel de thermique, théorie et pratique*. Hermes Science Publications.
- Kishore V. V. N., Veena Joshi., 1984. « A practical collector efficiency equation for nonconvecting solar ponds ». *Solar Energy* 33 (5):391-395. doi.org/10.1016/0038-092X(84)90190-7.
- Runsheng T., Etzion Y., Erell E., 2003. « Experimental studies on a novel roof pond configuration for the cooling of buildings ». *Renewable Energy* 28 (10):1513-1522. doi.org/10.1016/S0960-1481(03)00002-8.
- Sharifi A., Yamagata Y., 2015. « Roof ponds as passive heating and cooling systems: a systematic review ». *Applied Energy* 160:336-357.
- Taine J., Petit J.P., 1998. *Transferts thermiques - Mécanique des fluides anisothermes : Cours et données de base*. Dunod, 2^{ème} édition.
- Vorster J., Dobson R., 2011. « Sustainable cooling alternatives for buildings ». *Journal of Energy in Southern Africa* 22 (4):48-66.
- Wu H., Tang R., Li Z., Zhong H., 2009. « A mathematical procedure to estimate solar absorptance of shallow water ponds ». *Energy Conversion and Management* 50 (7):1828-33. doi.org/10.1016/j.enconman.2009.03.005.
- Yadav R., Rao. D.P., 1983. « Digital simulation of indoor temperatures of buildings with roof ponds ». *Solar Energy* 31(2): 205-215. doi.org/10.1016/0038-092X(83)90083-X.

Etude paramétrique des performances thermiques d'une maison individuelle équipée d'une fenêtre pariétodynamique intégrant un vitrage chauffant

M. Kaboré*¹, G. Michaux¹, P. Salagnac¹, J. Le Dréau¹, R. Greffet²

¹LaSIE (UMR CNRS 7356), Université de La Rochelle, Av. M. Crépeau, 17042 La Rochelle, France

²Groupe Ridoret, ZI Chef de Baie, 70 rue de Québec, 17000 La Rochelle

* madi.kabore@univ-lr.fr

RESUME. Les fenêtres pariétodynamiques intégrant un vitrage chauffant peuvent permettre de récupérer à la fois les déperditions thermiques à travers la fenêtre, l'énergie provenant du rayonnement solaire absorbé par le vitrage ainsi que les pertes générées par le vitrage chauffant en faisant circuler de l'air provenant de l'extérieur entre les vitrages de la fenêtre avant son introduction dans le bâtiment. A partir d'un modèle thermo-aéraulique couplé au modèle thermique d'une maison individuelle, des études paramétriques sont réalisées afin d'évaluer les performances en termes d'énergie finale pour le chauffage. Les résultats montrent que ce système peut être un alternatif au chauffage électrique direct. Il est plus adapté aux bâtiments disposant une enveloppe performante.

MOTS-CLÉS : Fenêtre Pariétodynamique, vitrage chauffant, chauffage

ABSTRACT. The airflow windows with heated glazing offer the possibility to recover at the same time the thermal losses through the window, to improve the solar gain as well as the losses generated by the heated glass by circulating air coming from the outside between the windows before its introduction into the building. With a thermo-aeraulic model coupled to a single-family house thermal model, parametric studies are carried out to evaluate the performance in terms of heating energy consumption. The results show that the system can be an alternative to electric heating and is suitable for buildings with a high-performance envelope.

KEYWORDS: Airflow window, heated glazing, heating system

1. INTRODUCTION

Dans le secteur du bâtiment, les parois vitrées et le renouvellement d'air représentent aujourd'hui deux points faibles majeurs en termes de performances énergétiques des bâtiments, et cela est particulièrement vrai pour les bâtiments passifs (pertes de l'ordre de 60 % par les parois vitrées et de 20 % par la ventilation) (Feist et Schnieders 2009). La réduction de la consommation des bâtiments passe par une amélioration des performances des éléments d'enveloppe. L'élément d'enveloppe considéré ici est une fenêtre pariétodynamique chauffante qui permet de répondre simultanément à plusieurs besoins, à savoir la ventilation, l'éclairage naturel et le chauffage. L'avantage est de récupérer une partie des pertes thermiques par la circulation d'air neuf, provenant de l'extérieur, à travers les vitrages avant son introduction dans le bâtiment. Ainsi, l'air se réchauffe en récupérant à la fois les déperditions thermiques à travers la fenêtre, l'énergie provenant du rayonnement solaire absorbé par le vitrage et les pertes générées par le vitrage chauffant. La technologie des vitrages chauffants est basée

sur les propriétés conductrices d'une couche d'oxyde métallique transparent (TCO, Transparent Conductive Oxyde) composée de microparticules métalliques déposées à la surface du verre (Granqvist et Hultåker 2002; Gerhardinger 2003). Lorsque le revêtement est relié à une alimentation électrique par un connecteur, il est traversé par un courant électrique. Le revêtement métallique opère alors comme une résistance électrique chauffante à basse température par effet Joule. En revanche, par rapport aux radiateurs ou convecteurs électriques, le vitrage chauffant présente l'inconvénient d'être en contact direct avec l'extérieur. Une partie de la chaleur émise par ce dernier est alors directement perdue à l'extérieur.

Kurnitski et al. (Kurnitski et al. 2004) ont défini et étudié numériquement l'efficacité du vitrage chauffant et ont obtenu des valeurs d'efficacité comprises entre 0,76 à 0,81 pour une température extérieure allant de -20°C à 10°C . Cette efficacité, notée E_w , prend en compte les déperditions évitées par l'utilisation de la fenêtre chauffante. Les auteurs ont démontré que, à température intérieure donnée, l'efficacité d'un tel dispositif dépend de la température extérieure et de la résistance thermique du vitrage. L'efficacité d'un vitrage chauffant classique ($U_g = 1,1 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$) est de 0,78 à -10°C et atteint, pour cette même température, 0,89 pour un vitrage extrêmement performant ($U_g = 0,6 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$), i.e. pour un triple vitrage avec deux couches à faible émissivité. Kurnitski et al. (Kurnitski et al. 2004) ont finalement démontré que l'efficacité est proportionnelle au coefficient de transmission thermique du vitrage U_g . Par ailleurs, l'un des avantages du vitrage chauffant est de créer un environnement plus homogène thermiquement. En effet, les systèmes de chauffage classiques sont confrontés aux problèmes de non-uniformité des conditions thermiques (stratification, diffusion de la chaleur, courant d'air). Par exemple, le rendement d'émission d'un système de chauffage par air est estimée à 81-93 %, et celui d'un radiateur à 83-95 % (DIN V 18599-2 2007). Un système de vitrage chauffant permet de palier à ce dernier problème, car il agit directement sur le point faible de l'enveloppe. A noter que, par mesure de sécurité, la température superficielle de la vitre intérieure est limitée à 45°C ce qui limite la puissance de chauffage.

De nombreux brevets ont été déposés sur le vitrage chauffant (principe, composition du revêtement, connexions, etc.), mais seulement quelques-uns concernent l'association d'un vitrage chauffant à une fenêtre pariétodynamique, et la littérature à ce sujet se limite à ces brevets. Un brevet a été publié en 1990 par Saint-Gobain Vitrage International (Fremaux et Brechot 1990), et vise la rénovation de fenêtres existantes en y ajoutant un survitrage chauffant. Concernant plus spécifiquement le vitrage, les couches d'oxydes métalliques utilisées pour rendre les verres peu émissifs ou chauffants ont un impact négatif sur les propriétés optiques des verres (facteur solaire et transmission lumineuse). Ainsi, un autre brevet de Saint-Gobain concerne un verre feuilleté chauffant offrant un meilleur taux de transmission lumineuse (Chaussade et Rigal 1997).

Au niveau de la littérature scientifique, il n'existe, à notre connaissance, aucun résultat sur les performances thermiques d'une fenêtre pariétodynamique chauffante. Dans la présente étude, à l'aide d'un modèle bidimensionnel de type nodale d'une fenêtre pariétodynamique intégrant un vitrage chauffant couplé au modèle thermique d'une maison individuelle type, des études paramétriques sur les consommations d'énergies finales pour le chauffage sont menées. Les études paramétriques permettent d'évaluer les performances d'une fenêtre pariétodynamique intégrant un vitrage chauffant pour différents climats, orientations du bâtiment et qualités d'enveloppe du bâtiment (perméabilité à l'air).

2. METHODES

2.1. MODELE NUMERIQUE

Le modèle est une adaptation du modèle bidimensionnel d'une fenêtre pariétodynamique (Rémy Greffet 2016 ; R Greffet, Michaux, et Salagnac 2015 ; R Greffet et al. 2013) et est présenté par la Figure 1. Une approche nodale a été utilisée pour modéliser les transferts de chaleur et de masse au sein de la fenêtre. De l'air, provenant de l'extérieur, entre dans la fenêtre à travers une ouverture située dans la partie supérieure de celle-ci, sur sa face externe (Figure 1A). L'air s'écoule vers le bas entre les deux premières vitres, puis entre la deuxième et la troisième vitre avant de pénétrer dans la pièce à travers une ouverture située dans la partie supérieure de la fenêtre (face intérieure). Les différents transferts modélisés au sein de la fenêtre sont de nature conductive dans le verre et le cadre, et de nature radiative, fluide et convective au sein des lames d'air et aux interfaces avec les environnements intérieur et extérieur (Figure 1B).

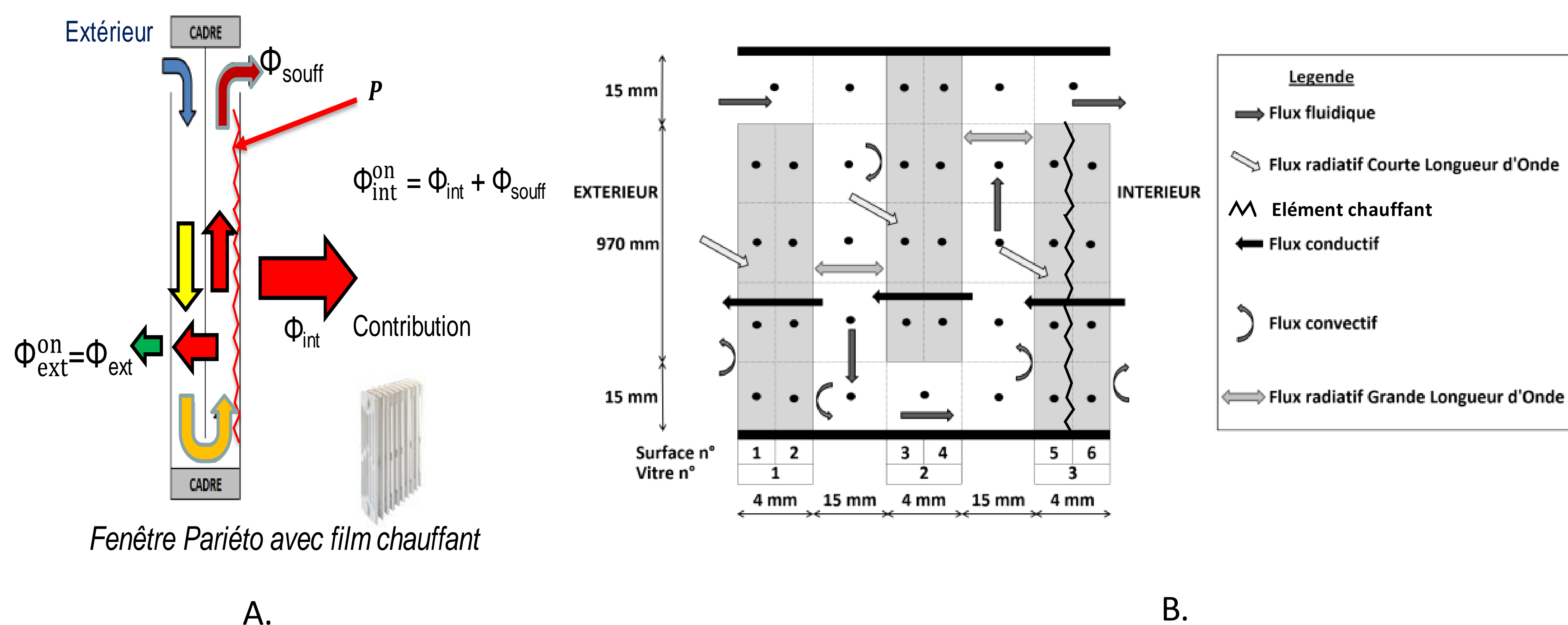


Figure 1 A : Principe de la fenêtre étudiée ; B : Transferts thermo-aérauliques modélisés au sein de la fenêtre.

Les échanges radiatifs considérés sont d'une part les apports solaires de courtes longueurs d'onde (CLO), partiellement absorbés par les volumes de verre (milieu semi-transparent) et, d'autre part, les échanges radiatifs de grandes longueurs d'onde (GLO) entre les surfaces de vitres ainsi qu'avec les environnements intérieur et extérieur. Le modèle tient également compte des échanges thermiques avec le cadre. Sont donc modélisés les échanges thermiques avec les traverses haute et basse, et les jambes présentes de part et d'autre du vitrage. Pour modéliser l'effet du film chauffant, nous imposons une densité de puissance sur les surfaces de la vitre intérieure. La fenêtre est divisée en 56 volumes isothermes. Pour chacun de ces volumes, un bilan thermique a été écrit et permet d'aboutir à un système d'équations différentielles ordinaires (Rémy Greffet 2016). Le transfert par convection forcée étant le phénomène dominant, les coefficients d'échanges convectifs ont été évalués en fonction du débit, pour des valeurs allant de 1 à 45 m³.h⁻¹, à l'aide de Comsol Multiphysics® (R Greffet, Michaux, et Salagnac 2015).

2.2. MODELISATION DU BATIMENT

Le bâtiment considéré est une maison dont l'enveloppe est en béton plein (isolation thermique par l'intérieur), avec couverture en tuiles, présente sur la plateforme expérimentale INCAS de l'INES (Bourget-Du-Lac) (Michaux et al. 2017). La maison, dont les plans sont présentés par la Figure 2, a été modélisée à l'aide du code de Simulation Thermique Dynamique TRNSYS©. L'enveloppe du bâtiment

est fortement isolée thermiquement, les résistances thermiques des murs, du toit et du plancher étant respectivement de 4,1, 6,5 et 1,7 $\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$, et bénéficie d'une étanchéité à l'air élevée ($Q_{4Pa_surf} = 0,4 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$). La maison est considérée occupée toute l'année et le chauffage fonctionne du 1^{er} octobre au 20 mai. Les consignes de chauffage sont de 20°C en période d'occupation, 18°C en période d'inoccupation et un ralenti nocturne est fixé à 16°C.

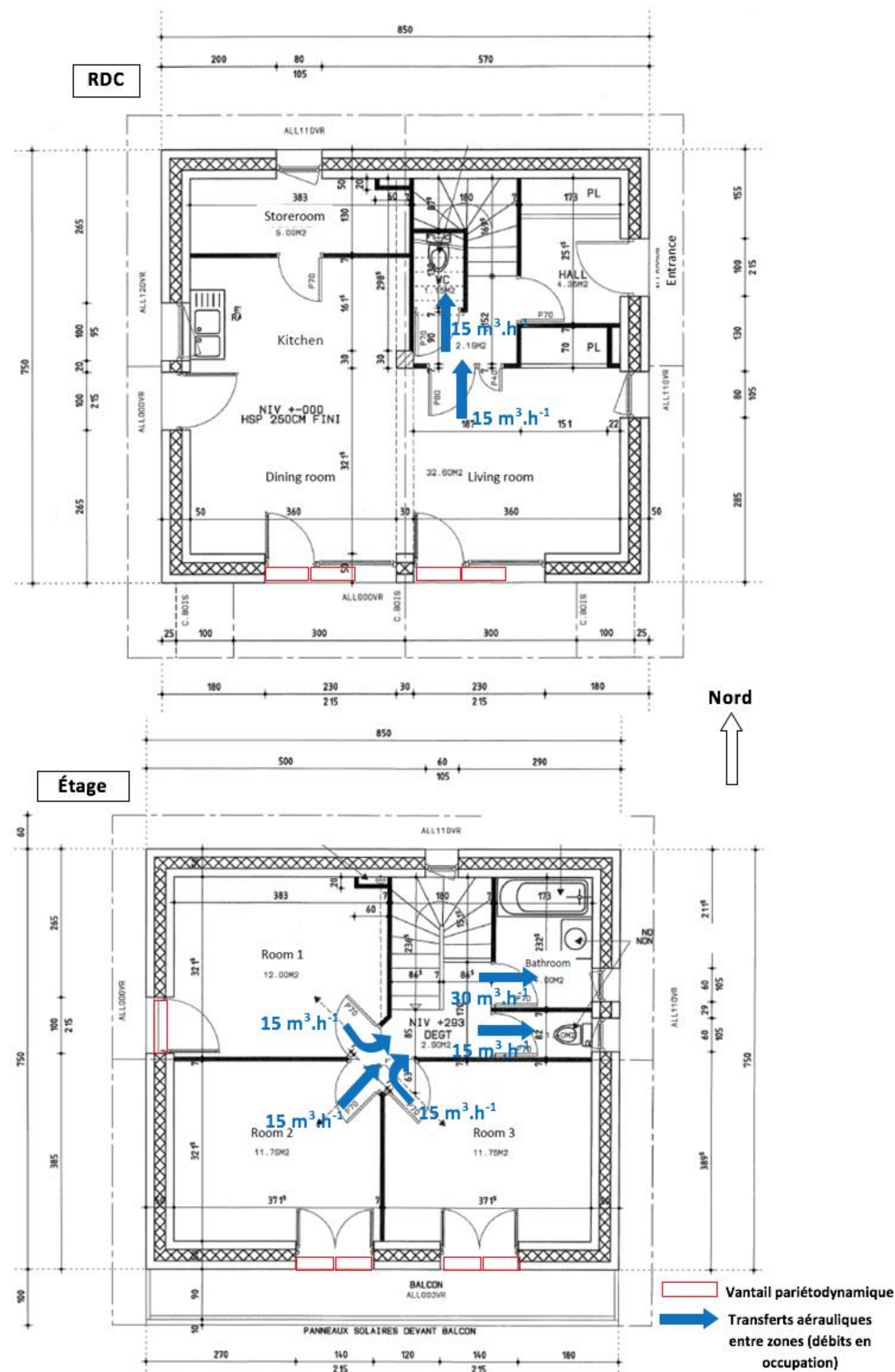


Figure 2 Plans du bâtiment, transferts aérodynamiques et localisation des vantaux pariétodynamiques chauffants

Les menuiseries des pièces principales munies d'entrées d'air (porte-fenêtre) sont remplacées par des vantaux pariétodynamiques chauffants (4/15/4/15/4). Ceux-ci sont utilisés comme chauffage principal (pas d'appoint dans ces pièces). Les puissances de chauffage moyennes les plus couramment constatées pour des vitrages chauffants se situent entre 200 et 300 W/m^2 . En pratique, pour des raisons de sécurité et de durabilité de la menuiserie (dilatation thermique), la puissance émise par le vitrage est limitée par la température de sa face intérieure qui ne doit pas dépasser 45°C. Dans la suite de l'étude nous adopterons une puissance de chauffe de 300 W/m^2 pour les pièces de vie avec une régulation proportionnelle intégrale (Ziegler et Nichols 1993). Les pièces dépourvues de vitrages chauffants sont équipées de radiateurs électriques (convecteurs électriques muraux).

Sur la Figure 2, sont aussi représentés les transferts aérauliques entre zones. Les valeurs de débits indiquées correspondent au cas d'une Ventilation Mécanique Contrôlée (VMC) de type auto-réglable (plus adaptée qu'une ventilation hygro-réglable) pour laquelle les débits d'air neuf sont définis selon l'arrêté de 1982 (*Arrêté du 24 mars 1982 relatif à l'aération des logements*). Dans ce cas, le débit total d'air extrait est de $90 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ tout le temps sauf de 13 h à 14 h où le débit est de $180 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$. Le débit d'air passant par les fenêtres pariétodynamique est déduit du débit de ventilation et des infiltrations de l'enveloppe (*Arrêté du 5 février 2015 relatif à l'agrément des modalités de prise en compte des fenêtres pariétodynamiques dans la réglementation thermique 2012*). Le couplage thermo-aéraulique (Michaux et al. 2017) a été réalisé par l'intermédiaire d'un module de TRNSYS© faisant le lien avec le logiciel Matlab©. En pratique, les fenêtres pariétodynamiques chauffantes ont été intégrées au modèle du bâtiment en les assimilant à des parois à température imposée, intégrées aux murs extérieurs. Cette température imposée est calculée par Matlab à chaque pas de temps en prenant en compte le préchauffage de l'air entrant (la température et l'humidité relative de l'air neuf des zones concernées). Enfin, nous répartissons le flux solaire CLO directement transmis de façon à ce qu'il soit absorbé à parts égales entre le sol et les murs faisant face aux fenêtres dans les zones concernées.

3. RESULTATS ET DISCUSSION

3.1. ANALYSES DES TEMPERATURES ET DU MODE DE TRANSFERT

La Figure 3A montre, pour une journée en janvier et pour le climat de La Rochelle, les températures d'air soufflé ($T_{\text{air,souf}}$) et de surface interne ($T_{\text{fen,FPC}}$) de la fenêtre pariétodynamique chauffante pour une journée d'hiver. La température de surface d'une fenêtre pariétodynamique classique ($T_{\text{fen,FP}}$) y est aussi présentée. Lorsque le vitrage chauffant est actif (si $P_{\text{film}} > 0$), on peut observer les niveaux de température de surface permettant d'assurer le chauffage du bâtiment. La température d'air soufflé ($T_{\text{air,soufFPC}}$) est proche de la température de surface ($T_{\text{fen,FPC}}$) grâce à l'effet pariétodynamique qui agit comme un échangeur de chaleur (Rémy Greffet 2016). Les différences de températures en comparant $T_{\text{fen,FPC}}$ et $T_{\text{fen,FP}}$ mettent en évidence la disparition du phénomène de paroi froide en dehors des périodes de ralenti nocturne. La température opérative (T_{op}) dans la pièce suit les consignes de températures évoquées plus haut, et varie entre 18°C et 20°C pour le jour étudié ici. La comparaison entre T_{op} et $T_{\text{air,soufFPC}}$ montre que l'air neuf introduit dans la pièce est à une température plus élevée que la température opérative de l'ambiance.

La Figure 3B, présente les flux de chaleur fournis par la fenêtre à l'ambiance intérieure de la chambre 1 par convection (ϕ_{conv}), rayonnement (ϕ_{rad}) et apport d'air neuf chauffé (ϕ_{air}). Il apparaît que le mode de transfert dominant est le rayonnement thermique de grandes longueurs d'ondes, suivi par la convection thermique et, enfin, l'apport d'air neuf chauffé (ventilation). En considérant les parts radiatives et convectives décrites dans (ThBCE 2012), il apparaît que la fenêtre pariétodynamique intégrant un vitrage chauffant a une répartition convection/rayonnement de type plancher chauffant.

La puissance dissipée par le vitrage chauffant (P_{film}) est aussi représentée sur la Figure 3B permettant de faire le bilan à chaque pas de temps. Le flux perdu vers l'extérieur par la fenêtre varie en fonction des conditions extérieures et de la puissance délivrée par le film. L'efficacité du film chauffant E_{film} (équation (1)) varie entre 0,6 pour une valeur de P_{film} élevée à 1 si P_{film} très faible pour la journée en janvier. L'efficacité E_{film} représente la part de l'énergie utile qui est transférée à l'ambiance interne. Le

vitrage chauffant étant en contact direct avec l'extérieur, une partie de la chaleur émise par le verre est directement perdue à l'extérieur

$$E_{film} = \frac{\Phi_{conv} + \Phi_{rad} + \Phi_{air}}{P_{film}} \quad si \quad P_{film} > 0 \quad (1)$$

Vers 7 h, on peut observer les pertes maximales (40 % pour $P_{film} = 463$ W) pour cette journée. En effet lorsque que P_{film} est élevée, la température de la face externe de la fenêtre est aussi élevée entraînant des pertes, d'une part par convection avec l'air extérieur et, d'autre part par rayonnement de grandes longueurs d'ondes.

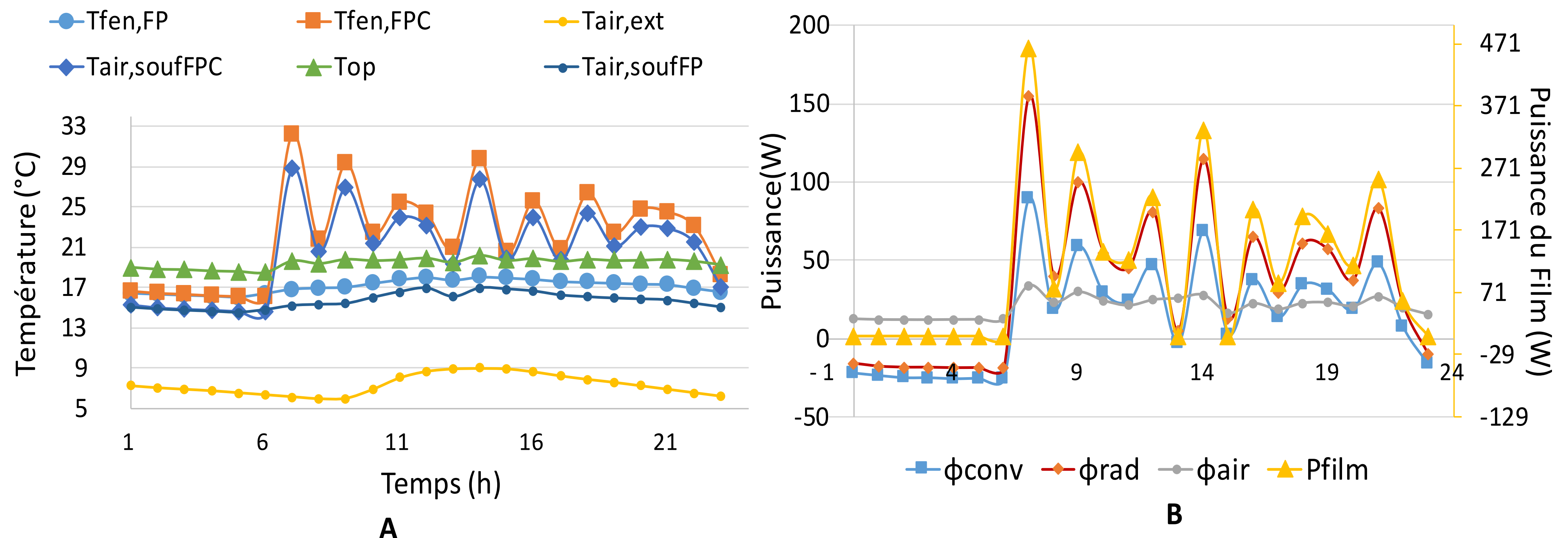


Figure 3 A. Températures d'air soufflé et de surface interne de la fenêtre chauffante ; B. Echanges de chaleur entre la fenêtre chauffante et l'ambiance intérieure de la chambre 1 (climat de La Rochelle, pour une journée en janvier)

3.2. IMPACTS DE L'ETANCHEITE A L'AIR ET DE L'EXPOSITION DES FENETRES PARIETODYNAMIQUES CHAUFFANTES

La Figure 4A montre les consommations d'énergies annuelles pour le chauffage en fonction du coefficient de perméabilité à l'air de l'enveloppe du bâtiment. Nous considérons trois valeurs du coefficient de perméabilité à l'air $Q_{4Pa_surf} = 2,5 ; 1,5$ et $0,4 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$.

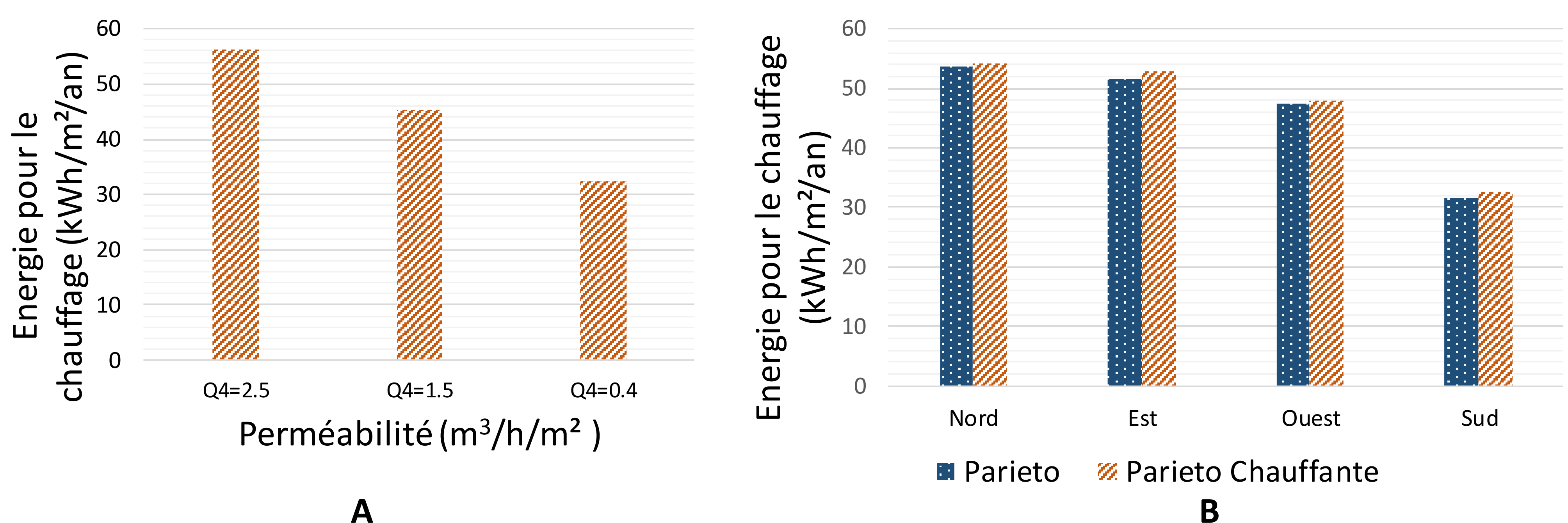


Figure 4 Effets (A) de la perméabilité à l'air de l'enveloppe (climat de La Rochelle) et (B) de l'orientation du bâtiment sur les consommations d'énergies annuelles pour le chauffage par des fenêtres intégrant des films.

L'augmentations des infiltrations d'air parasites engendre évidemment une augmentation significative des consommations de chauffage et sont particulièrement problématiques dans le cas d'un chauffage par fenêtres pariétodynamiques puisque ces infiltrations réduisent d'autant les volumes d'air préchauffé

passant à travers les vantaux. La fenêtre pariétodynamique chauffante nécessite donc une bonne qualité de l'enveloppe du bâtiment et est donc plus adaptée aux bâtiments neufs qu'aux bâtiments existants. Dans la suite de l'étude la perméabilité à l'air est fixée à $0,4 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$.

La Figure 4B montre que, pour un climat donné (La Rochelle), l'orientation des vantaux pariétodynamiques chauffants a un effet significatif sur les consommations d'énergies pour le chauffage. La comparaison à des fenêtres pariétodynamiques classiques (non chauffantes) et un chauffage par convecteurs électriques muraux est aussi visible sur la Figure 4B. Cette comparaison montre, par rapport à des fenêtres pariétodynamiques classiques, une augmentation relative des consommations d'énergies finales pour le chauffage de 1 % au Nord et à l'Ouest, 2,2 % à l'Est et 3,3 % au Sud (Figure 4B) par rapport au cas classiques avec convecteurs électriques muraux. En valeurs nettes, les hausses sont plus faibles pour l'orientation Sud. Cette différence s'explique par le fait qu'au Sud il y a plus d'apports solaires en comparaison avec les autres expositions. Ainsi, pour les autres orientations, le besoin en chauffage est plus élevé d'où des consommations électriques élevées. A noter que cette hausse sensible des consommations se fait au profit d'une ambiance plus homogène thermiquement et d'un gain de surface habitable.

3.3. IMPACTS DU CLIMAT

La Figure 5 montre les consommations électriques pour le chauffage du bâtiment dont la majorité des vitrages pariétodynamiques sont orientés au Sud (Figure 2) avec une densité de puissance de chauffe de 300 W/m^2 et une perméabilité à l'air de $0,4 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$. Les climats de Marseille, La Rochelle, Strasbourg et Paris sont considérés. Pour les climats continentaux avec des hivers plus rigoureux, les consommations électriques sont plus élevées que pour les climats de Marseille et de La Rochelle. Les hausses relatives d'énergies pour le chauffage sont de 2 % pour Paris et Strasbourg, et respectivement de 3 % et 6 % pour La Rochelle et Marseille. Mais en valeurs nettes, les hausses sont plus élevées pour les climats ayant des hivers rigoureux comme à Paris et à Strasbourg car les besoins en chauffage sont plus élevés.

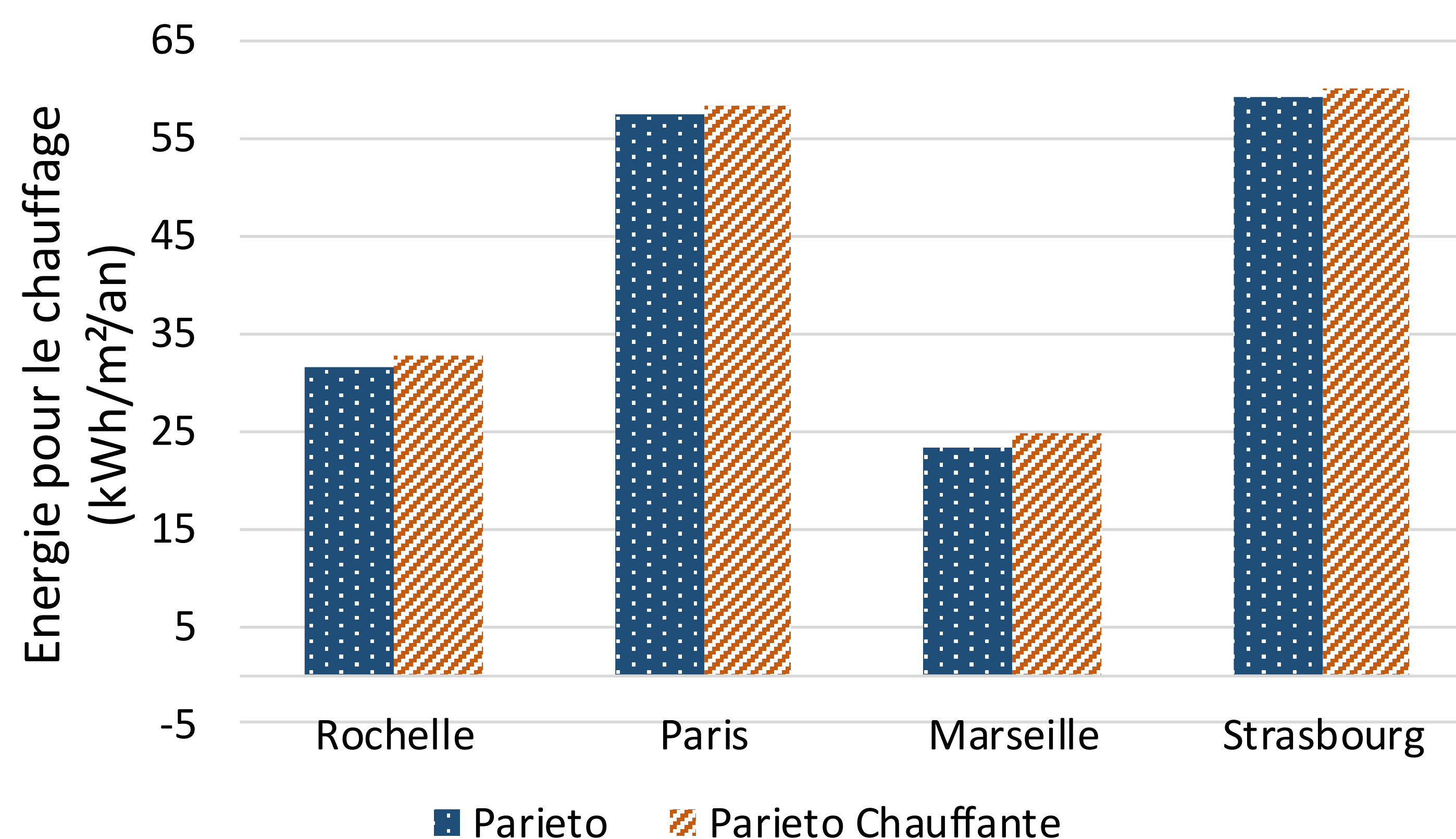


Figure 5 Consommations électriques pour le chauffage en fonction du climat.

4. CONCLUSIONS

Dans le but d'étudier les performances de la fenêtre pariétodynamique intégrant un vitrage chauffant, des simulations numériques ont été réalisées en couplant un modèle de fenêtre à l'outil de simulation

thermique dynamique TRNSYS©. Des études paramétriques ont été réalisées pour différentes expositions, différents climats et qualités d'enveloppe pour une maison individuelle type, équipée de ces menuiseries.

La fenêtre pariétodynamique chauffante se comporte hors des périodes de ralenti à la fois comme un chauffage par air pulsé (débit d'air neuf chaud) et comme un plancher chauffant en termes de parts d'énergie convectée et rayonnée. Une faible augmentation des consommations d'énergies finales pour le chauffage est observée en fonction de l'orientation du bâtiment et du climat. La fenêtre pariétodynamique chauffante peut être une alternative au chauffage électrique direct, apportant une ambiance thermique plus homogène et permettant un gain de surface habitable. Cependant, pour être efficace, elle nécessite une qualité d'enveloppe du bâtiment élevée. Suite à ces travaux, des études sur le confort thermique en vue d'une comparaison avec les systèmes de chauffage classiques sont en cours.

Remerciements

Cette étude a été réalisée dans le cadre du projet ADEME VARIETO « Vitrages chAuffants paRIETOdynamiques ». Nous souhaitons remercier l'ADEME pour le financement de ce projet.

Références

- Arrêté du 5 février 2015 relatif à l'agrément des modalités de prise en compte des fenêtres pariétodynamiques dans la réglementation thermique 2012. s. d. Consulté le 24 avril 2018.
- Arrêté du 24 mars 1982 relatif à l'aération des logements. s. d. Consulté le 14 mars 2018.
- Chaussade, Pierre, et Françoise Rigal. 1997. Transparent substrate fitted with a stack of silver layers, with application to heated laminated windows. United States Patent 5677065, issued 14 octobre 1997.
- DIN V 18599-2. 2007. « DIN V 18599-11 - Energy efficiency of buildings - Calculation of the energy needs, delivered energy and primary energy for heating, cooling, ventilation, domestic hot water and lighting - Part 2: Energy needs for heating and cooling of building zones. »
- Feist, W., et J. Schnieders. 2009. « Energy Efficiency – a Key to Sustainable Housing ». *The European Physical Journal Special Topics* 176 (1): 141-53. <https://doi.org/10.1140/epjst/e2009-01154-y>.
- Fremaux, Jacques, et Roland Brechot. 1990. Fenêtre chauffante. Office européen des brevets 0389372, issued 26 septembre 1990.
- Gerhardinger, Peter. 2003. « Next-generation heated glass products ». *Appliance Magazine*, octobre.
- Granqvist, C. G., et A. Hultåker. 2002. « Transparent and conducting ITO films: new developments and applications ». *Thin Solid Films, Proceedings of the 2nd International Symposium on Transparent Oxide Thin Films for Electronics and Optics*, 411 (1): 1-5. [https://doi.org/10.1016/S0040-6090\(02\)00163-3](https://doi.org/10.1016/S0040-6090(02)00163-3).
- Greffet, R, G Michaux, et P Salagnac. 2015. « Validation d'un modèle numérique de fenêtre pariétodynamique en conditions in situ ». In *Société Française de Thermique*, 23, N°2:883-90. La Rochelle, France.
- Greffet, R, Salagnac Patrick, G Michaux, et J.-B Ridoret. 2013. « Airflow window: Numerical study and sensibility analysis of thermal performances ». In *BS2013 - 13th International Conference of the International Building Performance Simulation Association*, 413-20. Chambéry, France.
- Greffet, Rémy. 2016. « Études expérimentale et numérique des performances énergétiques d'une fenêtre pariétodynamique ». Thèse de doctorat en Energétique et thermique, Sous la direction de Patrick Salagnac, Université La Rochelle. <http://www.theses.fr/2016LAROS020>.
- Kurnitski, Jarek, Juha Jokisalo, Jari Palonen, Kai Jokiranta, et Olli Seppänen. 2004. « Efficiency of electrically heated windows ». *Energy and Buildings, REHVA Scientific*, 36 (10): 1003-10. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2004.06.007>.
- Michaux, G, R Greffet, P Salagnac, et J.-B Ridoret. 2017. « Etude numérique des performances thermiques d'une maison individuelle équipée de fenêtres pariétodynamiques ». In *Société Française de Thermique*, 25, N°2:1049-56. Marseille, France.
- ThBCE. 2012. « 10.1.3.2.3 Parts convectives de transmission de l'énergie au groupe ». RT2012. France. <http://www.lamaisonpassive.fr/forum/Th-BCE-Chauffage-Rt2012-page499.PDF>.
- Ziegler, J. G., et N. B. Nichols. 1993. « Optimum Settings for Automatic Controllers ». *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control* 115 (2B): 220-22. <https://doi.org/10.1115/1.2899060>.

Comparaison du comportement hygrothermique de trois systèmes d'isolation thermique par l'extérieur

Mathieu Bendouma¹, Thibaut Colinart^{1*}, Patrick Glouannec¹

¹ Univ. Bretagne-Sud, FRE CNRS 3744, IRDL
rue de saint maudé, F-56100 Lorient
[*thibaut.colinart@univ-ubs.fr](mailto:thibaut.colinart@univ-ubs.fr)

RESUME. Cette communication concerne l'étude de la réponse hygrothermique de trois solutions d'isolation thermique par l'extérieur (ITE) : un système ETICS (PSE sous enduit mis en œuvre par voie humide) et deux systèmes sous bardage (mis en œuvre par voie sèche), dont un incluant des matériaux biosourcés (laine de bois et ouate de cellulose). Ces systèmes ont été montés sur une paroi en parpaing et testé dans une enceinte biclimatique. L'instrumentation mise en œuvre (thermocouples, thermohygromètres et fluxmètres) a permis d'appréhender le comportement hygrothermique des parois rénovées à différents stades : lors de la pose des solutions d'ITE, en usage « normal » et dans des conditions conduisant à des risques de condensation. Les données mesurées sont confrontées aux résultats de simulations numériques issus d'une modélisation 1D des transferts couplés de chaleur et d'humidité.

MOTS-CLÉS : Isolation thermique par l'extérieur, Enceinte biclimatique, Transfert hygrothermique.

ABSTRACT. This work deals with the hygrothermal behavior of three external thermal insulation systems: one ETICS including EPS insulation and rendering, and two ventilated façades including either glass wool insulation or bio-based materials and an exterior air barrier. These systems were applied on a hollow concrete block wall and tested in a biclimatic chamber. Temperature, relative humidity and heat flux are monitored at different location and allow investigating the hygrothermal behavior of retrofitted walls at different stage: after the retrofit, in normal use and under conditions leading to risks of condensation. The experimental data are compared to numerical results obtained from a coupled heat and mass transfer model.

KEYWORDS : external thermal insulation systems, biclimatic chamber, heat and mass transfer model.

1. INTRODUCTION

L'isolation thermique de l'enveloppe des bâtiments est une solution intéressante pour améliorer l'efficacité énergétique de ce secteur. L'Isolation Thermique par l'Intérieur (ITI) est une solution très développée du fait de son faible coût. Cependant, des risques de condensation peuvent être rencontrés tant dans la partie courante des parois opaques qu'au niveau des liaisons (Kolaitis et al. 2013). Le cas des ponts thermiques est traité plus efficacement dans le cas d'une Isolation Thermique par l'Extérieur (ITE). Actuellement, il existe deux grandes techniques : l'ITE sous enduit (ou ETICS pour *External Thermal Insulation Composite System*) et l'ITE sous bardage. Quelle que soit la technique, l'application d'une d'ITE sur une paroi opaque modifie les transferts hygrothermiques et notamment le séchage. A titre d'exemple, le séchage en laboratoire d'une paroi humide isolée avec un système ETICS peut excéder 100 jours (Hens et Carmeliet 2002). De même, des simulations pluriannuelles ont souligné que l'ajout d'un système d'ITE sur une paroi en béton conduit à des durées de séchage allant de 1 à 5 ans

selon la teneur en eau initiale de la paroi et le design du système d'ITE (Pihelo et al. 2016). Künzeli (1998) suggère néanmoins que les durées de séchage peuvent être réduites en utilisant une ITE sous bardage. Toutefois, le comportement hygrothermique de la paroi rénovée dépend fortement des conditions régnant dans la lame d'air ventilée, soulignant la nécessité d'adopter une modélisation précise de cet élément (Van Belleghem et al. 2015).

Dès lors que l'accumulation d'humidité au sein des parois peut conduire à l'apparition de différentes pathologies (moisissure, dégradation des matériaux et de leur performance thermique, corrosion, etc.), une simulation précise des transferts couplés de chaleur et d'humidité au sein des systèmes d'ITE s'avère nécessaire. Actuellement, la majorité de simulations traitant de ce sujet ont été réalisées à l'aide de WUFI. Cependant, la comparaison entre les techniques d'ITE et la validation des modèles au regard de l'expérience restent rares dans la littérature.

Dans cette communication, on s'attache à présenter d'une part des études expérimentales visant à comparer le comportement hygrothermique de trois systèmes d'ITE et d'autre part un modèle des transferts couplés de chaleur et d'humidité. Une confrontation entre les trois systèmes d'ITE et entre simulation et expérience est proposée à différents stades allant de la phase de mise en œuvre jusqu'au comportement en usage.

2. SYSTEMES D'ITE ET APPROCHES EXPERIMENTALES

Trois systèmes d'ITE sont comparés dans cette étude. Le premier est un système ETICS, composé de panneaux de PSE collés entre eux et de deux couches d'enduit minéral (gamme Parexlanko) sur sa face extérieure. L'ensemble a été fixé sur la paroi initiale par collage et chevillage. Les deux autres systèmes sont des ITE sous bardage et se composent de l'extérieur vers l'intérieur d'une lame d'air ventilée, d'une membrane d'étanchéité à l'air, d'une première couche d'isolant, d'un panneau d'OSB et d'une seconde couche d'isolant. Les deux systèmes se différencient par la nature des isolants employés : le premier, noté « LdV », contient de la laine de verre, classiquement utilisée, le second, noté « Biosourcé », intègre des matériaux biosourcés (laine de bois et ouate de cellulose). Ces deux systèmes sont intégrés dans une ossature bois, elle-même fixée sur la paroi existante à l'aide d'équerre métallique.

Les complexes isolants (de surface 0,8 x 0,8 m) ont été conçus afin de pouvoir considérer des transferts 1D et de réaliser des séquences de mesures probantes sur des durées acceptables : l'épaisseur d'isolant mise en œuvre pour les 3 systèmes est fixée ainsi à 0,14 m. Comme le montre le Tableau 1, les résistances thermiques des systèmes ITE sont sensiblement équivalentes, alors que la paroi ETICS est plus résistante à la diffusion de vapeur que les deux autres parois.

Ces trois systèmes ont été rapportés sur une paroi en parpaing enduite (de 0,21 m d'épaisseur) située dans une enceinte biclimatique. Une instrumentation en thermocouples, fluxmètres et capteurs d'humidité a été mise en place au sein de la paroi parpaing et des matériaux isolants (Figure 1). Le comportement hygrothermique d'une paroi rénovée a ainsi pu être appréhendé lors de différentes phases : après la pose des systèmes d'ITE, lors d'une sollicitation dite « saine » et lors d'une sollicitation conduisant à de la condensation interstitielle au sein de la paroi.

	ETICS	LdV	Biosourcé
Rth [K m ² W ⁻¹]	3,9	4,1	3,5
Sd [m]	6	1	1,2

Tableau 1 : Résistance thermique et à la diffusion de vapeur des trois systèmes d'ITE.

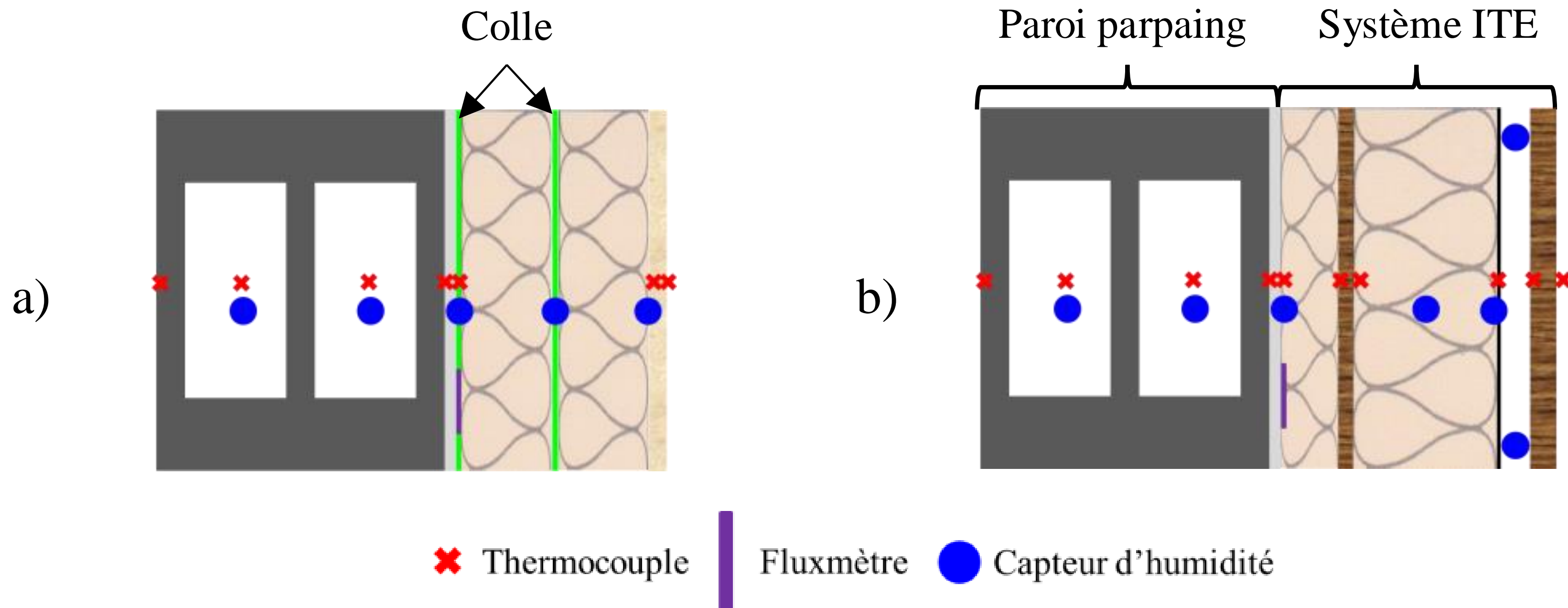


Figure 1 : Schématisation des parois renouvées avec un système ETICS (a) ou une ITE sous bardage (b) et de leur instrumentation.

3. MODELISATION DES TRANSFERTS DE CHALEUR ET D'HUMIDITE

Une modélisation des transferts couplés de chaleur et d'humidité a été mise en place afin d'accéder aux champs de température et d'humidité relative dans la paroi (Figure 2).

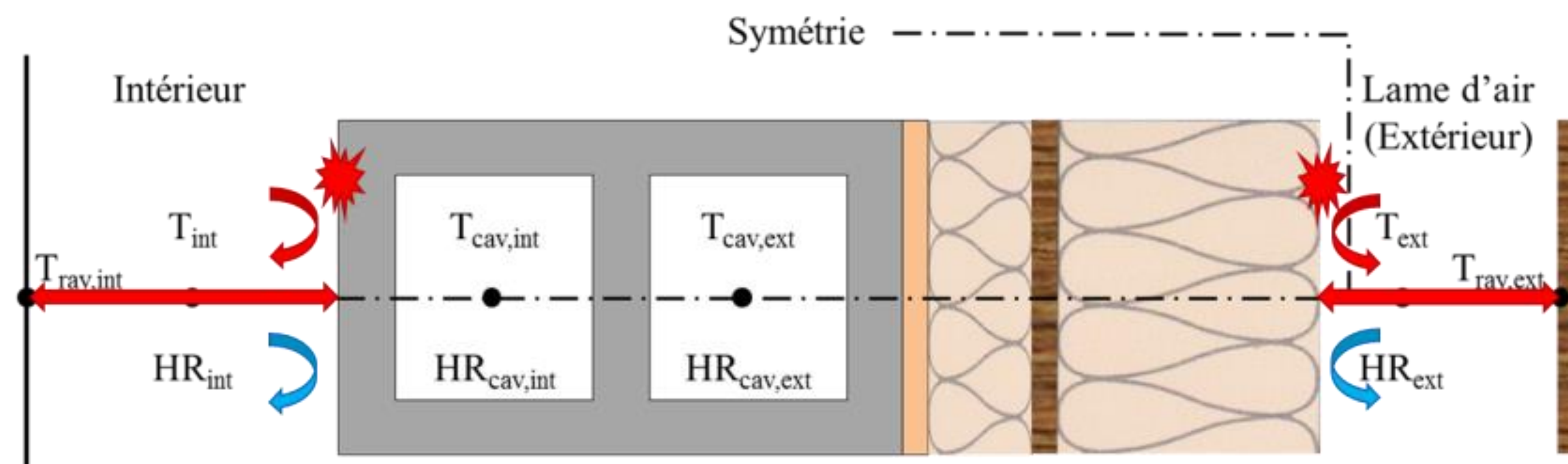


Figure 2 : Géométrie considérée pour la modélisation d'une paroi sous bardage et conditions limites du modèle.

Une approche nodale est retenue dans les cavités des parpaings. Les bilans d'énergie et de masse s'écrivent :

$$C_{eq,T} = \sum(\varphi_{T,cav} S_{cav}) \quad (1)$$

$$C_{eq,M} = \sum(\varphi_{m,cav} S_{cav}) \quad (2)$$

avec $C_{eq,T}$ et $C_{eq,m}$ les capacités thermiques et massiques des cavités d'air (alvéoles de parpaing), $\varphi_{T,cav}$ et $\varphi_{m,cav}$ sont les flux de chaleur et de masse entre les volumes d'air et les surfaces des cloisons (S_{cav}).

Les équations au sein des matériaux s'écrivent (Colinart et al. 2016) :

$$\rho_s(cp_s + w cp_l) \frac{\partial T}{\partial t} = -\nabla(-\lambda \nabla T) + \nabla(D_v^\phi \nabla \phi + D_v^T \nabla T) (L_v + (cp_v - cp_l)(T - T_{ref})) \quad (3)$$

$$\rho_s \theta \frac{\partial \phi}{\partial t} = -\nabla(- (D_l^\phi + D_v^\phi) \nabla \phi - D_v^T \nabla T) \quad (4)$$

Les coefficients de diffusion de la vapeur D_v^ϕ et D_v^T et du liquide D_l^ϕ s'expriment comme :

$$D_v^\phi = \frac{D_{v0}}{\mu} \frac{M_v}{RT} p_{v_{sat}}(T) \quad (5)$$

$$D_v^T = \frac{D_{v0}}{\mu} \frac{M_v}{RT} \phi \left(\frac{dp_{v_{sat}}(T)}{dT} - \frac{p_{v_{sat}}(T)}{T} \right) \quad (6)$$

$$D_l^\phi = \theta \exp(p_1 + \frac{p_2}{w_m}) \quad (7)$$

Toutes les propriétés de stockage (capacité thermique c_p , isotherme de sorption θ) et de transfert (conductivité thermique λ , facteur de résistance à la diffusion de vapeur μ) de chaque matériau ont été mesurées au laboratoire. Dans le cas de la diffusion liquide, les coefficients p_1 et p_2 ont été ajustés du facteur de résistance à la diffusion de vapeur mesuré par un test de la coupelle humide et de manière à respecter une forme définie dans (Zaknoue et al. 2011). Enfin, les couches de colle et les membranes d'étanchéité à l'air sont considérées uniquement comme des éléments résistifs.

Aux interfaces avec les ambiances intérieure et extérieure, des échanges convectifs thermique et massique, radiatifs GLO et latents sont considérés :

$$\varphi_{T_{surf}} = h_{cv} (T_{surf} - T_{amb}) + \varepsilon \sigma (T_{surf}^4 - T_{ray}^4) + \varphi_{m_{surf}} L_v \quad (8)$$

$$\varphi_{m_{surf}} = k_m \left(\frac{M_v}{R} \right) \left(\frac{HR_{surf} p_{vsat}(T_{surf})}{T_{surf}} - \frac{HR_{amb} p_{vsat}(T_{amb})}{T_{amb}} \right) \quad (9)$$

Les coefficients d'échange convectif thermique h_{cv} sont évalués à $5 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ (Colinart et al. 2016) et les coefficients d'échange convectifs massique k_m sont déduits de la relation de Lewis. De plus, les émissivités ε ont été évaluées au laboratoire. Enfin, il est fait l'hypothèse d'un contact thermique et hydrique parfait entre chaque matériau de l'assemblage multicouche.

4. RESULTATS

4.1. INFLUENCE DE LA POSE DES SYSTEMES D'ITE

La Figure 3 présente les évolutions de l'humidité relative mesurées dans l'alvéole extérieure du parpaing et à l'interface mur-ITE pour les 3 systèmes avant et après leur pose (l'instant $t=0$ correspond à la pose des systèmes ITE). En raison de l'eau apportée par la colle lors de la pose du système ETICS, on observe un niveau de saturation à l'interface mur-ITE jusqu'à 35 jours après la pose ainsi qu'une élévation substantielle de l'humidité relative dans l'alvéole extérieure de parpaing. S'en suit une phase de séchage durant laquelle l'humidité relative diminue. Toutefois, l'équilibre hydrique n'est pas encore atteint après 160 jours. En revanche, la pose des systèmes sous bardage n'a pas d'effet significatif sur le comportement hydrique de la paroi et le régime permanent est atteint à l'issue de la séquence expérimentale.

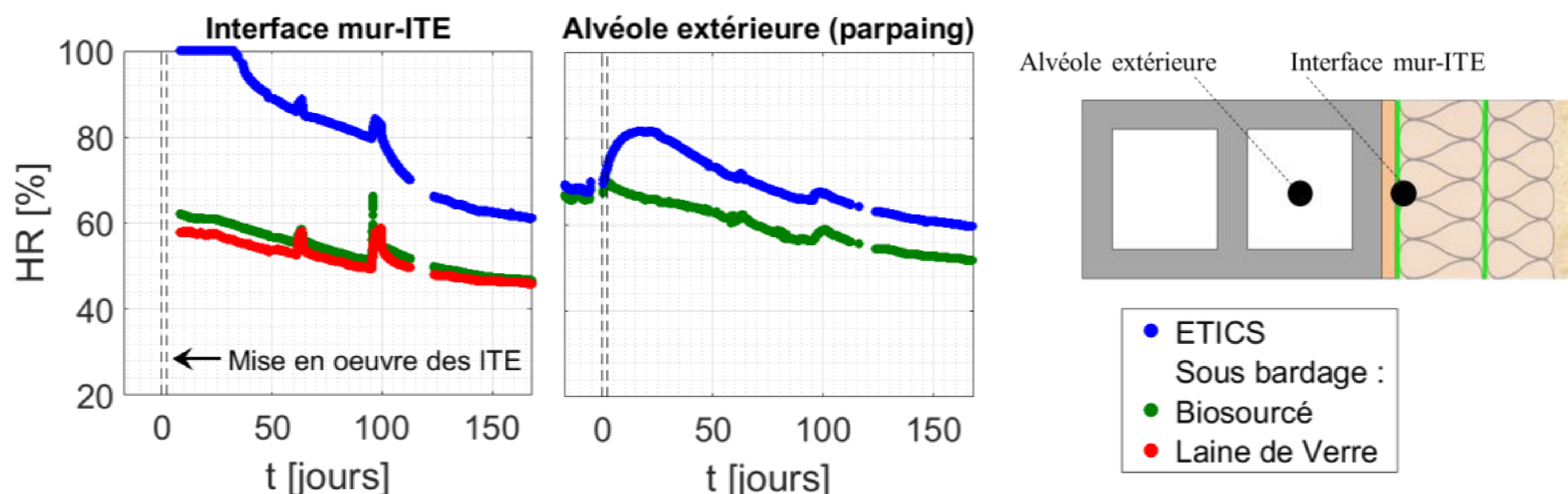


Figure 3 : Évolutions temporelles de l'humidité relative à l'interface mur-ITE (gauche) et dans les cavités de parpaing (droite) après la pose des systèmes d'ITE.

4.2. ETUDES DE DIFFERENTS SCENARII APRES LA POSE

4.2.1. Présentation des séquences expérimentales

Suite à cette mise en œuvre des systèmes d'ITE, deux séquences expérimentales sont étudiées :

- Une séquence dite « saine » pour laquelle il n'existe pas de risques de condensation interstitielle ou superficielle. Dans ce cas, les consignes de température et d'humidité relative extérieure passent respectivement de 8 à 27 °C et de 60 à 70 %.
- Une séquence dite « à risques » pour laquelle un risque de condensation interstitielle doit exister théoriquement au sein des parois. Les consignes de température et d'humidité relative extérieure évoluent alors de 8 à 32 °C et de 70 à 80 %.

Pour chaque séquence, les consignes de température et d'humidité relative intérieure restent fixées à 20 °C et 50 %. Les évolutions présentées sur la Figure 4 montrent globalement un bon respect des consignes dans chaque chambre, hormis pour l'humidité relative lors de la séquence saine.

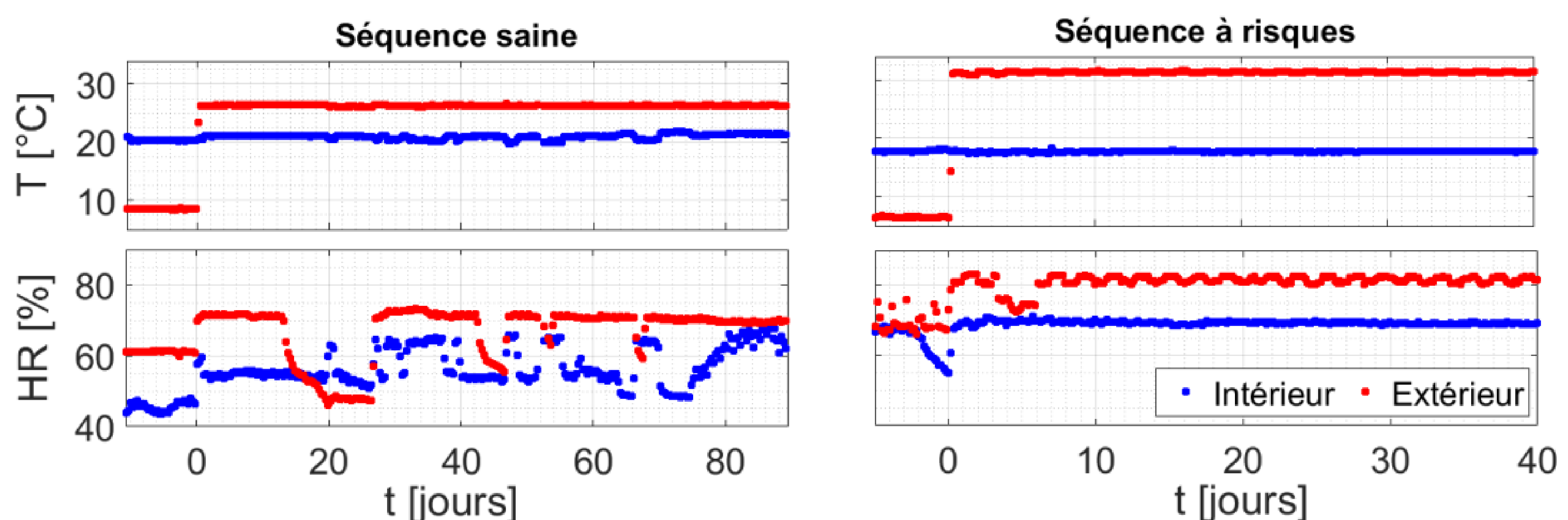


Figure 4 : Températures et humidités relatives mesurées dans les chambres intérieure et extérieure pour les deux séquences expérimentales étudiées.

4.2.2. Analyse du régime permanent

Les profils de température et de pression de vapeur mesurés avant et à l'issue de la séquence saine sont présentés sur la Figure 5 et comparés à ceux calculés à l'aide des consignes mesurées dans chaque chambre et des propriétés hygrothermiques λ et μ évaluées au laboratoire. De même, la résistance thermique des systèmes d'ITE a été évaluée selon la norme ISO 9869 à l'aide des mesures de flux et de températures de surface et a été comparée dans le Tableau 2 aux valeurs théoriques déterminées selon la norme ISO 6946.

Un bon accord mesure/calcul est observé tant pour les températures que pour les résistances thermiques, ce qui souligne que le comportement thermique des parois est bien appréhendé. Concernant les pressions de vapeur, les profils théoriques et expérimentaux des systèmes sous bardage (Laine de Verre et Biosourcé) coïncident, hormis à l'interface mur-ITE à l'issue de la séquence saine. Ces écarts légèrement supérieurs aux incertitudes de mesure tiennent dans le fait que le régime permanent n'est pas complètement atteint en raison des fluctuations de l'humidité relative extérieure (cf. Figure 4). Dans le cas du système ETICS, on observe que la forme des profils de pression de vapeur est influencée significativement par la prise en compte de la colle. Cependant, des différences notables persistent entre mesure et calcul, notamment à l'interface mur-ITE et entre les panneaux de polystyrène, et s'expliquent par le fait que cette paroi n'a toujours pas atteint un état d'équilibre hydrique.

R_{ITE} [$K m^2 W^{-1}$]	Norme	ETICS	LdV	Biosourcé
Calculé	ISO 6946	3,8	4	3,1
Mesuré	ISO 9869	3,74 – 3,78	3,98 – 4,06	3,01 – 3,1

Tableau 2 : Résistance thermique calculée et mesurée des trois systèmes d'ITE.

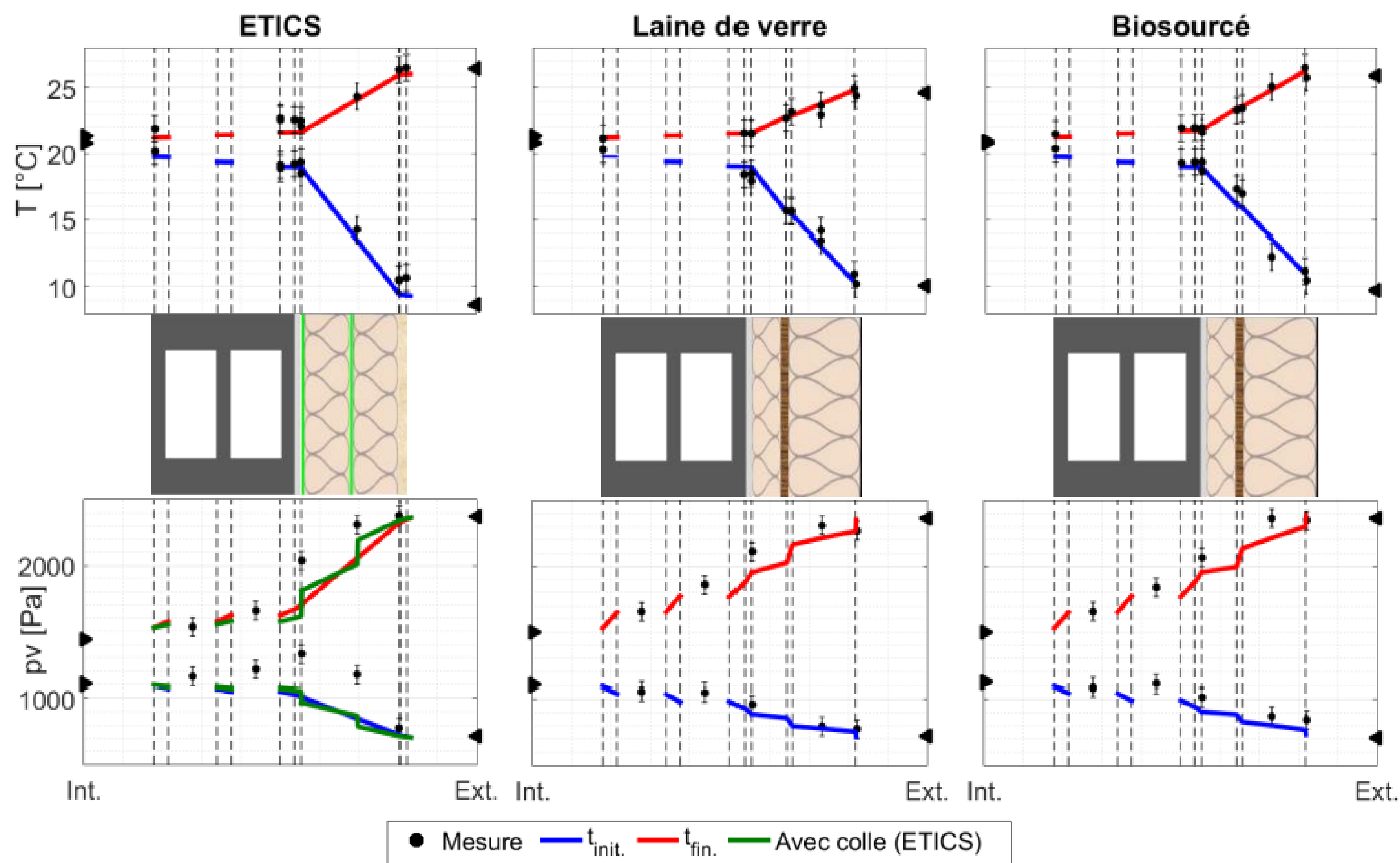


Figure 5 : Profils de température et de pression de vapeur mesurés et calculés.
Symboles : ► / ◄ - conditions mesurées côtés intérieur / extérieur.

4.2.3. Analyse du régime transitoire

Les évolutions temporelles de température, de densité de flux thermique et d'humidité mesurées dans la paroi Biosourcé lors de la séquence saine sont présentées respectivement sur les Figures 6 et 7. Une confrontation de ces évolutions aux résultats d'une simulation en régime transitoire est également proposée. Dans un premier temps, on note que le comportement thermique de cette paroi est bien appréhendé, compte tenu que les écarts entre simulation et expérience n'excèdent pas l'incertitude de mesure, y compris lors du changement drastique de consigne (Figure 6). En revanche, la prédiction des évolutions d'humidité relative est moins satisfaisante en tout point de la paroi, en particulier lors des 15 premiers jours (Figure 7). Une analyse de sensibilité a permis d'identifier la capacité de sorption de la laine de bois et l'OSB, ainsi que le facteur de résistance à la diffusion de vapeur de l'OSB comme étant les plus influents sur la réponse hydrique (Bendouma 2018). Cependant, les écarts restent toutefois dans l'incertitude de mesure. Enfin, on note que la réponse hydrique est plus lente que la réponse thermique, en raison de la plus grande inertie hydrique.

La Figure 8 présente les évolutions mesurée et simulée d'humidité relative à l'interface mur-ITE des parois Biosourcé et Laine de verre lors de la séquence à risques. Dans un premier temps, l'absence de données constatée pour la paroi Laine de Verre met en évidence la difficulté de la mesure d'humidité dans ces conditions extrêmes. En dépit de cette difficulté expérimentale, on observe toujours la présence d'écarts entre simulation et expérience : ces derniers excèdent l'incertitude de mesure et sont plus importants pour la paroi Laine de Verre. Ce dernier point souligne la difficulté à mesurer et à prédire le comportement hydrique dans des matériaux fortement perméable à la vapeur d'eau et faiblement

hygroscopique. Dans un second temps, on observe que les humidités relatives mesurées ou simulées convergent vers la saturation seulement après 40 jours et que le risque de condensation interstitielle ne peut être atteint qu'après une longue période de conditions défavorables. Par ailleurs, la hausse d'humidité relative s'avère plus lente pour la paroi Biosourcé que pour la paroi Laine de Verre : en raison de leur capacité hydrique importante, les isolants biosourcés jouent le rôle de tampon hydrique et peuvent donc réduire les risques liés à l'humidité.

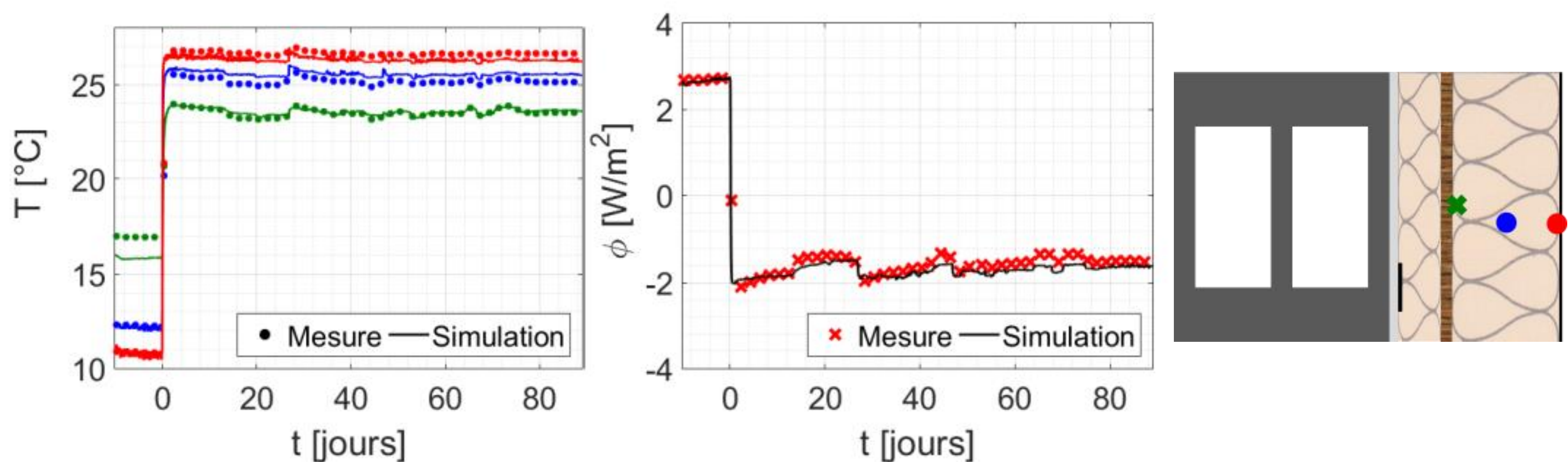


Figure 6 : Évolutions temporelles mesurées et simulées de la température et du flux thermique dans la paroi Biosourcé lors de la séquence saine.

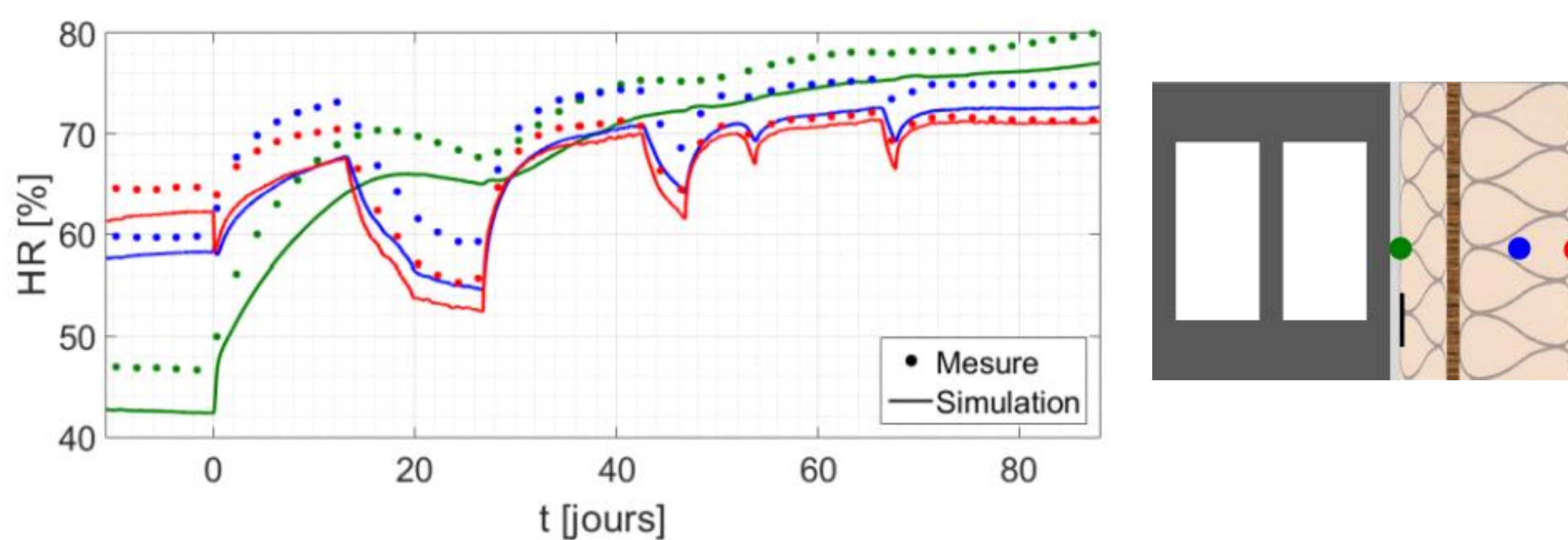


Figure 7 : Évolutions temporelles mesurées et simulées de l'humidité relative dans la paroi Biosourcé lors de la séquence saine.

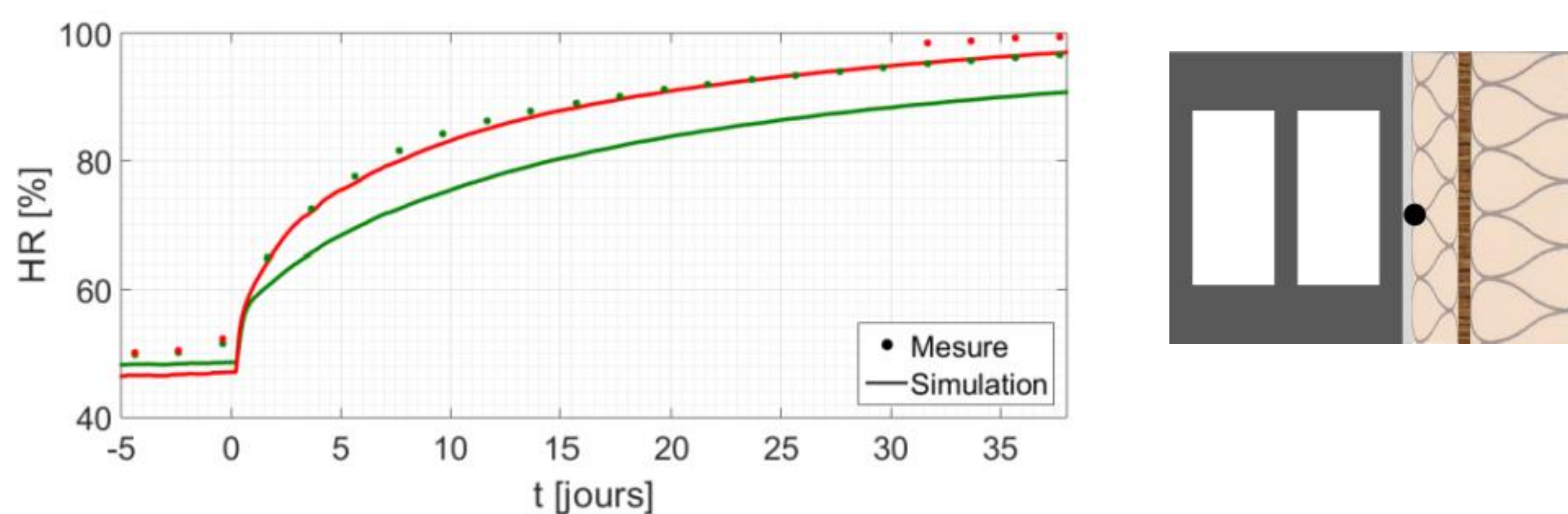


Figure 8 : Évolutions temporelles de l'humidité relative dans les parois Biosourcé (vert) et Laine de Verre (rouge) lors de la séquence à risques.

5. CONCLUSIONS

Dans cette communication, la réponse hygrothermique de trois solutions d'ITE a été étudiée expérimentalement et numériquement lors de différentes séquences de mesure. La confrontation entre simulation et expérience a permis de mettre en évidence la bonne appréhension du comportement thermique des parois, que ce soit au travers de l'évaluation des résistances thermiques, des profils et des évolutions transitoires de température.

D'un point de vue hydrique, les résultats du système ETICS soulignent le rôle important joué par la colle lors de la mise en œuvre (apport d'humidité), ainsi qu'en usage (résistance au transfert d'humidité). Dans le cas des systèmes sous bardage, un accord satisfaisant est retrouvé en régime permanent. Cependant, il est apparu difficile d'appréhender tant numériquement qu'expérimentalement les phénomènes se déroulant dans l'ITE et à l'interface mur-ITE. De plus, les résultats de la paroi Laine de Verre, mettent également en évidence la difficulté de mesure et de modélisation des matériaux faiblement hygroscopiques et fortement perméables à la vapeur d'eau. En revanche, l'utilisation des matériaux biosourcés s'avère intéressante lorsque des situations à risques sont rencontrées.

6. BIBLIOGRAPHIE

- Bendouma, Mathieu. 2018. « Systèmes d'Isolation Thermique par l'Extérieur : Etudes expérimentales et numériques des transferts de chaleur et d'humidité ». Thèse de doctorat, Université de Bretagne Sud
- Colinart, Thibaut, Dylan Lelièvre, et Patrick Glouannec. 2016. « Experimental and numerical analysis of the transient hygrothermal behavior of multilayered hemp concrete wall ». *Energy and Buildings* 112: 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.11.027>.
- Hens, Hugo, et Jan Carmeliet. 2002. « Performance prediction for masonry walls with EIFS using calculation procedures and laboratory testing ». *Journal of Thermal Envelope and Building Science* 25(3): 167-187. <https://doi.org/10.1177/0075424202025003141>.
- Kolaitis, Dionysios, Emmanouil Malliotakis, Dimos Kontogeorgos, Ioannis Mandilaras, Dimitrios Katsourinis, et Maria Founti. 2013. « Comparative assessment of internal and external thermal insulation systems for energy efficient retrofitting of residential buildings ». *Energy and Buildings* 64: 123-131. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.04.004>.
- Kunzel, Hartwig. 1998. « Effect of interior and exterior insulation on the hygrothermal behavior of exposed walls ». *Materials and Structures* 31: 99-103. <https://doi.org/10.1007/BF02486471>.
- Pihelo, Peep, Magnus Lelumees, et Targo Kalamees. 2016. « Influence of Moisture Dry-out on Hygrothermal Performance of Prefabricated Modular Renovation Elements ». *Energy Procedia* 96: 745-755. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.09.137>.
- Van Belleghem, Marnix, Marijke Steeman, Arnold Janssens, et Michel De Paepe. 2015. « Heat, air and moisture transport modelling in ventilated cavity walls ». *Journal of Building Physics* 38(4): 317-349. <https://doi.org/10.1177/1744259114543984>.
- Zakoune, Atika, Patrick Glouannec, et Patrick Salagnac. 2013. « Identification of the liquid and vapour transport parameters of an ecological building material in its early stages ». *Transport in porous media* 98(3): 589-613. <https://doi.org/10.1007/s11242-013-0162-x>

Etude des transferts hygrothermiques dans le bois : du matériau au volume d'air.

Thomas Busser^{*1}, Mickael Pailha¹, Amandine Piot², Monika Woloszyn¹

¹ Univ. Grenoble Alpes, Univ. Savoie Mont Blanc, CNRS, LOCIE
73000 Chambéry, France

² University Grenoble Alpes, CEA, LITEN, DTS, INES
38000, Grenoble, France

*thomas.busser@univ-smb.fr

RESUME. La prise en compte des transferts couplés chaleur-masse devient nécessaire afin de prédire la performance d'un bâtiment, notamment lorsque la paroi contient des matériaux hygroscopiques. Afin d'étudier l'impact des transferts de masse sur l'ambiance intérieure, il est nécessaire de lier les différentes échelles d'étude et de disposer de données expérimentales à la fois aux échelles matériaux, paroi et pièce de vie. L'étude présentée ici adopte cette démarche. L'étude à l'échelle matériaux permet de déterminer les propriétés hygriques qui seront validées à l'échelle paroi. Fort de ces informations, les résultats issus le modèle de volume d'air seront ensuite comparés avec les données expérimentales obtenues avec le dispositif expérimental mis en place pour étudier l'interaction paroi-volume d'air.

MOTS-CLÉFS. Transferts hygrothermiques, Echelle pièce, Comparaison mesure-simulation.

ABSTRACT. The heat and mass transfers become more and more important in the field of building physics. They should be taken into account in order to predict building performance, especially for a wall containing highly hygroscopic materials. In order to study the impact of mass transfers on indoor climate, it is necessary to link the different scales of study and to have experimental data at the scale of material, wall and room. The present study adopts this approach in order to validate hygrothermal transfers prediction by numerical tools. The study at material scale enables to determine hygric properties that will be validated at the wall scale. Using these information, the developed model for air volume is compared with experimental results obtained from an experimental device designed to study interactions between wall-air volume.

KEYWORDS. Hygrothermal transfer, Room scale, Comparison

1 INTRODUCTION

Dans un contexte de durcissement des réglementations thermiques, et de limitation de l'échauffement atmosphérique à 1,5°C, la prise en compte de l'humidité et des transferts couplés chaleur/humidité négligés jusqu'à maintenant, peut devenir importante. En effet le niveau de l'humidité relative peut influencer la performance énergétique du bâtiment, l'ambiance intérieure et la durabilité des matériaux. Il apparaît donc nécessaire de pouvoir prédire le comportement hygro-

thermique des parois. Ainsi, les outils de simulation des transferts hygrothermiques deviennent nécessaires car ils fournissent des indications précieuses notamment pour des parois constituées de matériaux non-conventionnels, tels que matériaux anciens ou encore des matériaux bio-sourcés. Ils permettent d’approcher le comportement énergétique des bâtiments, mais également de mieux comprendre l’impact des transferts de masse et leurs couplages avec les transferts thermiques.

Compte tenu de la physique complexe des transferts couplés, il est nécessaire de disposer de données expérimentales pour valider ces outils numériques. Néanmoins la comparaison entre les résultats numériques et expérimentaux montre que des écarts sont constatés quasi-systématiquement lors pour des matériaux fortement hygroscopiques, comme ceux à base de bois. Ces écarts sont amplifiés lors des variations rapides des conditions aux limites (Busser et al., 2017). Les données expérimentales permettant de valider les modèles à l’échelle de la pièce ou d’un bâtiment sont assez peu nombreuses (Piot, 2009; Yoshino et al., 2009; Lengsfeld et al., 2007; Allinson et Hall, 2010). Les modèles sont plus souvent validés par comparaison numérique comme avec les exercices de l’annexe 41 (Woloszyn et Rode, 2007). Le présent article cherche à améliorer la comparaison entre mesure et simulation à l’échelle de la pièce en mettant en avant le lien entre les différentes échelles d’étude : matériau, paroi et volume d’air.

2 INTERACTION MUR - VOLUME D’AIR : ÉTUDE EXPÉRIMENTALE

2.1 DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL

Afin d’étudier l’influence des transferts d’humidité à l’échelle d’un volume d’air, un dispositif expérimental a été mis en place. Il s’agit de deux cubes d’un volume intérieur $x \times y \times z = 0.6 \text{ m}^3$. Ces cubes ont été construits à partir de panneaux de bois lamellé croisé (CLT : cross laminated timber) d’une épaisseur de 6cm (Figure 1(a)). Pour l’un des cubes, appelé cube A par la suite, les panneaux ont été recouverts d’une huile pour parquet côté intérieur. Les panneaux de l’autre cube, appelé B, sont laissés bruts. Ces cubes sont placés dans une chambre climatique dont la température et l’humidité sont contrôlées grâce à une centrale de traitement d’air.

Les conditions limites intérieures des cubes peuvent également être contrôlées. Quatre résistances chauffantes dont la puissance est mesurée permettent de réguler la température (Figure 1(b)). L’humidité est régulée grâce à un humidificateur placé à l’extérieur du cube permettant d’injecter la vapeur d’eau dans le volume étudié.

Les cubes ont été instrumentés pour mesurer la température et l’humidité relative dans les parois ainsi que dans le volume intérieur. Pour cela des capteurs d’humidité relative et température (SHT 75) et des thermocouples ont été utilisés. L’intérieur des parois a été instrumenté uniquement avec les SHT75 pour mesurer l’humidité à différentes épaisseurs (voir schéma 1(c)). Les flux et la consommation de chauffage sont aussi mesurés. L’incertitude totale des mesures a été calculée par propagation en prenant en compte la précision des capteurs (Taylor, 1997).

2.2 SCÉNARIOS

Étant donné que les conditions intérieures et extérieures des cubes sont contrôlées différents scénarios peuvent être appliqués afin de mettre en évidence les phénomènes physiques mis en jeu. L’influence d’un échelon de température extérieure et intérieure et d’échelons d’humidité relative a notamment été étudié.

Dans cet article, uniquement l’influence de l’humidification sera développée. Deux types d’échelon ont été appliqués : (i) des cycles courts : humidification pendant 8h et évolution libre pendant 12h, (ii) un step long (17 jours) suivi d’une évolution libre. La température intérieure est maintenue constante à 30°C et la température extérieure à 16°C .

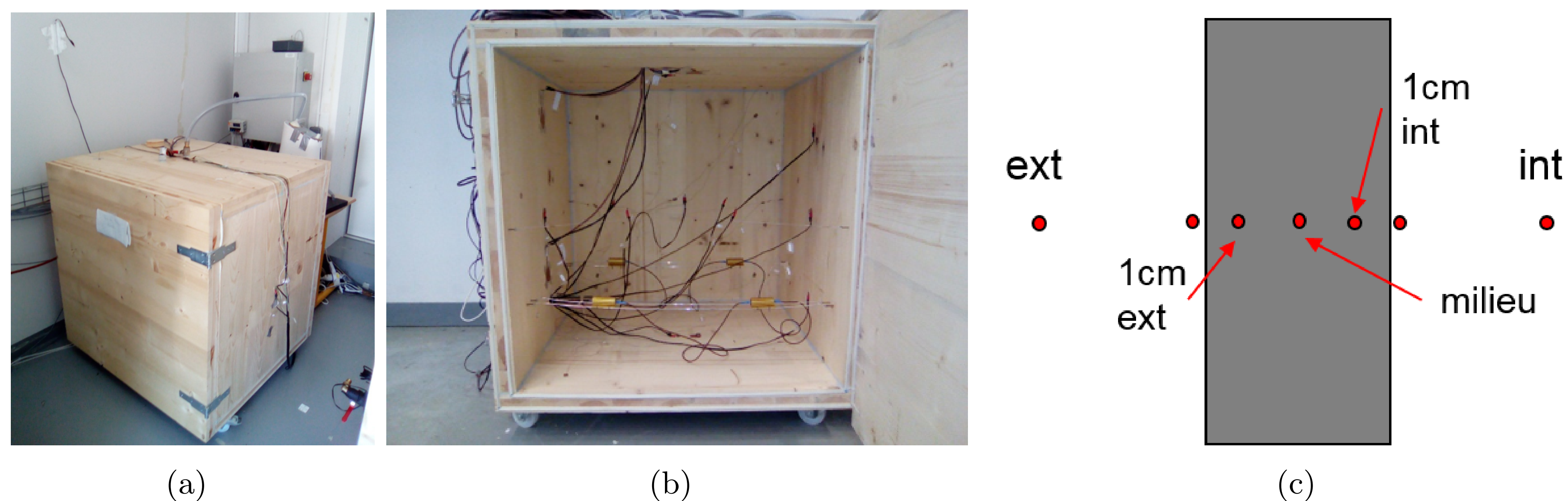


FIGURE 1. Dispositif expérimental : (a) extérieur du cube, (b) intérieur, (c) instrumentation d'une paroi

2.3 CARACTÉRISATION DES PROPRIÉTÉS DU MATÉRIAU

Les propriétés du matériaux bois utilisé sont présentées dans le (Tableau 1). Certaines propriétés du matériau CLT (conductivité thermique, chaleur spécifique, porosité) proviennent de la base de données du logiciel WUFI[®]. La valeur de la conductivité a été vérifié avec les échantillons du laboratoire en utilisant un conductimètre de la marque C-Therm.

La masse volumique du matériau a été mesurée sur plusieurs échantillons cylindrique d'épaisseur 1cm en les pesant et en estimant le volume des échantillons par mesure au pied à coulisse.

Les propriétés hygriques du matériau (isotherme de sorption $w = f(\phi)$, perméabilité à la vapeur δ_v) ont été estimés en utilisant une méthode d'identification de paramètres (algorithme à région de confiance (Coleman et Li, 1996)) à partir de mesures effectuées en régime transitoire sur un échantillon cylindrique de 10 cm de diamètre et de 1 cm d'épaisseur. Cette méthode a été mise au point et validée pour un autre matériau (fibre de bois) (Busser et al., 2018). Ces propriétés seront utilisées pour l'étude numérique à l'échelle paroi et pièce.

Propriété	Équation
Porosité	$\epsilon = 0.7$
Masse volumique	$\rho_0 = 420 \text{ kg/m}^3$
Chaleur spécifique	$C_p = 1500 \text{ J/kg/K}$
Conductivité thermique	$\lambda = 0.2 (T + 273.15) + 118 \text{ mW/m.K}$
Isotherme de sorption	$w = 54 \phi^3 - 56.9 \phi^2 + 31.7 \phi$
Perméabilité à la vapeur	$k_v = 3 \cdot 10^{-13} + 4.45 \cdot 10^{-12} \phi$

TABLE 1: Propriétés du matériau bois étudié.

2.4 QUANTIFICATION DES FUITES

Dans le but de réaliser des simulations précises à l'échelle du volume d'air il est important de caractériser le débit de fuite du dispositif. Pour cela la méthode du gaz traceur avec du CO₂ a été utilisée. Il s'agit d'injecter une grande quantité de CO₂ dans les cubes afin d'atteindre 5000ppm environ ici et d'étudier la décroissance du niveau de gaz qui est due uniquement aux fuites. On peut ainsi obtenir le débit de fuite global (Labat et al., 2013). Pour cette méthode on

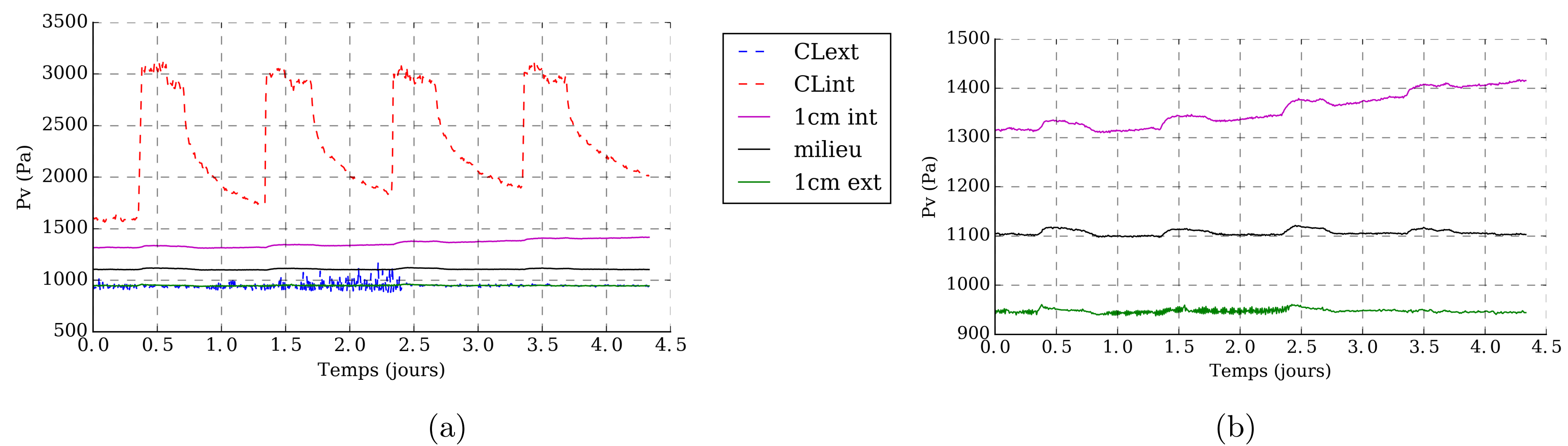


FIGURE 2. Évolution de P_v lors d'échelons de courte durée : (a) CL et dans la paroi, (b) dans la paroi.

suppose que les parois n'interagissent pas avec le gaz. L'expérience a été réalisée sans chauffage ni humidification.

En traçant la décroissance du niveau de CO_2 ($\log(C_{\text{CO}_2})$) en fonction du temps, la pente de la droite donne le débit de fuite. Ici, on obtient : $n_{\text{fuite}} = 1.1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ pour le cube A et $n_{\text{fuite}} = 2.6 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ pour le cube B. La différence de débit de fuite entre les 2 cubes va complexifier la comparaison expérimentale directe des résultats obtenus pour les 2 cubes.

2.5 ÉCHELONS D'HUMIDITÉ RELATIVE

Les cubes ont été soumis à différents steps d'humidité après avoir été conditionnés à une humidité relative de 40%. La température intérieure est maintenue constante à 30°C . Tout d'abord, le cube est soumis à 4 steps courts puis un step long (17 jours) avant de relâcher l'humidification. Les conditions extérieures sont maintenues constantes : $T = 16^\circ\text{C}$ et $\phi = 40\%$.

Les courbes 2(a) et 2(b) montrent l'évolution de la pression de vapeur (P_v) pendant les steps d'humidité de courte durée. L'effet des échelons sur la pression de vapeur dans la paroi est très faible. Si on observe plus en détails (Figure 2(b)) on voit néanmoins que le motif du step se répète à 1cm coté intérieur et au milieu de la paroi mais pas à 1cm coté extérieur. En plus des steps, on voit que sur le capteur 1cm int, la pression de vapeur a tendance à augmenter de manière globale entre le début de l'expérience et la fin, ce qui n'est pas le cas pour les autres capteurs. L'évolution de la pression de vapeur dans le cas du step longue durée (Figure 3(a)) confirme que l'effet de l'humidification est ressenti jusqu'au milieu de la paroi uniquement. L'humidité à 1 cm de la surface extérieure est guidée par la condition aux limites extérieure.

La Figure 3(b) compare la pression de vapeur pour les cubes A (avec huile) et B (sans huile) dans la paroi. Même si il est difficile de comparer expérimentalement les deux cubes notamment à cause des fuites, on peut noter que la pente de P_v pendant la phase de sorption est plus importante pour le cube B que pour le cube A. Ce constat est valable pour les différents capteurs. On peut supposer que cette différence est due à la présence de l'huile sur les parois du cube A encore plus si on considère que le cube A est plus étanche que le B. La décroissance semble également plus rapide pour le cube B. De plus, le déphasage hygrique entre le capteur situé à 1cm coté intérieur et celui au milieu est d'environ 9 jours pour les deux cubes. Comparé au déphasage thermique (quelques heures) on peut une nouvelle fois mettre en évidence la différence de dynamique entre les transferts de masse et ceux de chaleur.

3 MODÈLES

3.1 TRANSFERTS DANS LES PAROIS

La modélisation du transport de chaleur et d'humidité dans les matériaux poreux est couramment basée sur (Philip et De Vries, 1957) et (Luikov, 1975). Dans notre étude, comme dans

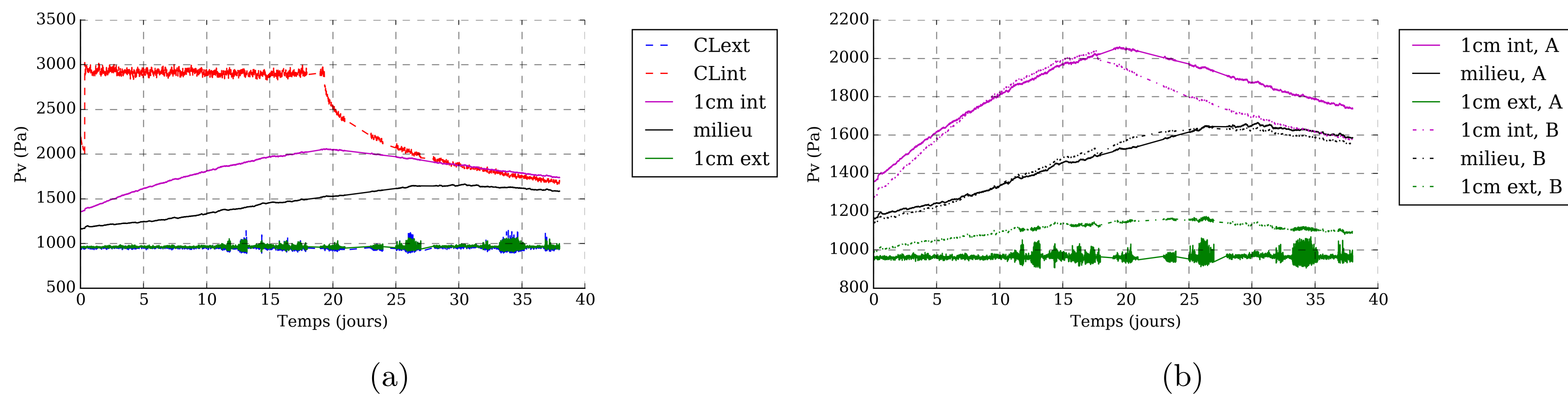


FIGURE 3. Évolution de P_v lors d'échelons de longue durée : (a) dans la paroi, (b) comparaison des cubes.

la plupart des modèles de la littérature, le transfert d'air n'est pas pris en compte. De plus, étant donné les niveaux d'humidité utilisés dans les expériences ($\phi < 0.80$), on suppose que le matériau reste dans le domaine hygroscopique. Par conséquent, le transfert d'eau liquide est négligé. Les équations de conservation unidimensionnelles sont :

$$\frac{\partial w}{\partial t} = \frac{1}{P_s} \frac{\partial w}{\partial \phi} \frac{\partial P_v}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\delta_v \frac{\partial P_v}{\partial x} \right), \quad (1a)$$

$$\frac{\partial E}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \left((\rho_0 C_p + w C_{p,\ell}) T \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} + L_v \delta_v \frac{\partial P_v}{\partial x} \right). \quad (1b)$$

où w est la teneur en eau (kg/m^3), E (kg/m^3) est l'énergie volumique, δ_v (s) la perméabilité à la vapeur, λ ($\text{W}/\text{m}/\text{K}$) la conductivité thermique et L_v (J/kg) la chaleur latente de vaporisation de l'eau.

Deux types de conditions limites peuvent être considérées :

- Dirichlet : température et pression de vapeur fixées
- Robin : on considère la convection à la surface avec les coefficients convectifs, h_m et h_c pour l'humidité et la chaleur respectivement.

3.2 BILANS DANS LE VOLUME D'AIR

Pour un volume d'air de volume V , l'évolution de la température d'air T_a et de l'humidité absolue de l'air w_a ($\text{kg}_{\text{eau}}/\text{kg}_{\text{airsec}}$) sont données par les équations :

$$\rho_a V (c_{p,a} + c_{p,v} w_a) \frac{\partial T_a}{\partial t} = Q_{\text{parois}} + Q_{\text{fuite}} + Q_{\text{source}}, \quad (2a)$$

$$\rho_a V \frac{\partial w_a}{\partial t} = G_{\text{parois}} + G_{\text{fuite}} + G_{\text{source}}. \quad (2b)$$

L'équation 2b peut être exprimée avec la pression de vapeur de l'air $P_{v,a}$ en utilisant la relation suivante :

$$w_a = \frac{M_v}{M_a} \frac{P_{v,a}}{P_a - P_{v,a}} \simeq 6.21 \cdot 10^{-6} P_v$$

Ce modèle de volume d'air a été implémenté dans Dymola[®] en prenant en compte les 6 murs ainsi que les fuites vers l'extérieur. Dans cette étude la résolution numérique est effectuée en utilisant une approche par différence finie standard et un solveur Runge-Kutta à pas de temps adaptatif.

4 COMPARAISON MESURE-SIMULATION

Dans la suite, l'étude numérique est effectuée uniquement pour un seul des 2 cubes.

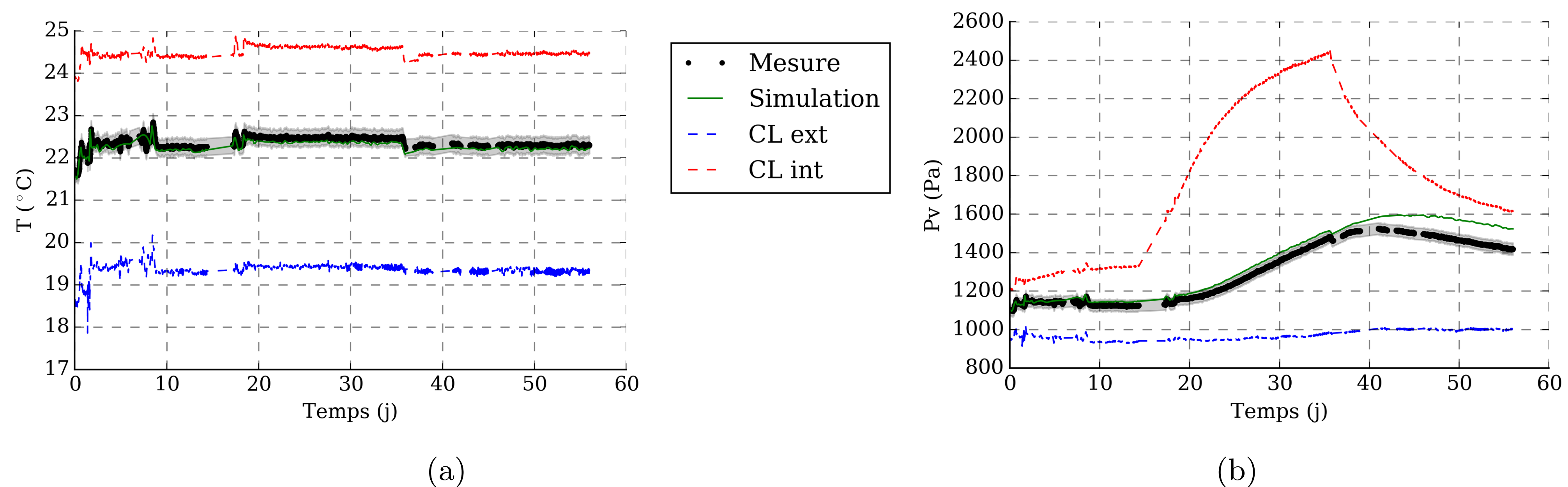


FIGURE 4. Comparaison mesure-simulation à l'échelle paroi : (a) température, (b) pression de vapeur

4.1 PRÉDICTION DES TRANSFERTS DANS LES PAROIS

4.1.1 TRANSFERTS DANS LA PAROI

Dans un premier temps, nous étudions les transferts dans la paroi. Pour cela on s'intéresse au comportement au milieu d'une paroi du cube lors de les expériences d'humidification (cycles courts et step long). Les conditions aux limites utilisées sont de type Dirichlet et correspondent aux données mesurées avec les capteurs à 1cm int et 1cm ext dans le mur pour le cube B.

La Figure 4(a) montre que la température au milieu de la paroi est correctement prédite par le modèle tout au long de l'expérience. Le comportement de la pression de vapeur pendant la phase sorption est bien prédit (Figure 4(b)). Par contre, pendant l'évolution libre la désorption est sous-estimée par le modèle. Cet écart peut être expliqué par le fait que l'hystérésis dans le matériau n'a pas été modélisée, seule l'isotherme de sorption est utilisée.

La différence restant faible, cette simulation permet de valider à la fois le modèle à l'échelle de la paroi ainsi que les propriétés estimées.

4.1.2 DÉTERMINATION DES COEFFICIENTS CONVECTIFS

Afin de progresser dans la prédiction des transferts à l'échelle de la paroi et du volume d'air, il est nécessaire de connaître les coefficients de convection surfacique. Pour cela, considérons le même cas expérimental que précédemment avec des conditions limites de type Robin mesurées à l'extérieur et à l'intérieur. Nous allons estimer les coefficients de convection, h_m et h_c de chaque côté de la paroi en utilisant un algorithme d'identification pour avoir le meilleur accord entre les mesures dans la paroi et les simulations. Afin d'avoir le meilleur pour tous les capteurs dans la parois, les données issues des 3 capteurs sont utilisées pour effectuer l'identification. Seuls les résultats pour le capteur au milieu de la paroi sont présentés ici.

La Figure 5 présente la comparaison entre mesure et simulation au milieu de la paroi après identification des coefficients de convection. L'accord est très bon malgré quelques difficultés pour modéliser la phase de désorption. Pour ce cas expérimental on obtient les valeurs suivantes pour les coefficients de convection et leur écart type :

- coté extérieur : $h_m = 2.67 \cdot 10^{-7} \pm 8.28 \cdot 10^{-9} \text{ s/m}$ et $h_c = 11.3 \pm 4.02 \cdot 10^{-3} \text{ W/m}^2/\text{K}$
- coté intérieur : $h_m = 8.93 \cdot 10^{-9} \pm 1.11 \cdot 10^{-9} \text{ s/m}$ et $h_c = 3.64 \pm 6.52 \cdot 10^{-3} \text{ W/m}^2/\text{K}$

Les ordres de grandeur semblent acceptables étant donné que les conditions à l'extérieur du cube sont contrôlées par une CTA qui souffle de l'air et donc la convection y est plus importante qu'à l'intérieur (convection naturelle).

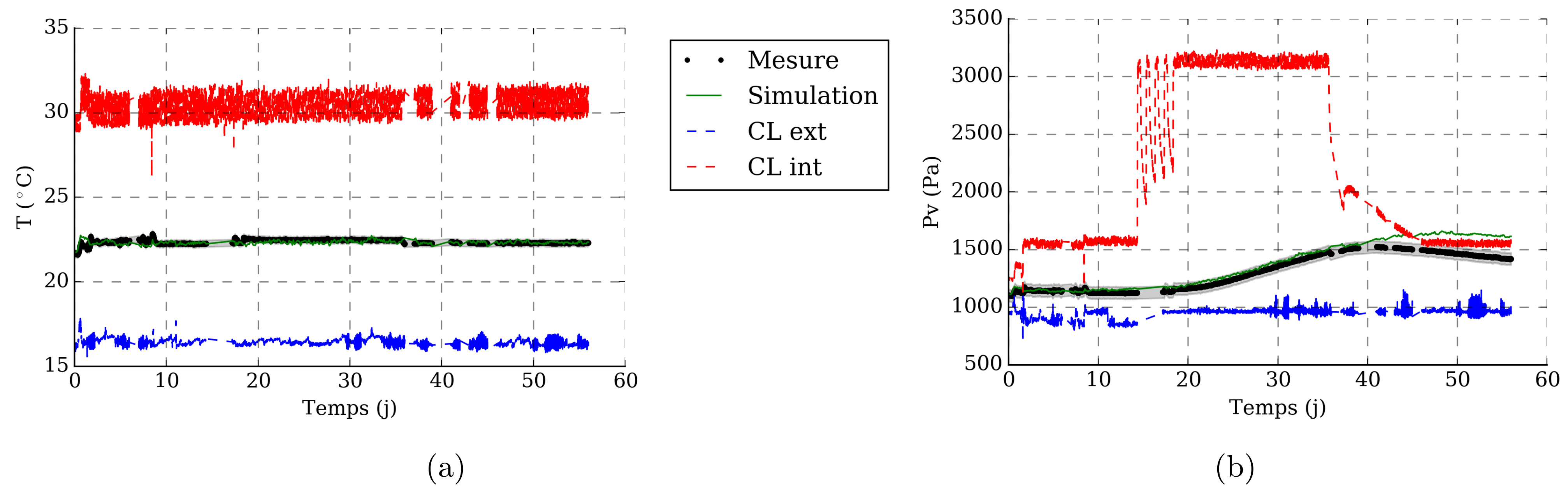


FIGURE 5. Comparaison mesure-simulation dans une paroi du cube en prenant en compte les transferts convectifs à la surface : (a) température T , (b) pression de vapeur P_v

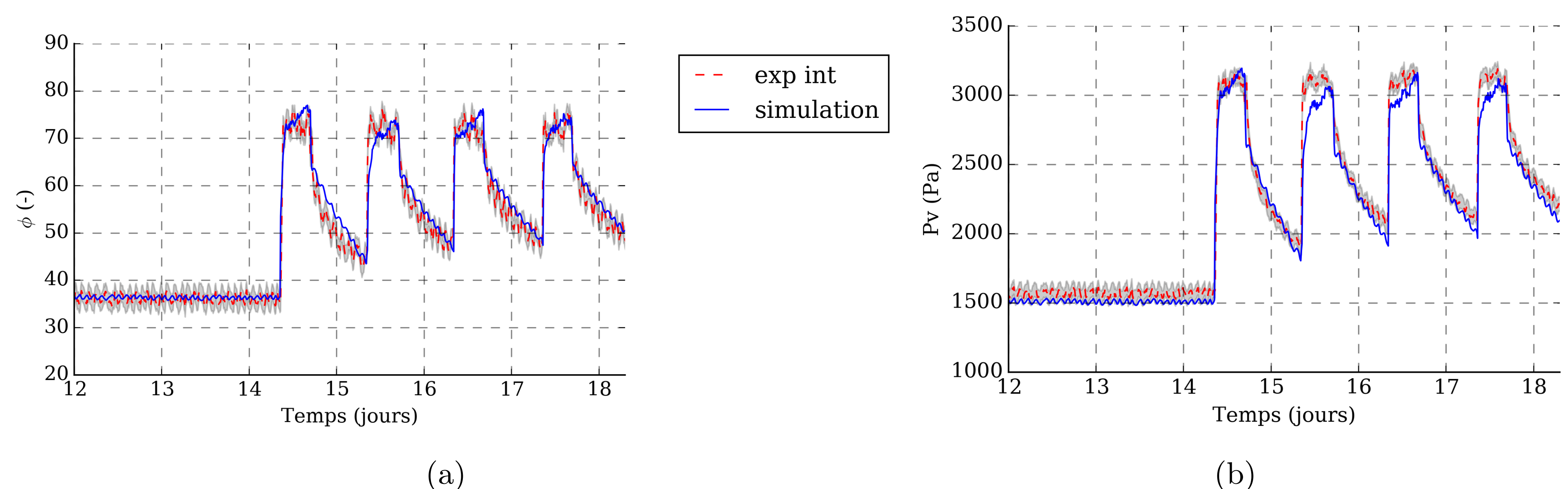


FIGURE 6. Comparaison mesure-simulation dans le volume d'air pour les steps d'humidité de courte durée : (a) humidité relative ϕ , (b) pression de vapeur P_v

4.2 PRÉDICTION DANS LE VOLUME D'AIR

Le modèle étant validé à l'échelle de la paroi en prenant en compte les transferts convectifs de chaleur et de masse, nous pouvons maintenant modéliser les transferts à l'échelle du volume d'air.

Pour cela, nous nous intéressons aux steps d'humidité de courte durée. Afin de prendre en compte les sources et puits d'humidité l'humidificateur permettant l'injection d'humidité est pesé au cours de l'expérience. Au cours de celle-ci une fuite au niveau d'un raccord est apparue, elle a également été prise en compte. La Figure 6 présente les résultats de la comparaison entre mesures et simulation dans le volume d'air pour l'humidité relative et la pression de vapeur.

Ces résultats montrent une bonne concordance des résultats pour ϕ et P_v malgré quelques écarts qui peuvent être dus à la prise en compte du terme source.

5 CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Afin d'étudier l'impact des transferts d'humidité à l'échelle de la pièce et de valider la prédictions des modèles, un dispositif expérimental a été mis en place et caractérisé (fuites, incertitudes...). Les données expérimentales ont été utilisées pour valider les résultats numériques.

Cette étude numérique a mis en évidence l'intérêt de lier les études à différentes échelles. L'étude à l'échelle matériau a permis de déterminer les propriétés du matériau en utilisant une méthode d'identification des paramètres à partir de mesures effectuées en régime transitoire. Ces propriétés ainsi que le modèle ont été validés à l'échelle de la pièce grâce aux mesures expérimentales issues du cube. Afin de prendre en compte les échanges surfaciques, les coefficients

de convection ont été déterminés grâce aux mesures dans la paroi en appliquant un algorithme d'identification. Pour finir, le modèle du volume d'air a permis d'obtenir des résultats satisfaisants pour la comparaison mesure-simulation afin d'étudier l'interaction parois-volume d'air.

Pour aller plus loin, le modèle numérique peut être utilisé pour étudier d'autres campagnes expérimentales. Afin d'étudier l'importance des transferts d'humidité une étude de sensibilité sur les flux latent et sensible pourrait être envisagée, tout comme une comparaison avec des modèles représentant uniquement les transferts de chaleur.

6 REMERCIEMENTS

Ces travaux ont été en partie financés par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR) au travers du projet MOB-AIR n°ANR-12-VBDU-0009, ainsi que par l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME) et l'Assemblée des Pays de Savoie (APS).

RÉFÉRENCES

- Allinson, D. et Hall, M. (2010). Hygrothermal analysis of a stabilised rammed earth test building in the UK. *Energy and Buildings*, 42(6) :845–852.
- Busser, T., Berger, J., Piot, A., Pailha, M., et Woloszyn, M. (2017). Experimental validation of hygrothermal models for building materials and walls : an analysis of recent trends. *submitted*.
- Busser, T., Berger, J., Piot, A., Pailha, M., et Woloszyn, M. (2018). Dynamic experimental method for identification of hygric parameters of a hygroscopic material. *Building and Environment*, 131 :197 – 209.
- Coleman, T. F. et Li, Y. (1996). An interior trust region approach for nonlinear minimization subject to bounds. *SIAM Journal on optimization*, 6(2) :418–445.
- Labat, M., Woloszyn, M., Garnier, G., et Roux, J. J. (2013). Assessment of the air change rate of airtight buildings under natural conditions using the tracer gas technique. comparison with numerical modelling. *Building and environment*, 60 :37–44.
- Lengsfeld, K., Holm, A., et Krus, M. (2007). Moisture-Buffering Effect-Experimental Investigations and Validation. In *6th International Conference on Indoor Air Quality, Ventilation and Energy Conservation in Buildings : Sustainable Built Environment, IAQVEC*.
- Luikov, A. V. (1975). Systems of differential equations of heat and mass transfer in capillary-porous bodies (review). *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 18(1) :1 – 14.
- Philip, J. et De Vries, D. (1957). Moisture movement in porous materials under temperature gradients. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 38(2) :222–232.
- Piot, A. (2009). *Hygrothermique du bâtiment : expérimentation sur une maison à ossature bois en conditions climatiques naturelles et modélisation numérique*. PhD thesis, Institut National des Sciences Appliquées (INSA) de Lyon.
- Taylor, J. R. (1997). *An introduction to error analysis : the study of uncertainties in physical measurements*. University Science Books.
- Woloszyn, M. et Rode, C. (2007). IEA Annex 41 , MOIST-ENG Subtask 1 - Modelling Principles and Common Exercises. Technical report.
- Yoshino, H., Mitamura, T., et Hasegawa, K. (2009). Moisture buffering and effect of ventilation rate and volume rate of hygrothermal materials in a single room under steady state exterior conditions. *Building and Environment*, 44(7) :1418–1425.

Développement d'une méthode inverse par modèle réduit pour le suivi sur site des propriétés thermiques de matériaux de construction

Ana Gabriela CHAVEZ CASTILLO*¹, Yassine ROUIZI¹, Olivier QUEMENER¹

¹Laboratoire de Mécanique et d'Energétique d'Evry
Université d'Evry Val d'Essonne, Antenne de Brétigny sur Orge, IUT d'Evry Val d'Essonne,
Département GTE, Chemin de la Tuilerie – 91731 Brétigny sur Orge.

*a.chavez@iut.univ-evry.fr

RESUME. L'objectif de cette étude est d'évaluer la faisabilité d'une technique d'identification des caractéristiques thermiques d'un isolant, en utilisant des modèles réduits de type modal afin d'effectuer rapidement les calculs. L'utilisation d'une tri-sonde de type fil chaud dotée de plusieurs mesures de température permet l'identification simultanée du tenseur orthotrope de la conductivité et de la capacité volumique. Les premiers résultats obtenus montrent l'intérêt de cette technique qui ouvre la voie à une identification in situ.

MOTS-CLÉS : caractérisation thermique, conductivité orthotrope, isolants, modèle réduit

ABSTRACT. The objective of this study is to evaluate the feasibility of a technique in order to identify the thermal characteristics of an insulant. This technic uses a reduced modal model that permit to perform quick calculations. The use of a specific hot wire probe consisting of three rods with several temperature measurements allows the simultaneous identification of the orthotropic tensor of the conductivity and the volume capacity. The first results obtained show the interest of this technique which opens the way for an in situ identification.

KEYWORDS: thermal characterization, orthotropic conductivity, insulant, reduced model

1. INTRODUCTION

Dans le domaine du bâtiment, le suivi de la performance énergétique est un problème d'actualité pour lequel la mesure au cours du temps de la performance réelle des parois, et principalement de l'isolant utilisé, va être une nécessité. Compte tenu des limites des modèles analytiques habituellement associés aux sondes de caractérisation (Marmoret *et al.* 2017), ceux-ci ne sont pas toujours adaptés aux contraintes réelles d'un bâtiment. Par ailleurs, il est nécessaire de pouvoir déterminer le possible caractère orthotrope de la conductivité thermique. Tout ceci nous amène ainsi à utiliser un modèle numérique tridimensionnel, dont le nombre important de degrés de liberté peut alourdir de façon importante le processus itératif d'identification (Thomas *et al.*, 2007).

Afin de s'affranchir de la taille importante de modèle numérique on utilise ici un modèle réduit de type modal. Il permet de diminuer de façon importante le nombre de degrés de liberté du problème, tout en approchant de façon très précise l'évolution temporelle sur l'intégralité de la géométrie réelle. Le papier présente un cas simple d'étude permettant d'étudier les potentialités de la méthode.

2. PROBLEME CONSIDERE

On considère ici une partie Ω_I d'une plaque d'isolant dont on cherche à déterminer la capacité calorifique volumique c [$\text{J.m}^{-3}.\text{K}^{-1}$] et tenseur de conductivité thermique $\bar{\mathbf{k}}$ [$\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$], considéré comme orthotrope :

$$\bar{\mathbf{k}} = \begin{bmatrix} k_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & k_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & k_{zz} \end{bmatrix} \quad (1)$$

On insère dans ce matériau une tri-sonde Ω_S (figure 1). Une première sonde abrite sur une partie de sa longueur Ω_{Se} une résistance chauffante. On dispose de $N_{mes} = 4$ mesures de température, trois à chaque extrémité des sondes (C_1 , C_2 et C_3), et un capteur supplémentaire (C_4) positionné au milieu du domaine Ω_{Se} (figure 2). Ces sondes (diamètre 2mm, longueur 10cm) sont distantes les unes des autres de 15mm. Pour cette étude simplifiée, la sonde est considérée comme uniforme : capacité volumique $c_s = 2.10^6 \text{ J.m}^{-3}.\text{K}^{-1}$ et conductivité isotrope $k_s = 0,16 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$.

On considère une condition limite de type convective ($h = 10 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$, $T_{ext} = 20^\circ\text{C}$) sur la face Γ_i par laquelle est insérée la tri-sonde. Des conditions adiabatiques sont appliquées sur les autres faces de l'isolant. A partir d'une température initiale uniforme $T_0 = 20^\circ\text{C}$, une puissance volumique $\pi = 1,8.10^6 \text{ W.m}^{-3}$ est dissipée sur le domaine Ω_{Se} pendant une durée $\Delta t = 300 \text{ s}$. Les capteurs permettent alors un relevé des températures sur cette durée.

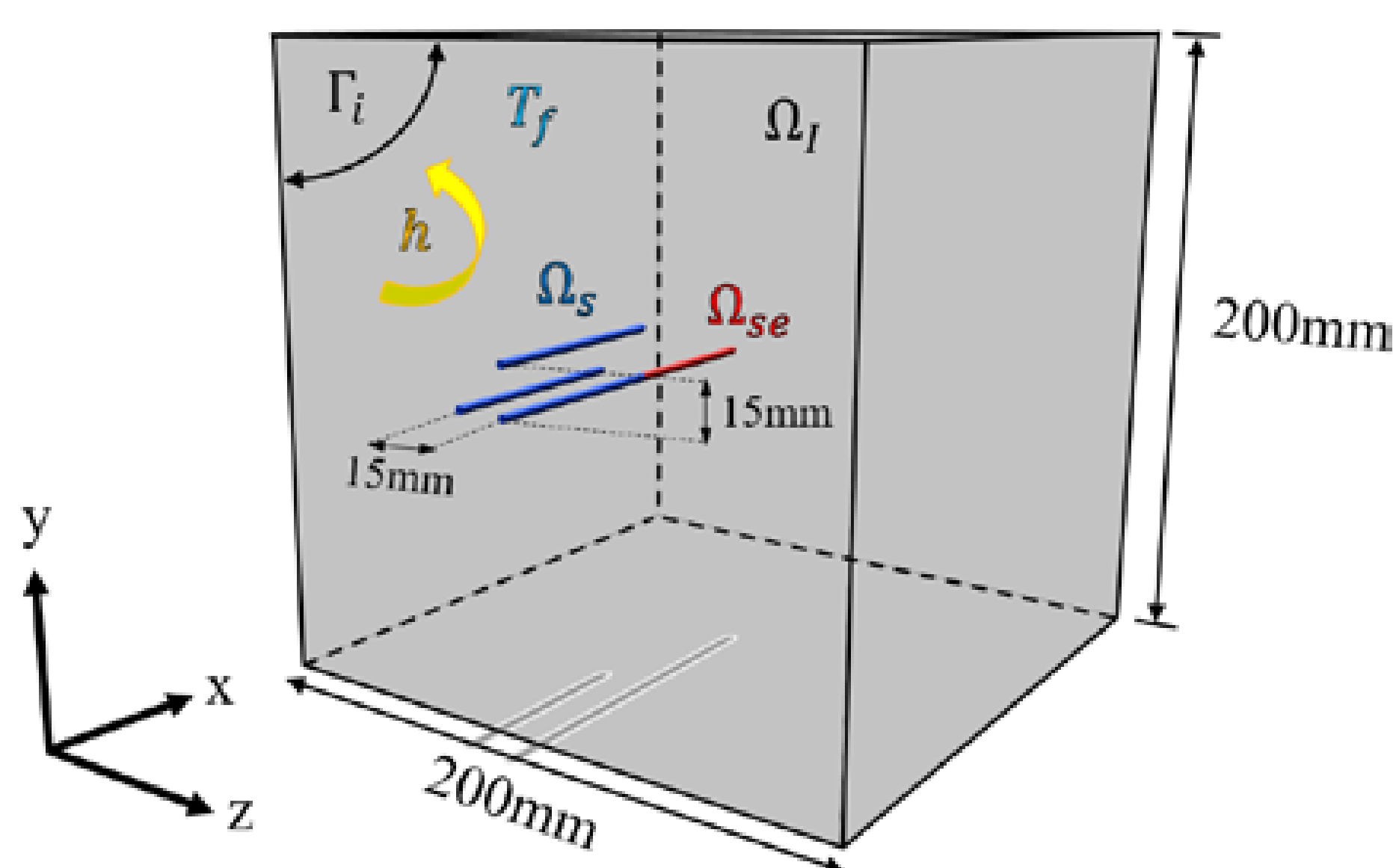


Figure 1 : Géométrie du problème

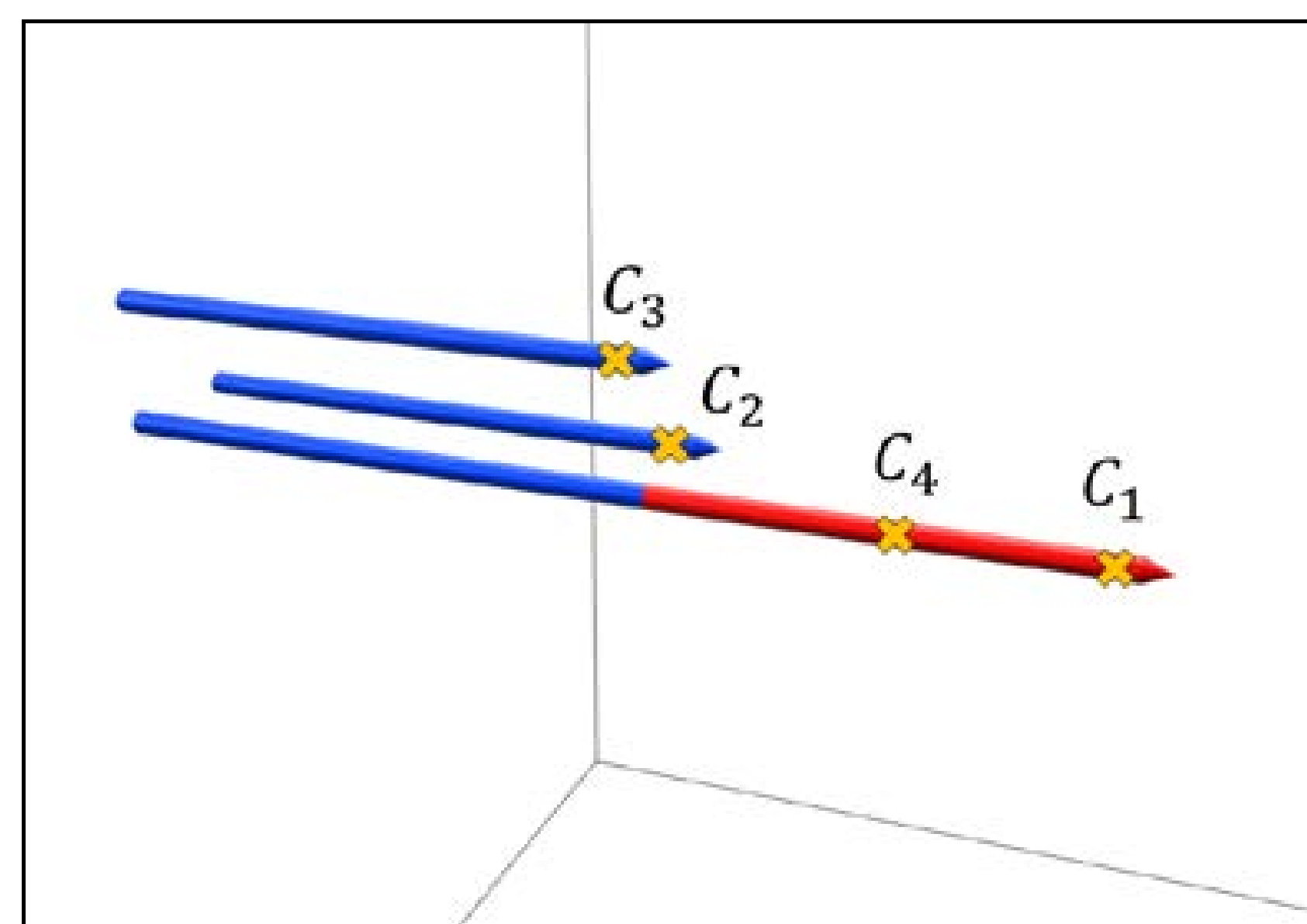


Figure 2 : Détail des sondes de mesure

Ce problème thermique s'écrit sous forme variationnelle, dans laquelle les paramètres inconnus c , k_{xx} , k_{yy} et k_{zz} sont isolés :

$$\begin{aligned} c \int_{\Omega_I} \frac{\partial T}{\partial t} g \, d\Omega + \int_{\Omega_S} c_s \frac{\partial T}{\partial t} g \, d\Omega = & -k_{xx} \int_{\Omega_I} \frac{\partial T}{\partial x} \frac{\partial g}{\partial x} \, d\Omega - k_{yy} \int_{\Omega_I} \frac{\partial T}{\partial y} \frac{\partial g}{\partial y} \, d\Omega - k_{zz} \int_{\Omega_I} \frac{\partial T}{\partial z} \frac{\partial g}{\partial z} \, d\Omega \\ & - \int_{\Omega_S} k \vec{\nabla} T \cdot \vec{\nabla} g \, d\Omega - \int_{\Gamma_i} h T g \, d\Gamma + \int_{\Omega_{Se}} \pi g \, d\Omega + \int_{\Gamma_i} h T_{ext} g \, d\Gamma \end{aligned} \quad (2)$$

Après discrétisation spatiale par éléments finis de type P1, on obtient l'expression matricielle suivante (en respectant l'ordre des termes de l'équation 2) :

$$(c \mathbf{C}_I + \mathbf{C}_S) \dot{\mathbf{T}} = (k_{xx} \mathbf{K}_{Ix} + k_{yy} \mathbf{K}_{Iy} + k_{zz} \mathbf{K}_{Iz} + \mathbf{A}) \mathbf{T} + \mathbf{U} \quad (3)$$

Une analyse de sensibilité au maillage montre alors la nécessité d'effectuer une discrétisation spatiale caractérisée par $N = 55608$ nœuds, qui correspond donc à l'ordre du système matriciel (éq. (3)).

3. MODELE REDUIT

3.1. PRINCIPE

La méthode de réduction modale se base sur une décomposition de la température sur un petit nombre \tilde{n} de fonctions spatiales connues $\tilde{V}_i(M)$. Il est alors possible d'approcher la température recherchée par $\tilde{T}(M, t)$:

$$\tilde{T}(M, t) \approx \sum_{i=1}^{\tilde{n} \ll N} \tilde{x}_i(t) \tilde{V}_i(M) \quad (4)$$

où $\tilde{x}_i(t)$ sont les états d'excitation inconnus de ces fonctions spatiales $\tilde{V}_i(M)$. Si le nombre de fonctions \tilde{n} est faible devant N , le nombre d'inconnues du problème diminue alors fortement. Pour cette étude, on utilise la méthode BERM (Quéméner *et al.* 2007).

3.2. BASE DE BRANCHE

Une première étape consiste à calculer l'ensemble de modes dits de Branche par la résolution d'un problème aux valeurs propres (éq.(5) et (6)). Ces modes propres, caractérisés par leur valeur propre z_i et leur vecteur propre V_i , forment une base pour tout type de problème thermique (éq.(2)), y compris lorsque les différents paramètres du problème thermique varient.

$$\forall M \in \Omega_S \cup \Omega_I, \quad \bar{\nabla}(\bar{\mathbf{k}}_m \bar{\nabla} V_i) = z_i c_m V_i \quad (5)$$

$$\forall M \in \Gamma_i, \quad \bar{\mathbf{k}}_m \bar{\nabla} V_i \cdot \bar{\mathbf{n}} = -z_i \zeta V_i \quad (6)$$

La condition aux limites (éq. (6)) est une condition abstraite qui fait intervenir la valeur propre z_i du mode V_i , ainsi que le nombre de Steklov ζ . Ce dernier assure l'homogénéité dimensionnelle de la condition aux limites et permet d'éviter la dégénérescence du problème modal de branche. On le choisit ainsi de façon à donner une importance comparable aux deux équations du système (4) et (5), soit finalement :

$$\zeta = \frac{\int_{\Omega_I \cup \Omega_S} c \, d\Omega}{\int_{\Gamma_i} d\Gamma} \quad (7)$$

Pour le domaine Ω_S correspondant à la sonde, les paramètres de capacité c_m et de conductivité $\bar{\mathbf{k}}_m$ sont choisis de façon à correspondre au problème physique étudié. Par contre, en ce qui concerne l'isolant, puisque la capacité et les trois conductivités directionnelles sont inconnues, on choisit à priori une valeur quelconque cohérente avec le type de matériaux étudié :

$$\forall M \in \Omega_I, \quad k_{xx} = k_{yy} = k_{zz} = 0,01 \text{ W.m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}, \quad c = 10000 \text{ J.m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$$

Le calcul numérique de cette base de Branche s'effectue par méthode d'Arnoldi (Lehoucq *et al.* 1988) qui permet de calculer les premiers modes caractérisés par leur plus petite valeur propre z_i (en valeur absolue). On choisit ici de calculer 80% de la base complète, soit 44486 modes, ce qui nécessite 2h50 de temps CPU sur une machine du type HP EliteBook avec intel core i7.

3.3. REDUCTION DE LA BASE

La réduction de la base est effectuée par la méthode d'amalgame. Elle consiste à reconstruire de nouveaux modes \tilde{V}_j par combinaisons linéaires des modes initiaux V_i :

$$\forall j \in \{1, \tilde{n}\} \quad \tilde{V}_j = \sum_{p=1}^{\tilde{N}_j} \alpha_{j,p} V_{j,p} \quad (8)$$

Le choix de cette combinaison s'appuie alors des températures de référence à partir desquelles on obtient les états d'excitation $x_i(t)$ associés à la base complète initiale. A partir de ces coefficients on effectue le choix de la répartition de l'ensemble des modes V_i sur la base réduite \tilde{V}_j ainsi que le calcul des facteurs de pondération $\alpha_{j,p}$.

Pour cette étude, compte tenu de l'absence de paramètres connus pour l'isolant, on utilise des champs de température de référence issus de simulations pour lesquelles différentes valeurs de conductivité et de capacité de l'isolant sont utilisées. Celles-ci sont choisies parmi les valeurs extrêmes d'un domaine de recherche considéré, soit ici :

$$\begin{aligned} k_{xxMIN} = k_{yyMIN} = k_{zzMIN} &= 0,01 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}, & c_{MIN} &= 10000 \text{ J.m}^{-3}.\text{K}^{-1} \\ k_{xxMAX} = k_{yyMAX} = k_{zzMAX} &= 0,06 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}, & c_{MAX} &= 60000 \text{ J.m}^{-3}.\text{K}^{-1} \end{aligned}$$

Différentes bases peuvent être ainsi calculées selon l'ordre de réduction \tilde{n} choisi.

3.4. EQUATION D'ETATS

Le problème réduit est défini par l'équation d'état obtenue en projetant l'équation de la chaleur (éq.(3)) sur la base réduite. En notant $\tilde{\mathbf{V}}$ la matrice regroupant l'intégralité des \tilde{n} modes réduits \tilde{V}_j exprimés sous forme discrète, et $\tilde{\mathbf{X}}$ le vecteur des \tilde{n} états d'excitation associés, on a :

$$\left(c \tilde{\mathbf{V}}^t \mathbf{C}_I \tilde{\mathbf{V}} + \tilde{\mathbf{V}}^t \mathbf{C} \tilde{\mathbf{V}} \right) \dot{\tilde{\mathbf{X}}} = \left(k_{xx} \tilde{\mathbf{V}}^t \mathbf{K}_{Ix} \tilde{\mathbf{V}} + k_{yy} \tilde{\mathbf{V}}^t \mathbf{K}_{Iy} \tilde{\mathbf{V}} + k_{zz} \tilde{\mathbf{V}}^t \mathbf{K}_{Iz} \tilde{\mathbf{V}} + \tilde{\mathbf{V}}^t \mathbf{A} \tilde{\mathbf{V}} \right) \tilde{\mathbf{X}} + \tilde{\mathbf{V}}^t \mathbf{U} \quad (9)$$

Soit sous forme compacte :

$$\left(c \mathbf{L}_I + \mathbf{L} \right) \dot{\tilde{\mathbf{X}}} = \left(k_{xx} \mathbf{M}_{Ix} + k_{yy} \mathbf{M}_{Iy} + k_{zz} \mathbf{M}_{Iz} + \mathbf{M} \right) \tilde{\mathbf{X}} + \mathbf{N} \quad (10)$$

La résolution de ce problème permet donc de déterminer l'évolution temporelle des \tilde{n} états d'excitation et de reconstruire le champ de température $\tilde{T}(M, t)$ (éq. (4)). La figure 3 montre les évolutions de température obtenues avec le modèle complet, le modèle réduit d'ordre 500 et le modèle réduit d'ordre 200. Dans la même figure on présente aussi l'évolution des écarts entre le modèle complet et les modèles réduits pour le capteur C_1 (erreur la plus importante parmi les 4 sondes de mesure), pour les deux configurations suivantes :

Config. 1 : $k_{xx} = k_{yy} = k_{zz} = 0,03 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$, $c = 30000 \text{ J.m}^{-3}.\text{K}^{-1}$

Config. 2 : $k_{xx} = 0,04 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$, $k_{yy} = 0,03 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$, $k_{zz} = 0,02 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$, $c = 30000 \text{ J.m}^{-3}.\text{K}^{-1}$

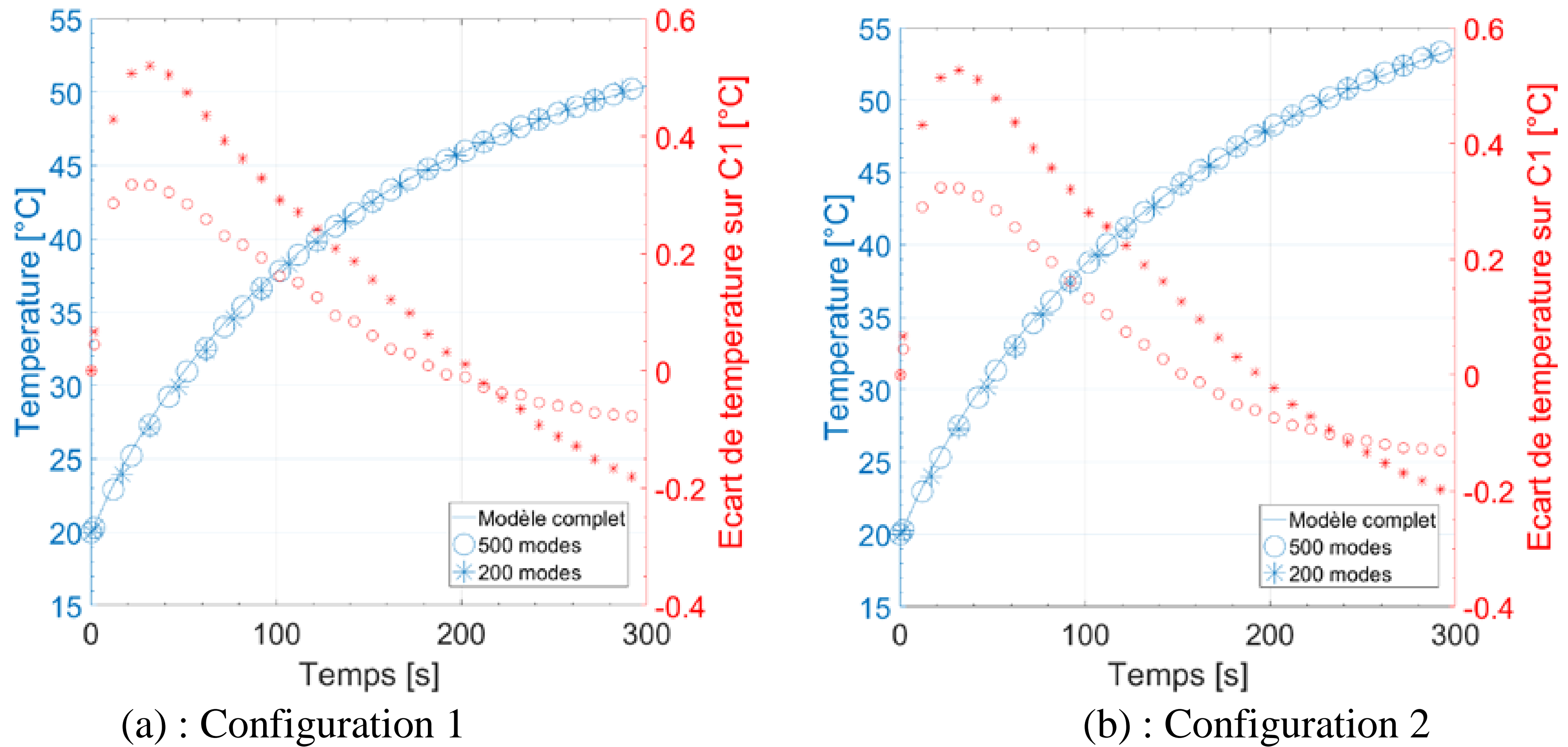


Figure 3 – Evolution de la température et l'erreur quadratique sur C_1

On note ainsi le bon comportement des deux modèles réduits utilisés, pour lesquels les erreurs moyennes (calculées sur l'intégralité du domaine étudié $\Omega_I \cup \Omega_S$ et sur la durée de simulation) sont très faibles : $0,036^\circ\text{C}$ pour le modèle réduit à 200 modes et $0,024^\circ\text{C}$ pour celui à 500 modes. La figure 3 montre par ailleurs qu'au point de mesure C_1 (même comportement pour tous les autres points de mesure), les plus grandes erreurs correspondent aux premiers instants de la simulation, avec des erreurs ponctuelles maximum de l'ordre de $0,5^\circ\text{C}$ pour un modèle à 200 modes et $0,3^\circ\text{C}$ pour un modèle réduit à 500 modes. Cet écart risque ainsi de limiter la précision de l'identification.

4. IDENTIFICATION

4.1. PRINCIPE

On cherche à identifier le vecteur $\boldsymbol{\beta}$ contenant les paramètres thermophysiques k_{xx} , k_{yy} , k_{zz} et c du matériau dans lequel la tri-sonde de mesure est insérée. Les $N_{mes} = 4$ mesures permettent d'obtenir le vecteur des observables \mathbf{Y} , qui est relié au champ de température \mathbf{T} via une matrice d'observation \mathbf{E} . Etant donné le grand nombre de degrés de liberté du problème discret, il est possible d'utiliser la formulation modale (éq. (10)) afin de diminuer la taille du problème inverse :

$$\mathbf{Y} = \mathbf{E}\mathbf{T} \approx \mathbf{E}\tilde{\mathbf{V}}\tilde{\mathbf{X}} \quad (11)$$

Le processus itératif d'identification s'appuie sur la minimisation d'un critère quadratique bâti sur l'écart entre la mesure bruitée (ici calculée avec le modèle complet (éq. (3))) et le résultat de la simulation effectuée par le modèle réduit (éq. (10) et (11)) pour les paramètres estimés \hat{k}_{xx} , \hat{k}_{yy} , \hat{k}_{zz} et \hat{c} à chaque itération :

$$J(\boldsymbol{\beta}) = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^{N_{mes}} \sum_{i=1}^{N_{pts}} \left(Y^i(t_j) - \hat{Y}^i(t_j, \boldsymbol{\beta}) \right)^2, \quad (12)$$

où N_{pts} correspond au nombre de mesures par capteur au cours d'un essai. Puisque l'étude est ici purement numérique, les mesures sont obtenues par simulation numérique utilisant le modèle complet (éq. (3)) à laquelle on ajoute un bruit blanc $\sigma_b = 0,1^\circ\text{C}$. La procédure de minimisation utilise une méthode de programmation non linéaire basée sur un algorithme à régions de confiance (Matlab).

4.2. ANALYSE DE SENSIBILITE

A partir de la géométrie initiale fixée, une étude de sensibilité des quatre sondes aux différents paramètres à identifier est menée. Pour chaque mesure Y^i obtenue par chaque capteur, on utilise les sensibilités réduites définies par les relations suivantes :

$$\forall 1 < i < N_{mes}, \quad S_c^i = c \frac{\partial Y^i}{\partial c}, \quad S_{k_{xx}}^i = k_{xx} \frac{\partial Y^i}{\partial k_{xx}}, \quad S_{k_{yy}}^i = k_{yy} \frac{\partial Y^i}{\partial k_{yy}}, \quad S_{k_{zz}}^i = k_{zz} \frac{\partial Y^i}{\partial k_{zz}} \quad (13)$$

La figure 4 représente ainsi l'évolution temporelle des différentes sensibilités réduites.

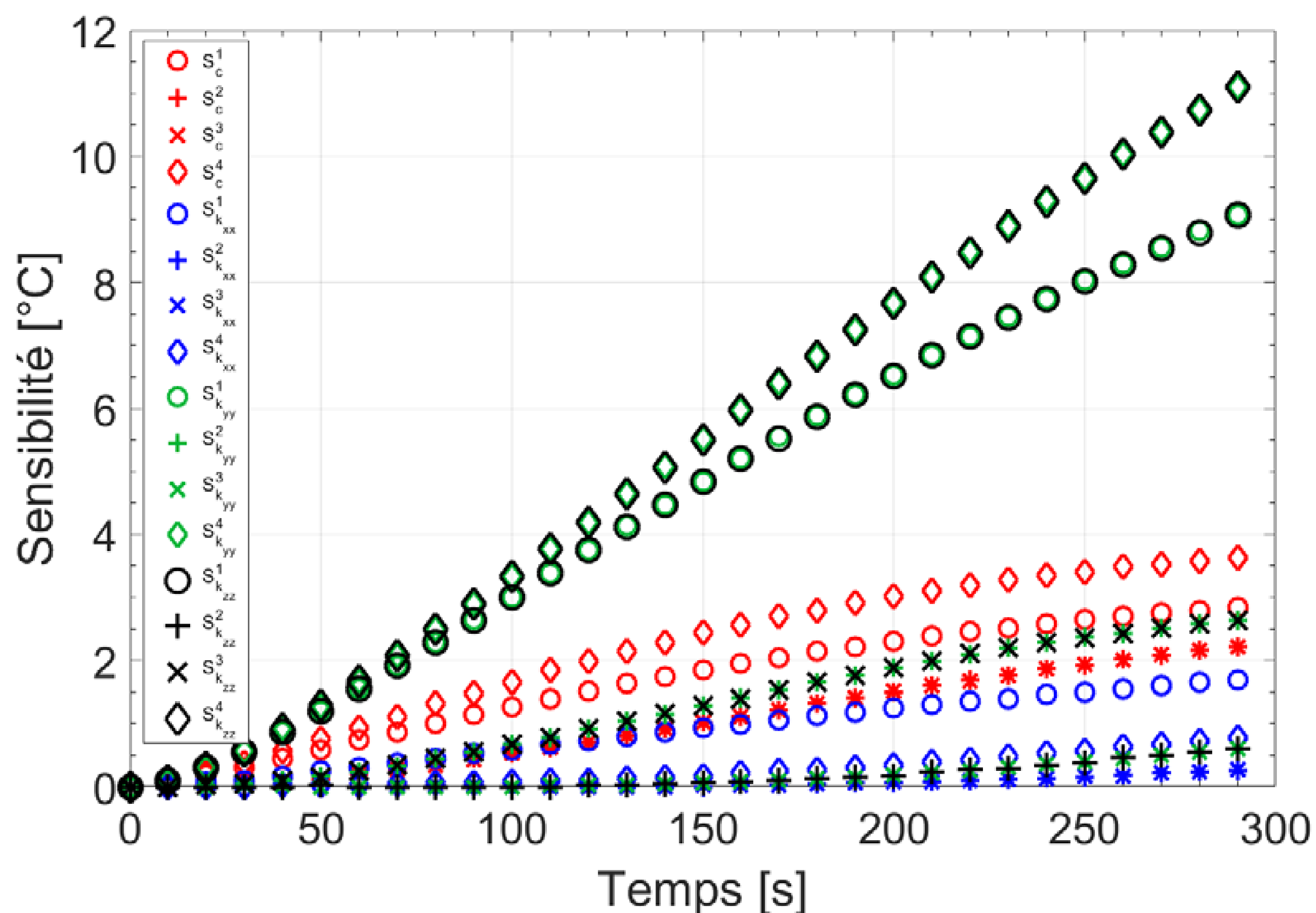


Figure 4 – Etude de sensibilité

On note ainsi qu'en ce qui concerne les conductivités k_{yy} et k_{zz} , les sensibilités des capteurs C_1 et C_4 positionnés sur la tige principale (voir figure 2) sont certes les plus importantes, mais il apparaît clairement que $S_{k_{yy}}^4$ et $S_{k_{zz}}^4$ sont parfaitement corrélées, et qu'il en va de même pour $S_{k_{yy}}^1$ et $S_{k_{zz}}^1$. Ainsi ces deux capteurs seuls ne peuvent pas permettre d'identifier les deux conductivités k_{yy} et k_{zz} , et on voit alors l'utilité des capteurs C_2 et C_3 positionnés sur les tiges secondaires, qui malgré une moins bonne sensibilité vont être essentiels à l'identification de k_{yy} et k_{zz} .

Pour les deux autres paramètres k_{xx} et c , les capteurs C_1 et C_4 sont là encore les plus sensibles et ne semblent pas corrélés. On note par ailleurs la très faible sensibilité des deux autres capteurs C_2 et C_3 , notamment pour la conductivité k_{xx} .

4.3. RESULTATS DE L'IDENTIFICATION

4.3.1. Estimation obtenue pour deux configurations

On procède à l'estimation des paramètres en utilisant 3 modèles numériques (modèle complet, modèles réduits à 500 et à 200 modes), pour les deux configurations présentées précédemment. Les résultats sont présentés sous forme d'erreurs relatives ε_{β} pour chaque paramètre identifié (éq. (14)), de résidu des températures reconstruites $\hat{\sigma}$ (éq. (15)), et des temps calculs t_{CPU} (tableau 1).

$$\beta_i = \{k_{xx}, k_{yy}, k_{zz}, c\}, \quad \varepsilon_{\beta_i} = \frac{|\hat{\beta}_i - \beta_i^{exact}|}{\beta_i^{exact}} \quad (14)$$

$$\hat{\sigma} = \sqrt{\frac{J(\boldsymbol{\beta})}{N_{mes} N_{pts}}} \quad (15)$$

	Identification de $\bar{\mathbf{k}}$ ($c = 30000 \text{ J.m}^{-3}.\text{K}^{-1}$)					Identification de $\bar{\mathbf{k}}$ et c					
	k_{xx}	k_{yy}	k_{zz}	$\hat{\sigma}$ (°C)	t_{CPU} (s)	k_{xx}	k_{yy}	k_{zz}	c	$\hat{\sigma}$ (°C)	t_{CPU} (s)
Valeurs exactes	0,03	0,03	0,03	-	-	0,03	0,03	0,03	30000	-	-
ε_{β_i} complet	0,6%	0,6%	0,1%	0,10	6018	0,7%	0,6%	0,6%	0,2%	0,10	10135
ε_{β_i} 500 modes	3,8%	1,3%	1,1%	0,15	40	2,2%	1,2%	0,9%	6,9%	0,13	65,2
ε_{β_i} 200 modes	11,4%	1,9%	0,0%	0,20	5,1	0,4%	2,9%	1,5%	10,2%	0,16	8
Valeurs exactes	0,04	0,03	0,02	-	-	0,04	0,03	0,02	30000	-	-
ε_{β_i} complet	0,3%	0,4%	0,3%	0,10	6073	0,1%	0,3%	0,2%	0,2%	0,10	10162
ε_{β_i} 500 modes	4,3%	0,0%	0,8%	0,15	45	9,2%	0,4%	1,7%	7,1%	0,13	67
ε_{β_i} 200 modes	0,8%	1,9%	2,2%	0,20	5	6,5%	0,5%	3,2%	11,0%	0,16	8
$\bar{\varepsilon}_{\beta_i}$ 200 modes	1,0%	1,7%	2%	-	-	7,5%	1,0%	2,5%	11,7%	-	-
$\bar{\sigma}_{\beta_i}$ 200 modes	1,0%	0,2%	0,3%	-	-	1,0%	0,2%	0,3%	0,2%	-	-

Tableau 1 : Identification avec bruit de mesure de $0,1^\circ\text{C}$

Ces résultats permettent tout d'abord de valider le principe de la caractérisation développée ici (par modélisation numérique d'une tri-sonde), puisque l'utilisation du modèle complet permet effectivement d'obtenir des valeurs très précises des paramètres thermiques recherchés. En ce qui concerne l'utilisation des modèles réduits, on voit qu'ils permettent d'obtenir des résultats approchés de façon bien plus rapide qu'avec un modèle complet. En contrepartie des erreurs plus importantes apparaissent. On note ainsi l'évolution décroissante de la valeur du résidu $\hat{\sigma}$ en fonction de l'ordre du modèle, alors que les erreurs propres à chaque paramètre évoluent d'une manière plus désordonnée. Celles-ci proviennent à la fois d'une sensibilité limitée pour le coefficient k_{xx} (Fig. 4), et de l'erreur du modèle réduit aux premiers instants (Fig. 3), qui impacte surtout le coefficient c . Ces erreurs sont cependant limitées.

4.3.2. Analyse statistique pour un cas

Afin caractériser la dispersion des résultats liée à l'existence du bruit de mesure, on procède à un grand nombre d'identifications ($\bar{N} = 300$ essais) afin de calculer l'erreur moyenne obtenue $\bar{\varepsilon}_{\beta}$ (éq.

(16)), ainsi que l'écart type exprimé en pourcentage de la valeur exacte $\bar{\sigma}_{\beta_i}$ de chaque paramètre β_i (éq. (17)), dans le cas où l'on utilise un modèle réduit d'ordre 200 (tableau 1).

$$\bar{\varepsilon}_{\beta_i} = \frac{|\bar{\hat{\beta}}_i - \beta_i^{exact}|}{\beta_i^{exact}}, \quad \text{avec} \quad \bar{\hat{\beta}}_i = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^{\bar{N}} \hat{\beta}_{i,k} \quad (16)$$

$$\bar{\sigma}_{\beta_i} = \frac{1}{\beta_i^{exact}} \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{k=1}^{\bar{N}} (\hat{\beta}_{i,k} - \bar{\hat{\beta}}_i)^2} \quad (17)$$

On note que la dispersion des résultats est faible, et n'explique pas les écarts d'estimation que l'on remarque pour certains paramètres (k_{xx} et c). Ceux-ci sont bien liés à l'utilisation des modèles réduits et d'une sensibilité limitée.

5. CONCLUSION

Cette étude a permis de montrer qu'une procédure inverse basée sur l'utilisation d'un modèle numérique réduit peut permettre d'obtenir rapidement des caractéristiques thermiques d'un isolant placé dans une paroi d'un bâtiment.

Ces tous premiers résultats sont prometteurs et ouvrent à plusieurs perspectives. Les résultats de ce travail ont montré que les erreurs de caractérisation sont liées à la combinaison de l'erreur du modèle réduit avec des sensibilités limitées de capteurs. Ainsi d'un point de vue numérique, un axe de travail est l'analyse de l'influence du choix des champs de référence utilisés par la méthode de l'Amalgame sur la précision du modèle réduit. En parallèle, une réflexion sur la conception du système de caractérisation doit être effectuée, qui porte à la fois sur le choix de la géométrie utilisée (forme et nombre de sondes), mais également sur le nombre et le placement des capteurs de température positionnés sur les sondes. A ce niveau une étude d'optimisation de placement de capteurs peut être développée, en s'appuyant là encore sur l'utilisation de modèles réduits.

6. BIBLIOGRAPHIE

- Marmoret, Laurent, et Hussein Hafudh Humaish. 2017. « Limit of validity of the log-linear model for determining thermal properties of light insulation materials with cylindrical hot probe ». *International Journal of Thermal Sciences*, 117 : 251-259.
- Thomas, Matthieu, Didier Delaunay, Yvon Jarny, Philippe Guillemet, Nicolas Boyard, et Bruno Estebe. 2007. « Caractérisation thermique de matériaux composites orthotropes par méthode inverse ». *Congrès Français de Thermique SFT, Ile des Embiez*.
- Quéméner, Olivier, Alain Neveu, et Etienne Videcoq. 2007. « A specific reduction method for the branch modal formulation : Application to a highly non-linear configuration ». *International Journal of Thermal Sciences* 46 : 890 – 907.
- Lehoucq, Richard Bruno, Dany Sorenson, et Chao Yang. 1988. « Arpack : User's guide solution for large scale eigenvalue problem with implicit restarted Arnoldi method ». *Society for Industrial and Applied Mathematics*, Philadelphia PA.

Modélisation hygrothermique d'une rénovation prenant en compte le microclimat urbain.

Étude de cas du centre-ville médiéval de Cahors (France)

Sophie Claude, Stéphane Ginestet*, Marion Bonhomme, Gilles Escadeillas

LMDC, Université de Toulouse, INSA, UPS, France

***sgineste@insa-toulouse.fr**

RESUME. Améliorer l'efficacité énergétique des bâtiments est devenu, aujourd'hui, une nécessité imposée par l'urgence climatique. C'est notamment le cas pour les nombreux logements anciens représentant une grande partie du parc immobilier français. Dans les centres villes, comme celui de Cahors, en France, les vieilles demeures médiévales sont considérées comme un patrimoine historique et doivent être rénovées de l'intérieur pour préserver la valeur architecturale de la façade extérieure.

De telles modifications peuvent entraîner des dommages dus à une modification du comportement hygrothermique des parois médiévales, constituées de matériaux parfois peu compatibles avec les méthodes classiques de rénovation. La simulation peut permettre d'évaluer les risques de condensation à l'intérieur de ces parois. Cependant, la plupart des modèles supposent un bâtiment isolé ne prenant pas en compte les bâtiments environnants. Dans le cas de Cahors, les bâtiments sont situés dans un environnement urbain très dense, de type médiéval où la morphologie urbaine ne peut être négligée. Dans cette étude, la modification par l'environnement urbain des conditions aux limites extérieures (principalement les coefficients de convection (de chaleur et de masse) et la pluie battante) ont été étudiées.

Après une analyse en composantes principales permettant de montrer la représentativité de l'îlot choisi pour l'étude, la simulation est mise en œuvre en couplant le modèle hygrothermique Delphin au modèle de simulation du bâtiment EnergyPlus et à l'outil ArcGIS (Geographic Information Systems). L'objectif est de prédire les conditions aux limites extérieures dans la géométrie réelle de la zone urbaine dense ainsi que le transfert hygrothermique dans les enveloppes du bâtiment. Un système isolant à base de matériaux bio-sourcés est étudié. Les résultats de la simulation indiquent une corrélation quantitative entre les caractéristiques de la morphologie urbaine et la performance hygrothermique des parois rénovées, certaines configurations accentuant les risques de condensation.

MOTS-CLÉS: couplage Delphin/EnergyPlus, isolation intérieure, performance hygrothermique, microclimat urbain

ABSTRACT: Improving buildings energy efficiency has become today, a necessity imposed by the climate emergency. This is particularly the case for the many old homes representing a large part of the French housing stock. In the city centers, such as Cahors, France, the old medieval houses are considered a historical heritage and must be refurbished from the inside to preserve the architectural value of the exterior facade.

Such modifications may cause damage due to a change in the hygrothermal behavior of the medieval walls, made of materials sometimes not compatible with conventional methods of renovation. Simulation can make it possible to evaluate the risks of condensation inside these walls. However, most models assume an isolated building that does not take into account the surrounding buildings. In the case of Cahors, the buildings are located in a very dense urban environment, of medieval type where the urban morphology cannot be neglected. In this study, the modification by the urban environment of external boundary conditions (mainly convection coefficients (heat and mass) and driving rain) were studied.

After a principal component analysis to show the representativeness of the district chosen for the study, the simulation is implemented by coupling the Delphin hygrothermal model with the EnergyPlus simulation model and the ArcGIS tool (Geographic Information Systems). The objective is to predict the external boundary conditions in the actual geometry of the dense urban area as well as the hygrothermal transfer in the building envelopes. An insulating system based on bio-sourced materials is studied.

The results of the simulation indicate a quantitative correlation between the characteristics of the urban morphology and the hygrothermal performance of the renovated walls, some configurations accentuating condensation risks.

KEYWORDS: Delphin / EnergyPlus coupling, indoor insulation, hygrothermal performance, urban microclimate

1. INTRODUCTION

L'augmentation des coûts de l'accès à l'énergie rend urgente la rénovation thermique de notre patrimoine bâti d'un point de vue aussi bien sociétal qu'écologique. La Ville de Cahors a donc décidé de mettre en place la démarche Enerpat (contraction d'Energie et Patrimoine) qui vise à mettre en valeur les qualités architecturales du bâti en augmentant son efficacité énergétique. Afin de sauvegarder la valeur patrimoniale des façades extérieures, une isolation par l'intérieur est souvent préférée, mais celle-ci peut entraîner une rupture de l'équilibre hygrothermique de la paroi et entraîner des dommages. Pour faciliter les choix de systèmes isolants adaptés, des modèles prédictifs pour évaluer le risque d'accumulation d'humidité au sein de la paroi doivent être mis en place. Or, la fiabilité de ces modèles est encore questionnée, notamment car le bâti ancien possède de nombreuses spécificités qui complexifient les simulations (Tasca Guernouti 2011). A l'échelle du matériau, les matériaux anciens et certains isolants comme les matériaux bio-sourcés présentent une sensibilité à l'humidité qui oblige à la prise en compte des transferts d'humidité en plus des transferts de chaleur. A l'échelle urbaine, la densité urbaine très élevée, spécifiques aux centres anciens médiévaux (Salat 2011) doit être également prise en compte. En effet la morphologie urbaine génère l'apparition d'un micro-climat et modifie les conditions aux limites extérieures atteignant la paroi (Matzarakis and Mayer 1988). Les radiations solaires atteignant la paroi vont être modifiées par la présence de masques environnants (réduction du rayonnement direct et diffus, inter-réflexions), de même que le rayonnement en provenance de la voûte céleste. Le profil de vent à sein du milieu urbain est également modifié, ce qui modifie à son tour la quantité d'eau atteignant la paroi lors d'évènements pluvieux.

L'objectif de ce travail a donc été de mettre en place une méthodologie adaptée aux centres anciens en tenant compte de leurs spécificités (morphologie urbaine dense, modifications des conditions aux limites par les masques environnants, sensibilité à l'humidité du bâti ancien) pour définir le risque d'accumulation d'humidité au sein de la paroi après la mise en place d'une isolation par l'intérieur. En parallèle de ce travail numérique, une étude expérimentale, qui n'est pas présentée ici, a été menée.

La méthodologie adoptée est présentée Figure 1 :

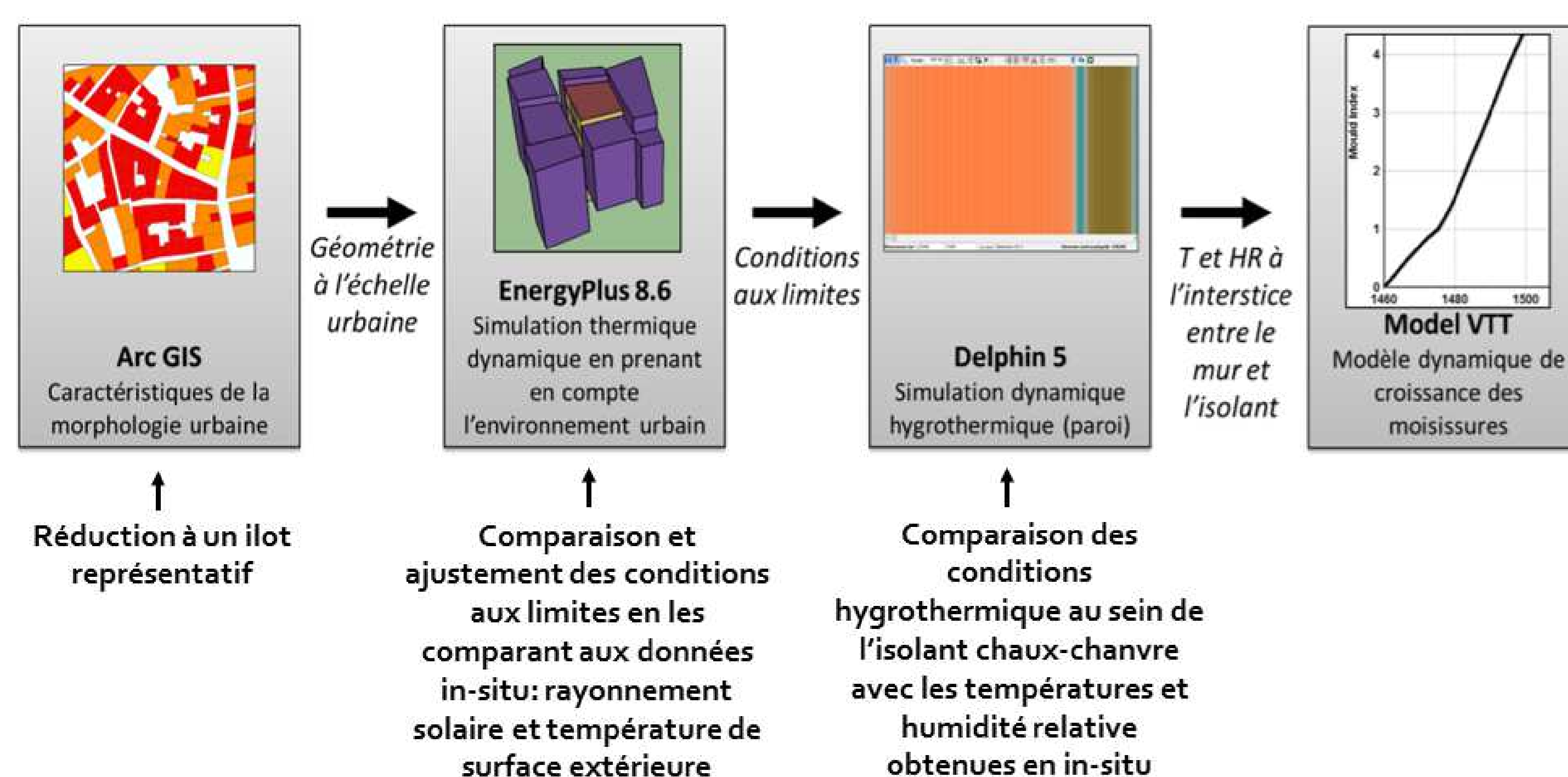


Figure 1 : Méthodologie adoptée pour l'évaluation du risque de développement de pathologie des parois

Le couplage entre ArcGIS et EnergyPlus a été réalisé grâce un script Python et celui entre EnergyPlus, Delphin et le modèle VTT grâce à une routine écrite sous Matlab.

Deux typologies constructives présentes dans le centre ancien de Cahors ont été étudiées, une maçonnerie de brique épaisse et une structure pan de bois avec un remplissage brique, en étudiant pour chacune la performance hygrothermique d'un isolant conventionnel et d'un

isolant bio-sourcé. Afin de pouvoir travailler en comparatif, le coefficient de transmission thermique est identique pour les deux systèmes isolants.

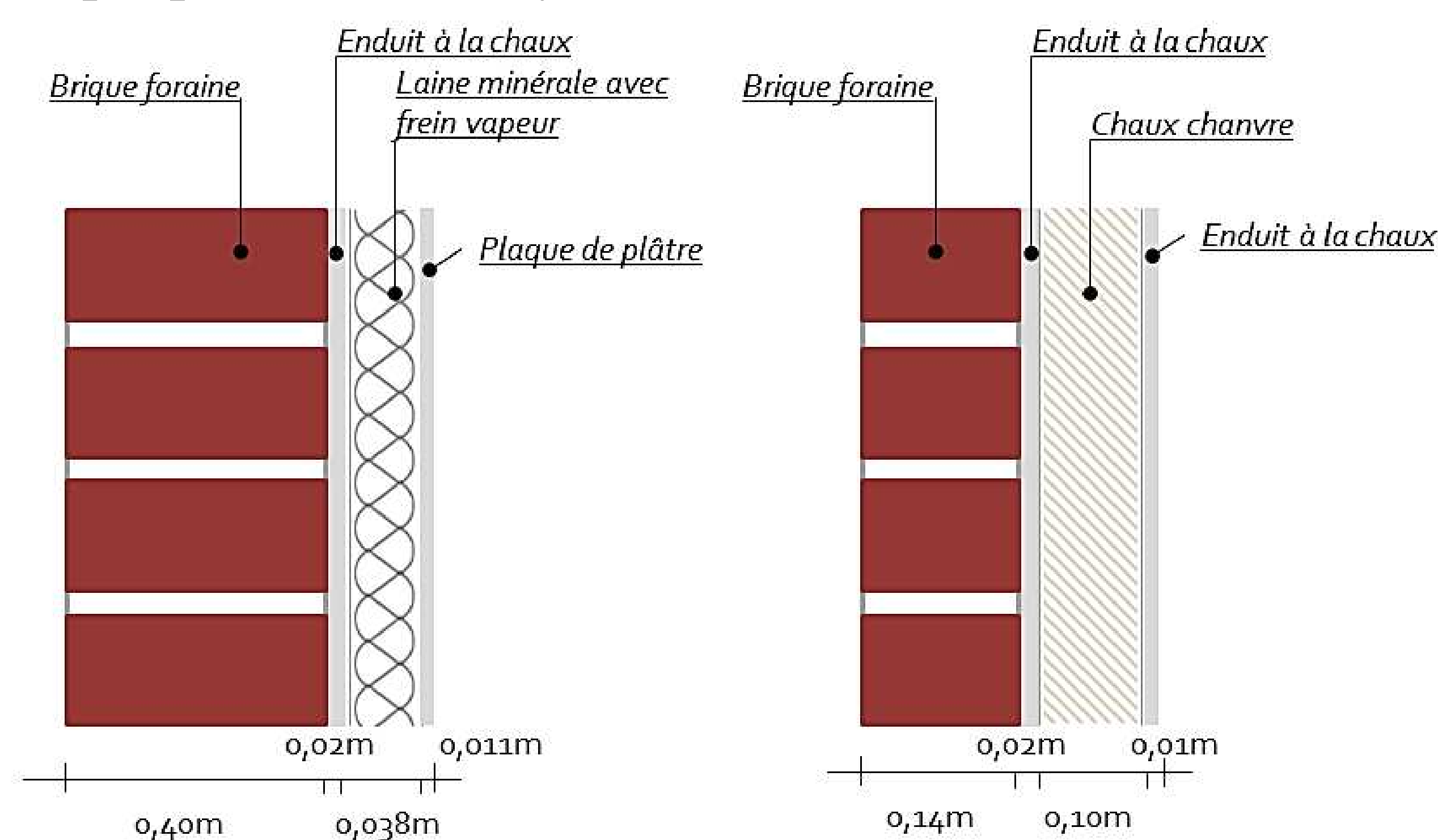


Figure 2 : Deux des quatre configurations de parois testées

Les paramètres des matériaux sont en partie issus d'une caractérisation en laboratoire réalisée en parallèle de cette étude. Les détails de l'étude expérimentale sont donnés dans (Claude 2018).

Tableau 1 : Propriétés thermiques et hygriques des matériaux utilisés dans le logiciel DELPHIN 5

	Mesuré au laboratoire	Base de données matériaux du logiciel DELPHIN 5			
	Brique 16ième	Chaux chanvre	Laine de roche [1]/papier Kraft	Plaque de plâtre	Enduit chaux
Masse volumique (kg/m ³)	1616	440	37/120	850	1650
Conductivité thermique sèche (W/(K.m))	0.49	0.07	0.04/0.42	0.20	0.67
Capacité thermique (J/(kgK))	800	1000	840/1500	850	840
Coefficient de résistance à la diffusion de vapeur (-)	9	6.5	1/3000	10	8.9
Coefficient de capillarité (kg.m ⁻² .s ^{-0.5})	0.28	0.196	0/1.10 ⁻⁵	0.27	0.22

2. ETUDE DE LA MORPHOLOGIE URBAINE ET REDUCTION A UN ILOT REPRESENTATIF

Les centres médiévaux européens se distinguent des autres ensembles urbains dans l'organisation des formes bâties. Afin d'étudier les spécificités de la morphologie urbaine du centre de Cahors, la géométrie urbaine est obtenue à partir des données issues de Systèmes d'Informations Géographiques (ArcGIS). Le logiciel ArcGIS permet également de mettre en avant certaines caractéristiques grâce aux calculs d'indicateurs morphologiques déterminés à l'échelle du bâtiment (contiguïté, compacité, ...) ou à l'échelle de la paroi (Facteur de Vue du Ciel, orientation, ...).

De plus, une Analyse en Composantes Principales a mis en avant l'homogénéité des indicateurs dans le centre urbain, aucune typologie de bâti particulière ne se démarque. Il est donc possible, de réduire l'étude numérique à un seul îlot représentatif, afin de diminuer les temps de calculs

(Figure 3). Au préalable, il a été vérifié que la distribution des valeurs des indicateurs morphologiques était similaire pour l'îlot choisi et pour le centre ancien dans sa globalité. Le travail sur un îlot représentatif permet de passer d'une étude numérique contenant 1400 bâtiments et plus de 30000 parois à seulement 44 bâtiments et 800 parois.



Figure 3: Réduction du centre ancien à un îlot représentatif

3. RECUPERATION DE CONDITIONS AUX LIMITES EXTERIEURES ADAPTEES A LA MORPHOLOGIE URBAINE ET VALIDATION AVEC DES DONNEES IN-SITU

EnergyPlus 8.6 possède un modèle d'échange radiatif (CLO, GLO et inter-réflexions) relativement développé prenant en compte les bâtiments adjacents et une possibilité de simuler finement chaque bâtiment avec une rapidité de calcul pour chaque simulation, ce qui correspond aux besoins de notre étude (U.S. Department of Energy 2016).

Comme présenté précédemment, la morphologie du milieu urbain modifie les conditions aux limites extérieures des modèles thermiques et hygrothermiques, d'où la nécessité de détailler la géométrie des bâtiments adjacents pour obtenir des résultats cohérents.

Pour chaque bâtiment de l'îlot, un fichier idf est généré prenant en compte les masques environnants dans un périmètre de 40m (Figure 3), les coordonnées proviennent de la base de données SIG. Les conditions aux limites extérieures sont obtenues en sortie des simulations.

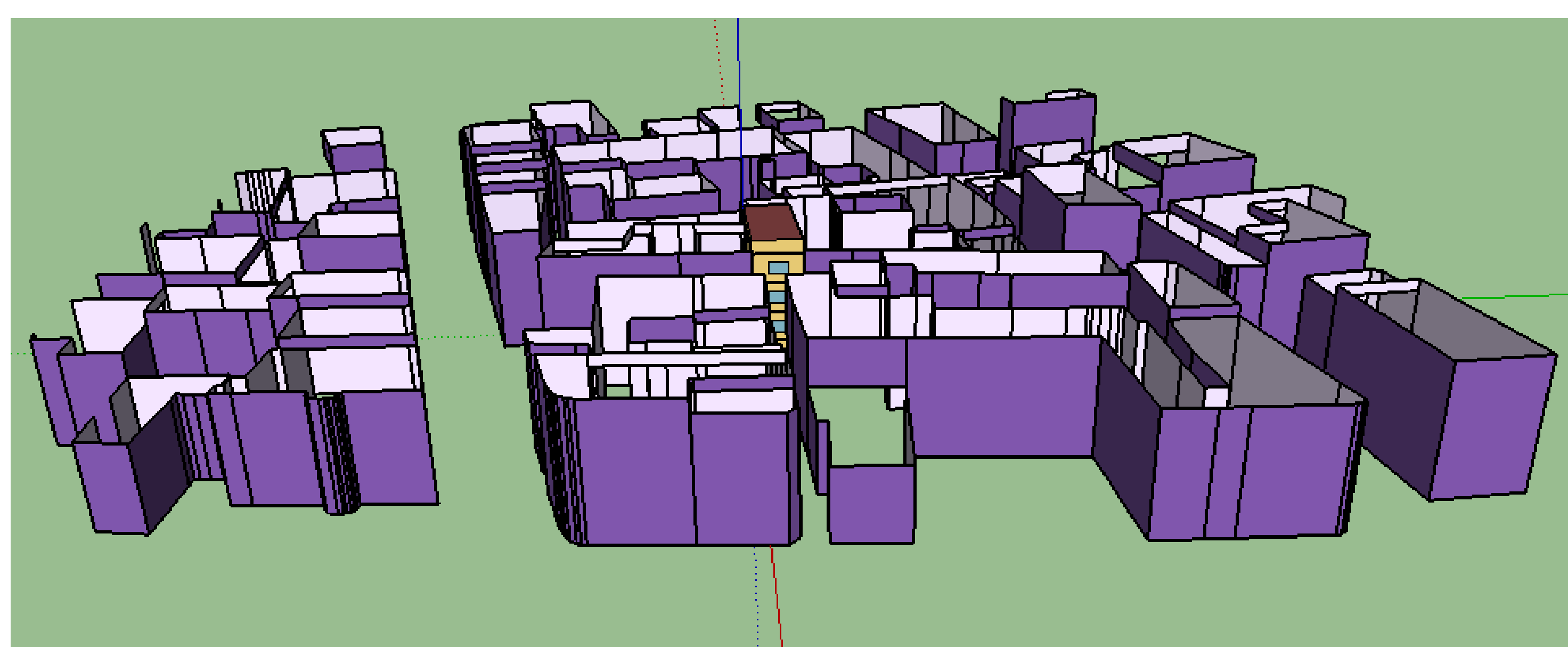


Figure 4: Bâtiment étudié entouré des masques environnants dans EnergyPlus (interface SketchUp)

La fiabilité des conditions aux limites extérieures a été validée grâce à la comparaison avec des mesures de rayonnements solaires obtenues en in-situ.

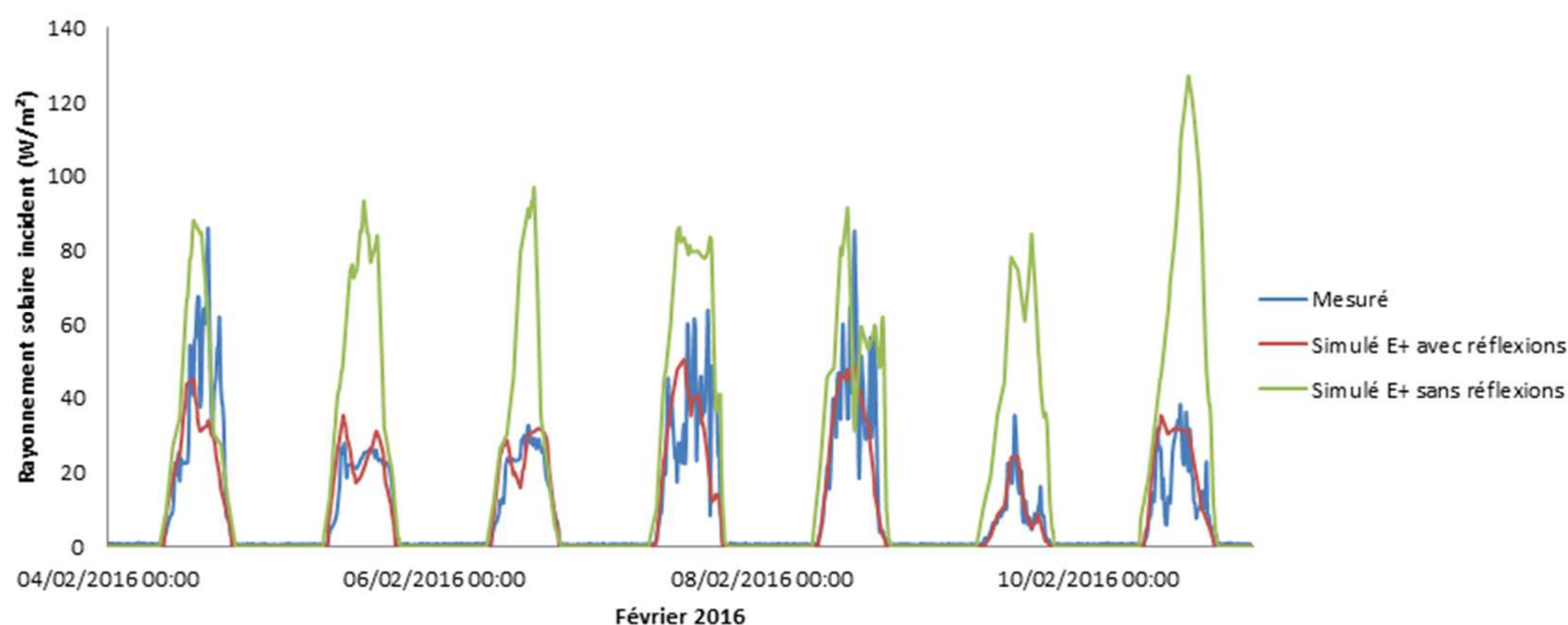


Figure 5: Comparaison du rayonnement solaire arrivant sur la paroi extérieure (mesuré et simulé avec EnergyPlus)

La Figure 5 présente la comparaison entre les résultats issus de la simulation avec EnergyPlus et les données expérimentales. Pour la même paroi, deux cas de simulations sont analysés : avec et sans réflexions. La simulation avec réflexion présente une meilleure corrélation avec les valeurs expérimentales. Lorsque l'option « avec réflexions » permet une prise en compte plus précise des masques environnants, aussi bien sur la réflexion du rayonnement direct et diffus sur le sol environnant que dans les inter-réflexions entre les bâtiments.

4. SIMULATION HYGROTHERMIQUE ET ANALYSE DU RISQUE DE DEVELOPPEMENT DE PATHOLOGIE

Les simulations hygrothermiques des différentes parois de l'îlot ont été réalisées grâce au logiciel Delphin 5 (Nicolai, Grunewald, and Zhang 2007). Il a été démontré que le logiciel EnergyPlus présentait des résultats recevables pour représenter les radiations reçues par la paroi lorsque celle-ci est intégrée à son environnement urbain. Toutes les influences thermiques extérieures sont donc réunies en une température d'air de surface équivalente obtenue en sortie des simulations d'EnergyPlus. Cette température équivalente est par la suite appliquée en conditions de Dirichlet comme proposé par (Hagentoft 2001) et utilisé dans la littérature par (Qin et al. 2011; Steeman et al. 2010).

Afin d'observer le risque d'apparition de pathologies, cinq années de simulations sont effectuées et l'humidité relative et la température obtenues à l'interface sont traitées grâce au modèle VTT (Viitanen et al. 2010) qui permet d'évaluer le risque de croissances de moisissures. L'index M représente le risque de croissance de moisissures en prenant en compte de façon dynamique la température et l'humidité. D'après (Viitanen et al. 2015), on considère que pour une interface, $M > 2$ correspond à une paroi à surveiller et $M > 3$ à des conditions de durabilité non acceptables.

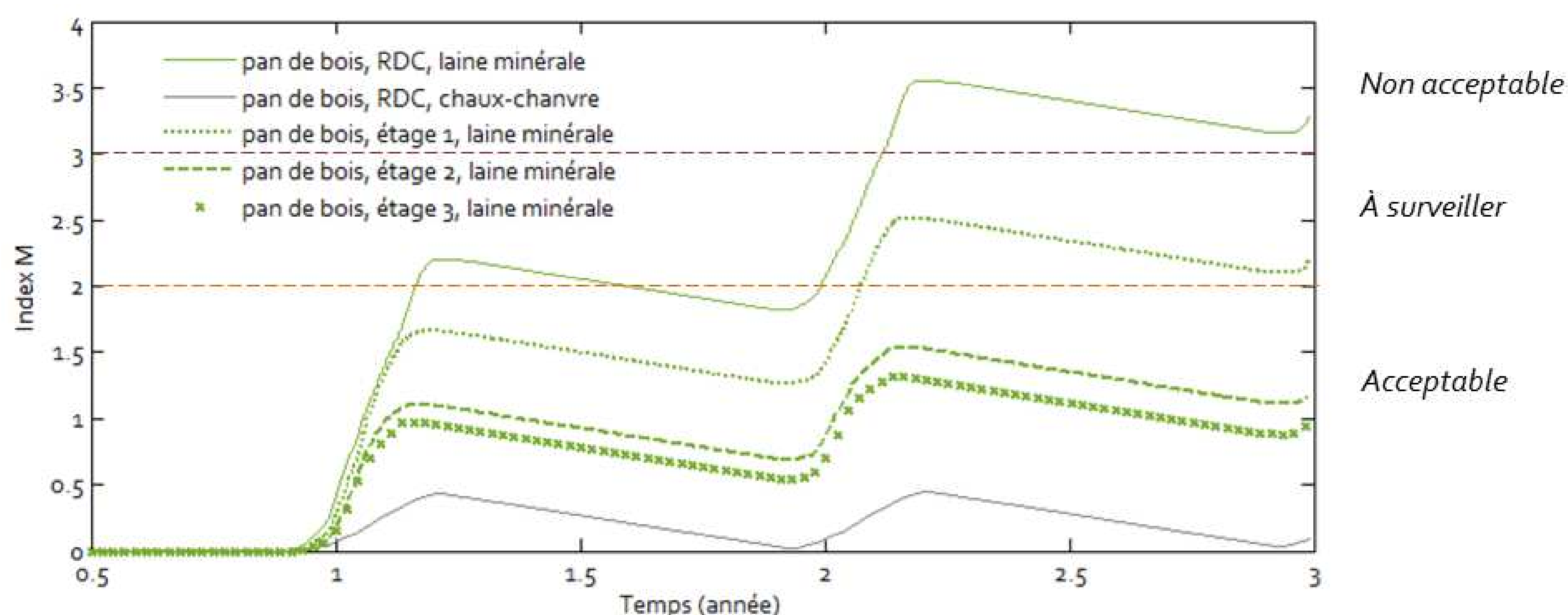


Figure 6 : Croissance de moisissures à l'interface entre l'isolant et la paroi d'origine, orientation Sud

Les résultats obtenus (Figure 6), présentent la croissance de moisissures au sein de parois orientées Sud d'un même bâtiment en pan de bois (du rez-de-chaussée au 3^{ème} étage) pour les deux types d'isolations. La première observation est que l'isolation avec de la laine minérale présente un risque de développement de moisissures beaucoup plus important que celle avec le mélange chaux-chanvre. La deuxième observation concerne l'évolution du risque en fonction des étages, en effet, l'accès au rayonnement solaire plus important permet pour les parois Sud de diminuer le risque de pathologie.

Le traitement des données de toutes les parois de l'ilot, notamment grâce à une Analyse en Composantes Principales nous a permis de mieux comprendre l'influence de la morphologie urbaine sur la durabilité de la paroi. Pour chaque paroi, le risque maximal de croissance moisissures au cours des trois années (index M_{max}) est relevé. Les risques selon l'orientation sont présentés Figure 7.

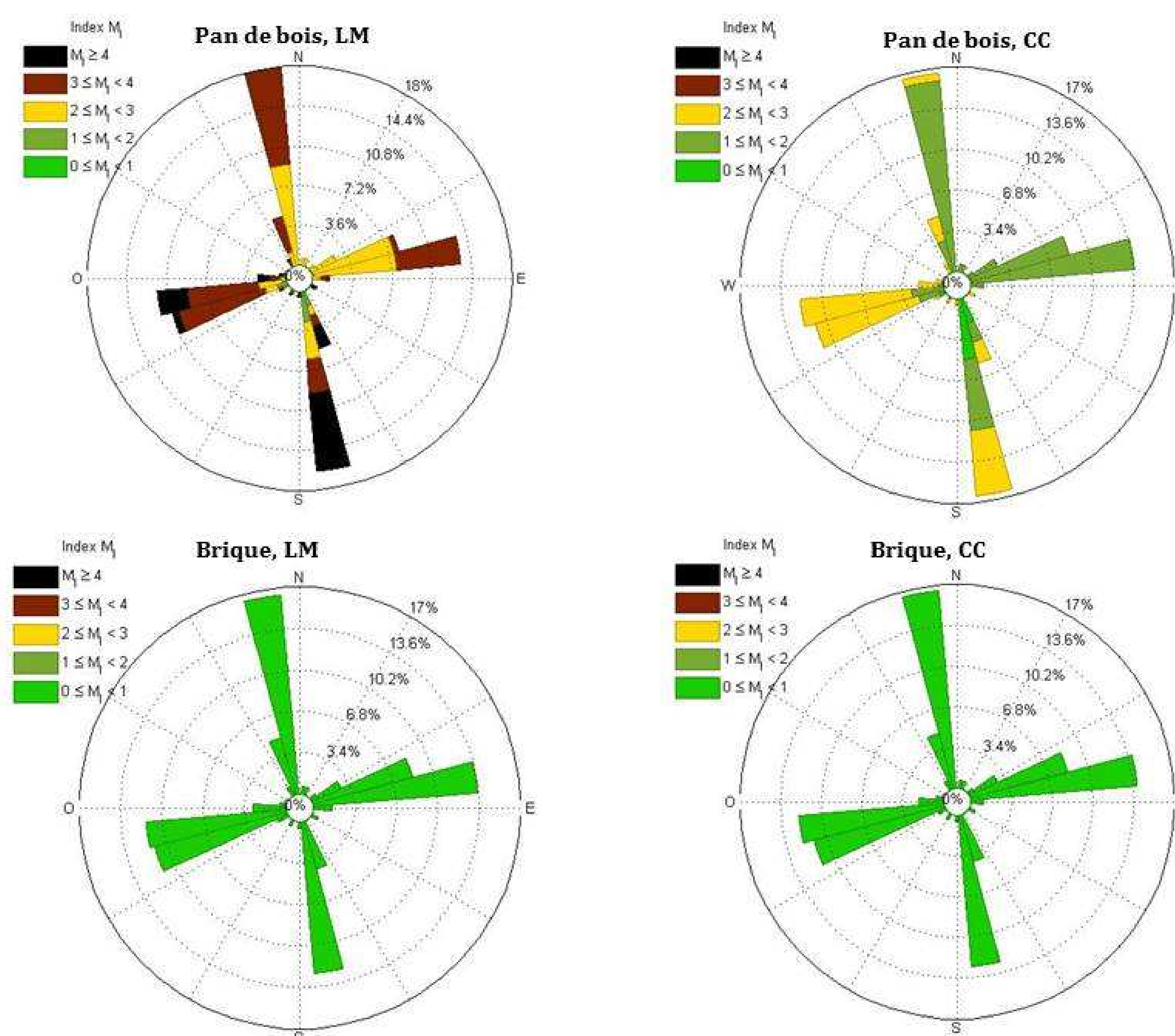


Figure 7: Expression de l'index M à l'interface en surfaces cumulées selon l'orientation

Le risque est représenté par un code couleur, avec en vert, les parois dont le développement de moisissures est faible voire inexistant et ne présentant donc pas de risque pour la durabilité, en orange, les parois à surveiller et en rouge les parois non acceptables.

De là, différentes observations ont été réalisées :

- Les parois pan de bois sont beaucoup plus fragiles que les parois brique et doivent être rénovées avec plus d'attention
- Pour les deux typologies, la laine minérale entraîne des humidités relatives plus élevées à l'interface.
- Les parois Sud sont particulièrement sensibles aux effets de masque concernant le rayonnement solaire. Ce sont elles qui auront des réponses hygrothermiques les plus différentes selon l'étage. Les derniers étages seront moins sensibles, alors que les premiers seront particulièrement fragiles.
- Les parois Ouest sont également fragiles, cette fragilité est principalement due à la pluie battante plus importante sur cette orientation
- La fragilité des parois Nord provient principalement du potentiel de condensation, à l'inverse des parois Sud, les derniers étages peuvent être également sensibles à cause du rayonnement plus important de la voûte céleste.

Un dernier travail de cartographie des risques pour chaque paroi de l'îlot (Figure 8) a été réalisé grâce à l'outil SIG, permettant de fournir un livrable clair et très visuel à la ville de Cahors en utilisant un outil de planification urbaine déjà fréquemment utilisé par les collectivités.

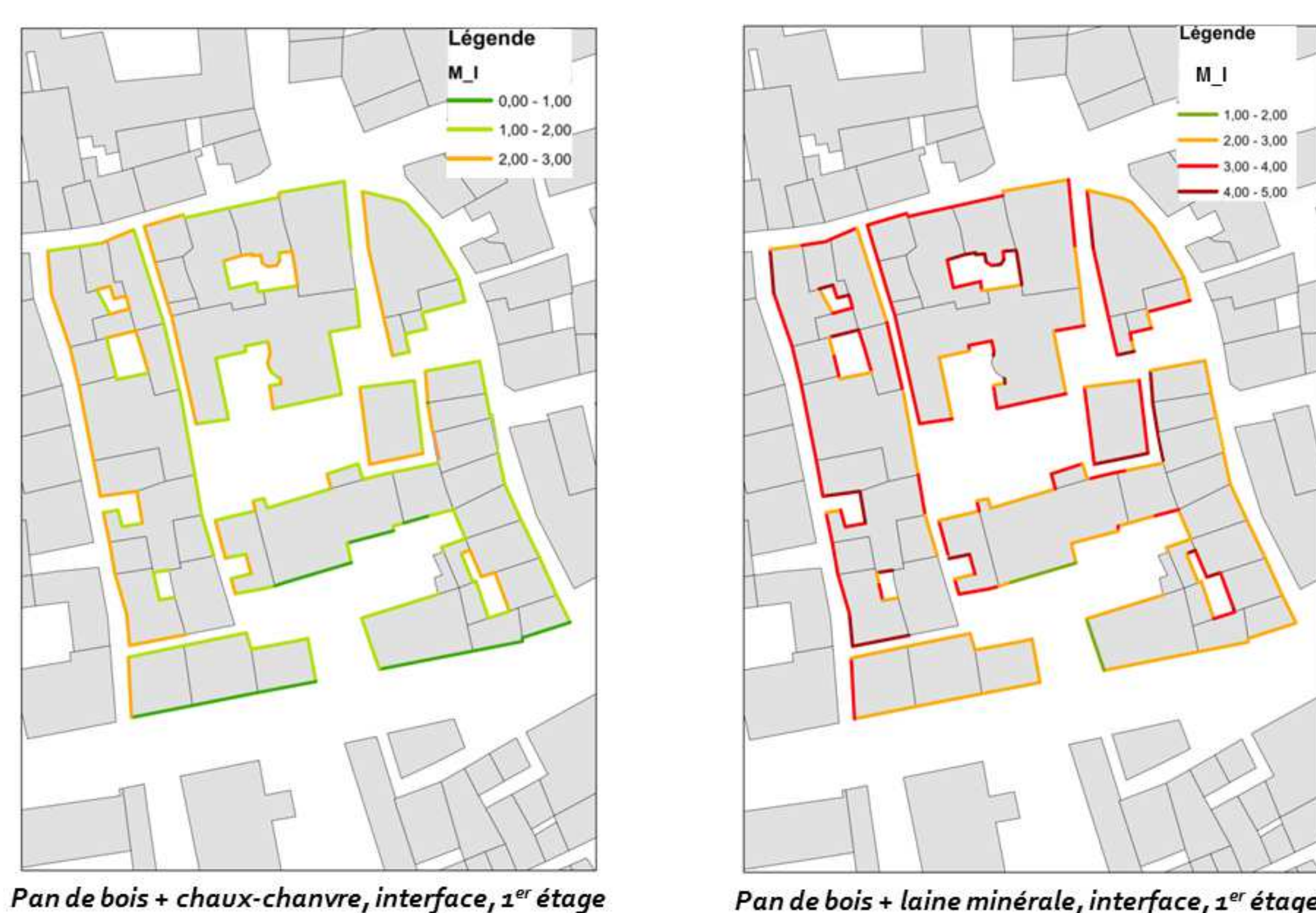


Figure 8: Cartographie des risques à l'interface pour la typologie pan de bois

5. CONCLUSION

Le centre de Cahors possède un bâti particulièrement dense, il serait donc désapproprié de traiter les parois comme appartenant à un environnement sans masque environnant.

La comparaison entre le logiciel EnergyPlus avec l'algorithme « avec réflexions » et les mesures expérimentales a montré la justesse du modèle concernant les radiations solaires atteignant la façade. Ce dernier peut donc être utilisé pour offrir des conditions aux limites représentatives au niveau radiatif.

Cette étude a montré que les conditions aux limites extérieures doivent être soigneusement choisies car elles modifient le comportement hygrothermique de l'interface entre le mur et l'isolant, particulièrement dans le cas de paroi fine telle qu'une typologie pan de bois.

Une différence nette entre les deux matériaux isolants se dessine donc pour la typologie pan de bois. Le fort potentiel hygroscopique du chaux-chanvre permet de stocker une quantité importante d'humidité sans que cette humidité ne transite vers l'interface, au contraire de la laine minérale. Dans une majorité des cas, pour la typologie pan de bois, le risque de développement de pathologie est supérieur à la limite acceptable pour une isolation avec de la laine minérale, ces parois doivent donc être rénovées avec une attention particulière.

6. REMERCIEMENTS

Ce travail est soutenu financièrement dans le cadre du projet européen ENERPAT, Interreg SUDOE SOE1/P3/F0362 (Cocréation de solutions territoriales ENergétiquement efficace d'Ecorénovation de l'habitat Résidentiel PATrimonial des centres anciens du SUDOE).

Trois villes européennes (Cahors-France, Vitoria-Espagne, Porto-Portugal) travaillent actuellement sur la rénovation de trois bâtiments de démonstration différents dans leurs centres anciens.

7. BIBLIOGRAPHIE

- Claude, Sophie. 2018. "Etude Expérimentale et Numérique de Solutions Basées Sur Les Éco-Matériaux Pour La Rénovation Thermique Du Patrimoine Bâti Urbain." Université de Toulouse.
- Hagentoft, Carl-Eric. 2001. *Introduction to Building Physics*. Lund: Studentlitteratur.
- Matzarakis, Andreas, and Helmut Mayer. 1988. "Dependence of Urban Climate on Urban Morphology." *Screen*: 277–82.
- Nicolai, Andreas, John Grunewald, and Jianshun Jensen Zhang. 2007. "Recent Improvements in HAM Simulation Tools: Delphin 5 / CHAMPS-BES." *Conference Proceedings of 12th Symposium of Building Physics (January 2016)*: 866–76.
- Qin, Menghao, George Walton, Rafik Belarbi, and Francis Allard. 2011. "Simulation of Whole Building Coupled Hygrothermal-Airflow Transfer in Different Climates." *Energy Conversion and Management* 52(2): 1470–78.
- Salat, Serge. 2011. "City and Forms, On Sustainable Urbanism."
- Steeman, M. et al. 2010. "On Coupling 1D Non-Isothermal Heat and Mass Transfer in Porous Materials with a Multizone Building Energy Simulation Model." *Building and Environment* 45(4): 865–77.
- Tasca Guernouti, Sihem (CETE Ouest). 2011. "Modélisation Du Comportement Thermique Du Bâtiment Ancien Avant 1948."
- U.S. Department of Energy. 2016. "Engineering Reference, EnergyPlus™ Version 8.6 Documentation." (c): 1723.
- Viitanen, H et al. 2015. "Mold Risk Classification Based on Comparative Evaluation of Two Established Growth Models." *Energy Procedia* 78: 1425–30.
- Viitanen, H. et al. 2010. "Moisture and Bio-Deterioration Risk of Building Materials and Structures." *Journal of Building Physics* 33(3): 201–24.

Impact de la variabilité naturelle des conditions météorologiques sur l'estimation des paramètres : application aux modèles RC

Sarah Juricic*¹, Jeanne Goffart¹, Simon Rouchier¹, Aurélie Fouquier², Gilles Fraisse¹

¹ Univ. Grenoble Alpes, Univ. Savoie Mont Blanc, CNRS, LOCIE, 73000 Chambéry,

² Univ. Grenoble Alpes, CEA, LITEN, DTS, INES, F-38000 Grenoble, France

*sarah.juricic@univ-smb.fr

RESUME. Le diagnostic thermique d'un bâtiment existant consiste entre autres en l'estimation des propriétés thermiques de son enveloppe. Dans ce but, la calibration d'un modèle adéquat sur des mesures in situ permet d'estimer des paramètres qu'on identifie aux propriétés thermiques cherchées. Or l'estimation des paramètres est fortement dépendante des conditions aux limites auxquelles est soumis le bâtiment étudié. Ce problème d'identifiabilité majeur empêche l'interprétation physique des valeurs estimées des paramètres.

Cet article détaille une méthodologie pour quantifier l'impact de la variabilité naturelle des conditions météorologiques sur l'estimation des paramètres d'un modèle, grâce notamment à une méthode de génération stochastique de données météorologiques qui permet de calculer des indices de sensibilité de Sobol. L'application à un modèle 2R2C montre que la température extérieure est la variable météorologique majoritairement influente sur l'estimation de la résistance thermique globale et qu'elle provoque une surestimation systématique pour des températures moyennes froides.

MOTS-CLÉS : identifiabilité, Analyse de sensibilité, calibrage, modèles RC

ABSTRACT. Thermal diagnosis of an existing building requires among other things estimating the thermal properties of the building's envelope. To do so, the calibration of an adequate model from in situ measurements delivers estimation of the model's parameters which may be identified to the sought thermal properties. However, parameter estimation might be highly influenced by the weather boundary conditions which the building is subjected to. This major identifiability issue prevents any physical interpretation of the parameters estimated values.

This paper presents a methodology to quantify the influence of natural weather variability on parameter estimation of a model, notably through a stochastic weather data generation method that allows Sobol sensitivity indices calculation. Application of the methodology on a 2R2C lumped model shows that the most influencing weather variable on the overall thermal resistance R_{eq} is outdoor temperature and that calibration from overall colder data sets tend to significantly over-estimate R_{eq} .

KEYWORDS : identifiability, sensitivity analysis, calibration, lumped models

1. INTRODUCTION

Dans le but d'améliorer les performances thermiques du parc existant, proposer des scénarii efficaces de rénovation thermique, basé par exemple sur un calcul de retour sur investissement, est nécessaire. Cela demande de déterminer avec précision les performances réelles de l'enveloppe. Les méthodes existantes comme le co-heating, QUB et ISABELE (Sonderregger 1978; Mangematin et al. 2012; Schetelat et Bouchié 2014) sont relativement coûteuses en instrumentation et intrusives vis à vis de l'occupation donc non satisfaisantes pour une application en bâtiment occupé. En réponse à ces

contraintes, le projet ANR BAYREB propose d'exploiter des mesures in situ non intrusives par des modèles réduits RC.

Cependant, selon le modèle et selon le scénario d'instrumentation, les données à exploiter peuvent ne pas être suffisamment informatives et provoquer un problème d'identifiabilité. En effet, l'estimation des paramètres par calibration peut donner des valeurs variables dépendant non exhaustivement de la saison, des conditions météorologiques, de la durée de mesures ou du pas de temps choisi (Deconinck et Roels 2017; Madsen et al. 2015). Cet article se propose donc de quantifier et qualifier la robustesse des estimateurs (valeurs prises par les paramètres calibrés) d'un modèle réduit RC, i.e. la capacité des paramètres à ne pas subir l'influence des conditions météorologiques. Les travaux présentés ici porteront plus particulièrement sur la robustesse des paramètres représentant la résistance thermique globale de l'enveloppe du bâtiment.

Pour cela, il est proposé une étude numérique basée sur un benchmark comme décrit en partie 2. Grâce au benchmark, des indices de sensibilité sont calculés en partie 3 pour isoler les effets de chacune des variables météorologiques. Enfin la partie 4 s'intéresse aux lois de comportement entre les variables météorologiques influentes et les valeurs estimées des paramètres du modèle réduit.

2. ÉTUDE NUMÉRIQUE DE LA ROBUSTESSE DE L'ESTIMATION D'UN PARAMÈTRE

2.1. PRINCIPE D'UN BENCHMARK NUMÉRIQUE

Pour évaluer l'influence des conditions météorologiques sur l'estimation des paramètres, exploiter des données réelles, dans un environnement non entièrement maîtrisé, risque de ne livrer qu'une analyse partielle des effets. Pour pouvoir tester différentes configurations, l'étude numérique repose sur un modèle thermique complet qui, s'il est suffisamment détaillé, peut être assimilé à un système réel. Il offre une géométrie flexible et, soumis à des conditions aux limites connues, peut générer des données qui seront assimilées comme des données de mesure réelles, à condition qu'elles soient bruitées.

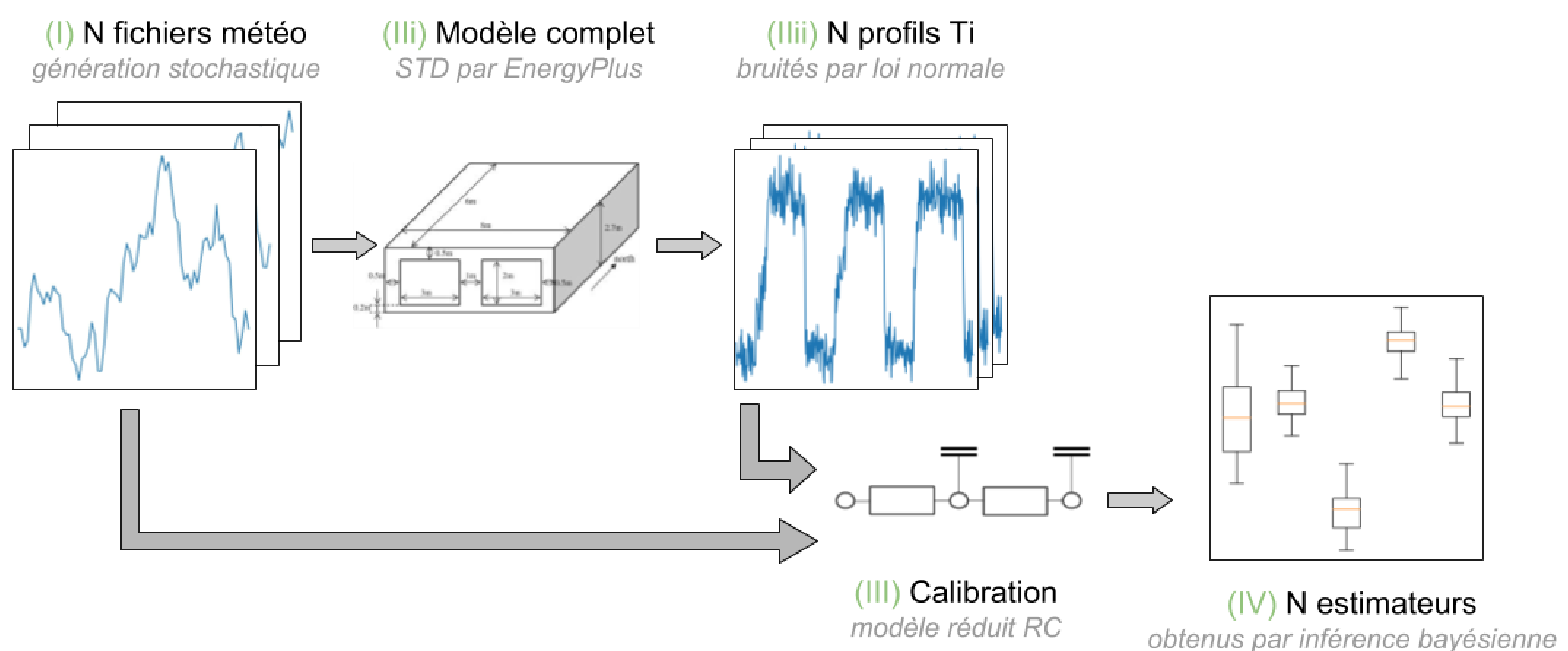


Figure 1 : Protocole de l'étude numérique

Le principe global de l'étude numérique, explicité en Figure 1, est de soumettre un modèle complet (IIi) à des conditions aux limites variables (I) pour que soient générés des profils de température intérieure (IIii). Ces profils servent à la calibration d'un modèle réduit (III). La question est donc de

savoir si les estimateurs de ces paramètres (IV) sont robustes vis à vis de la variabilité des conditions aux limites (I).

Deux informations sont extraites de l'étude numérique : la dispersion des estimateurs des paramètres du modèle réduit d'une part et l'influence de chaque variable météorologique sur les estimateurs d'autre part. Pour cela, les fichiers météorologiques utilisés (I) sont générés stochastiquement sur un mois de janvier. Ils sont construits de manière à être représentatif de la variabilité naturelle d'un mois d'hiver tout en permettant de calculer des indices de sensibilité de Sobol de premier ordre sur les estimateurs des paramètres calibrés (Goffart et al. 2017). Les variables météorologiques générées sont l'humidité relative, la température extérieure, le rayonnement solaire normal direct, le rayonnement solaire horizontal diffus, la direction du vent et la vitesse du vent.

Les fichiers météorologiques alimentent un modèle complet (Iii) et permettent de générer par simulation thermique dynamique des jeux numériques de températures intérieures. On obtient donc autant de jeux de données qu'on a de fichiers météorologiques. De ces profils de température intérieure (Iiii) peuvent ensuite être extraits des jeux de données. Pour reproduire les incertitudes de mesures de données réelles, les données numériques sont bruitées par une loi normale $\mathcal{N}(0,0.3)$.

Les fichiers météorologiques ainsi que les profils bruités de température intérieure permettent alors la calibration d'un modèle réduit (III). Le choix est porté vers une calibration par inférence bayésienne, approche probabiliste qui peut compenser des données peu informatives (Kennedy et O'Hagan 2001). On considère donc que toutes les variables inconnues ou incertaines sont des distributions de probabilité. Le principe de la calibration est alors de déterminer la distribution de probabilité de chacun des paramètres θ à calibrer sachant les données d de mesures disponibles : $p(\theta|d)$ appelée distribution postérieure. L'expression littérale de la distribution est inconnue et celle-ci doit être approchée par échantillonnage. Pour cette étude, l'échantillonnage est fait par l'algorithme de Metropolis adaptatif (Haario et al. 2001) qui produit un échantillonnage de Monte-Carlo par chaîne de Markov. Pour un nombre suffisamment grand d'itérations (Figure 2), la chaîne converge vers la distribution postérieure du paramètre dont on peut extraire l'espérance et l'écart-type qui caractérisent l'estimation des paramètres cherchés (IV). L'algorithme produit alors autant de distributions postérieures qu'il y a de paramètres à calibrer.

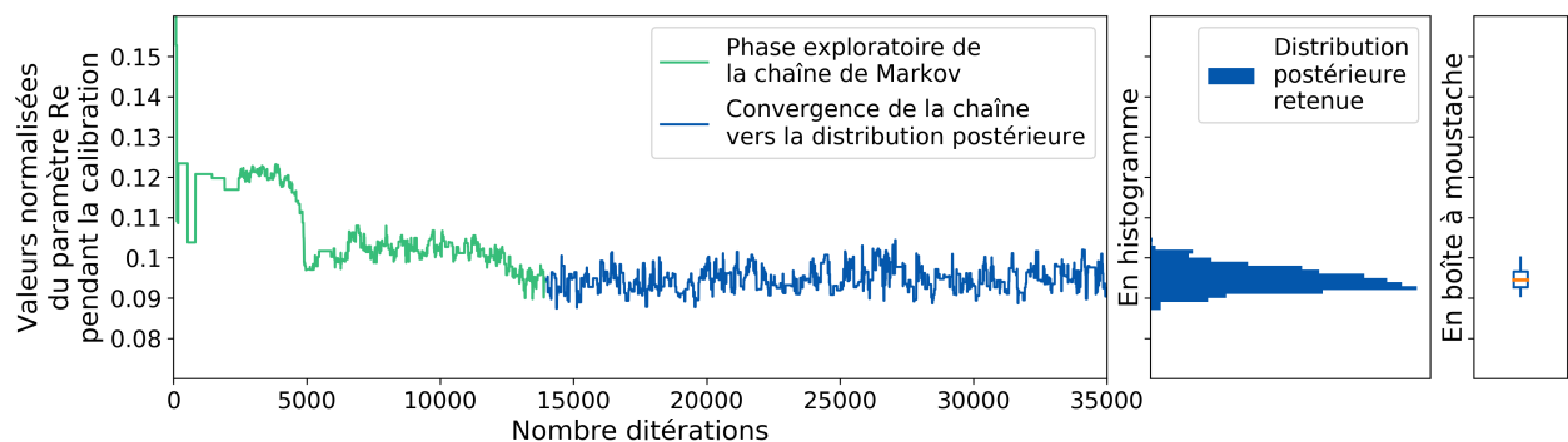


Figure 2 : Convergence de la chaîne de Markov vers la distribution postérieure d'un paramètre, ici R_e

2.2. CAS D'ETUDE

Les travaux du présent article illustrent la méthodologie en utilisant comme modèle complet une configuration BESTEST 600 (Judkoff et Neymark 1995) dotée d'un chauffage électrique convectif et radiatif, d'une épaisseur d'isolant de 10 cm sur les parois verticales et le plancher haut. Le

renouvellement d'air est fixé à $0 \text{ m}^3/\text{s}$ pour n'étudier l'enveloppe uniquement. Le modèle possède 12 m^2 de baies vitrées en façade sud ($U_{\text{vitrage}}=2,72 \text{ WK}^{-1}\text{m}^2$) et favorise des périodes de surchauffe peu réalistes en saison hivernale. La résistance thermique globale de l'enveloppe est de $1,76 \cdot 10^{-2} \text{ K/W}$. Ce modèle complet est soumis à 2000 fichiers météorologiques représentatifs d'un mois hivernal à Strasbourg.

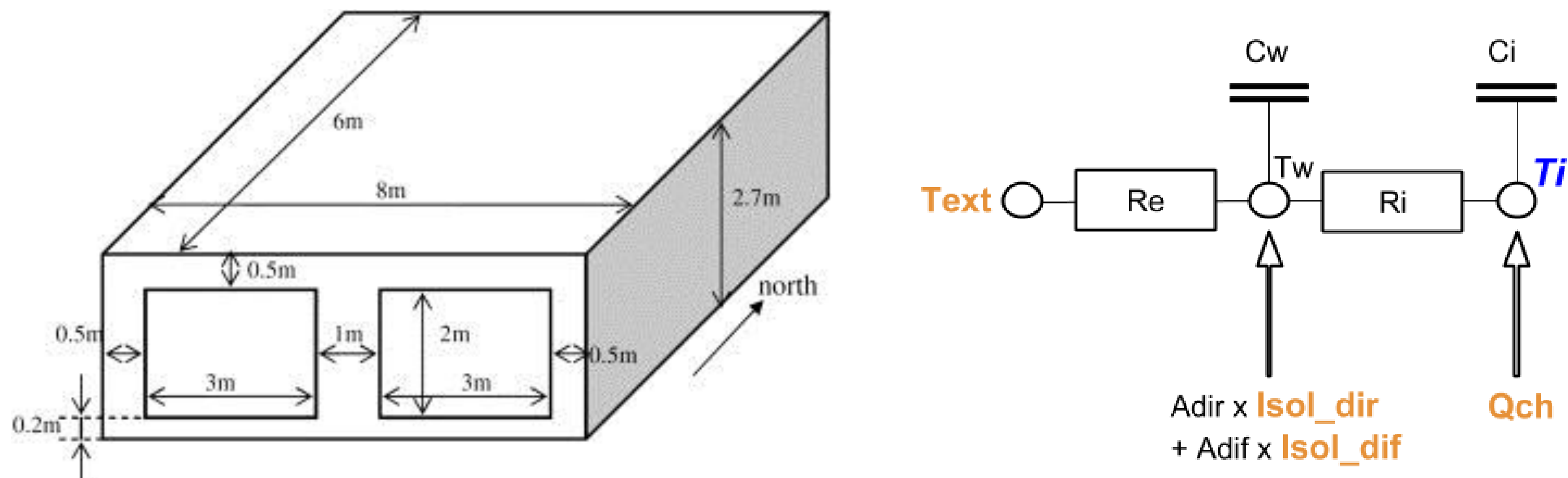


Figure 3 : Modèle complet (à gauche) et modèle réduit (à droite) utilisé pour le cas d'étude

Les données servent à la calibration d'un modèle réduit 2R2C (Figure 3) et l'intérêt de la méthodologie sera montré par une analyse plus poussée de la résistance équivalente du modèle $R_{eq} = R_e + R_i$ qui représente physiquement la résistance thermique globale de l'enveloppe. Afin d'évaluer l'évolution de la robustesse en fonction de la durée de mesure, on choisit de calibrer chacun des modèles sur un extrait de 3 jours, entre le 2 et le 5 janvier, et un extrait de 7 jours, entre le 2 et le 9 janvier.

3. VARIABILITE DES ESTIMATEURS DES RESISTANCES D'UN MODELE 2R2C

La Figure 4 montre les distributions postérieures de la résistance équivalente R_{eq} , somme des deux résistances du modèle, obtenues par inférence bayésienne sur les 100 premiers fichiers météorologiques utilisés. A titre comparatif, la Figure 4 montre également, en pointillé, la valeur théorique de la résistance thermique globale.

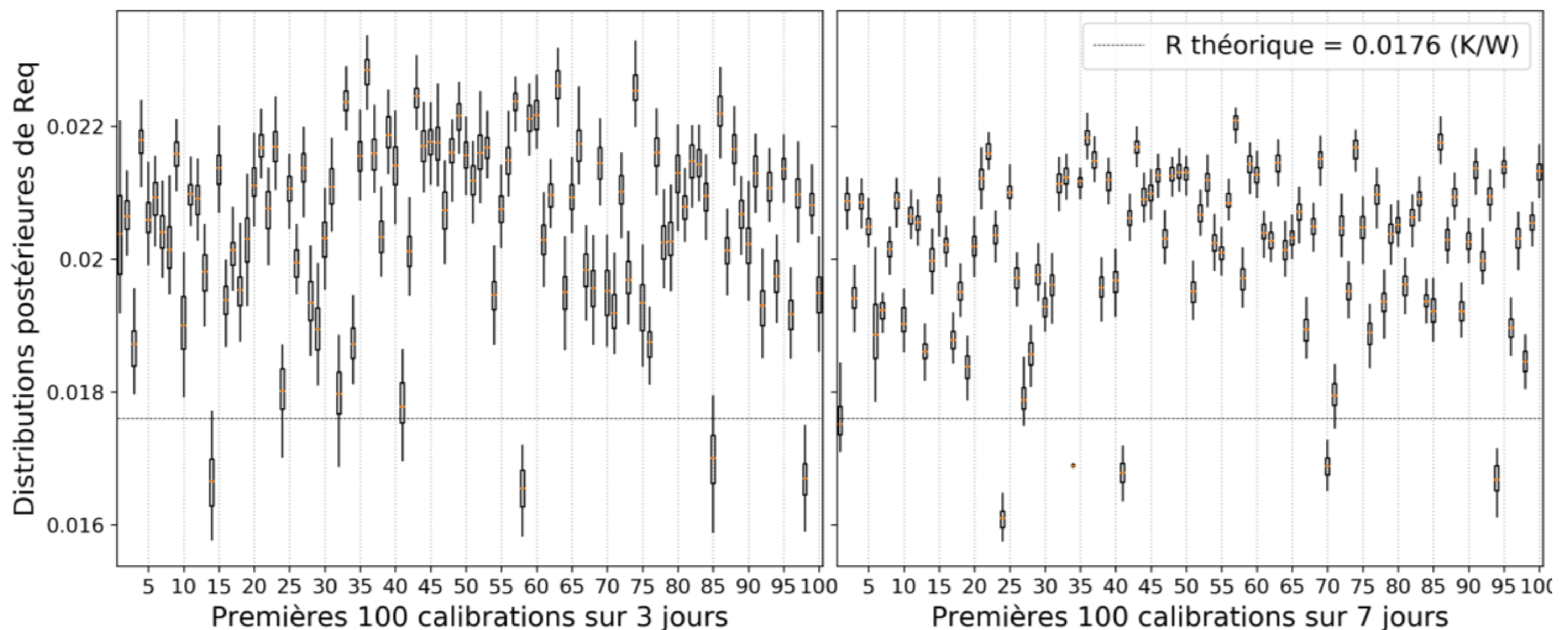


Figure 4 : Variabilité des 100 premières calibrations sur la somme $R_{eq} = R_e + R_i$

Les distributions postérieures montrent une dispersion dont la moyenne semble être significativement supérieure à la valeur théorique de résistance globale. De plus, pour une calibration de 7 jours, chaque chaîne de Markov semble être plus centrée autour de l'espérance, ses écarts-types sont en effet plus faibles pour 7 jours ($\sigma_{R_{eq},7 \text{ jours}} = 5,8 \cdot 10^{-4} \text{ K/W}$) que pour 3 jours ($\sigma_{R_{eq},3 \text{ jours}} = 6,6 \cdot 10^{-4} \text{ K/W}$). Cela peut s'expliquer par le fait que sur 7 jours, les données de mesure sur lesquelles

l'algorithme cherche la vraisemblance la plus élevée sont plus longues, elles contiennent plus d'information. Au vu de la faible complexité du modèle, moins de valeurs de paramètres sont vraisemblables d'où des distributions plus resserrées autour de l'espérance. Il faut cependant souligner que même avec un écart-type globalement plus faible, l'espérance peut être éloignée voire très éloignée de la valeur réelle recherchée. C'est pourquoi l'écart-type de la distribution postérieure ne suffit pas à lui seul à déclarer l'identifiabilité du paramètre étudié.

En complément, la Figure 5 montre la variabilité de l'erreur de l'espérance à la valeur théorique de la résistance pour les calibrations sur 3 et sur 7 jours de mesures : $\varepsilon_i = (R_{eq,i} - R_{th})/R_{th}$. L'erreur moyenne diminue également de 17,1% à 14,6%, ce qui montre un biais systématique dans l'estimation de la résistance équivalente, même s'il diminue avec la durée de mesure.

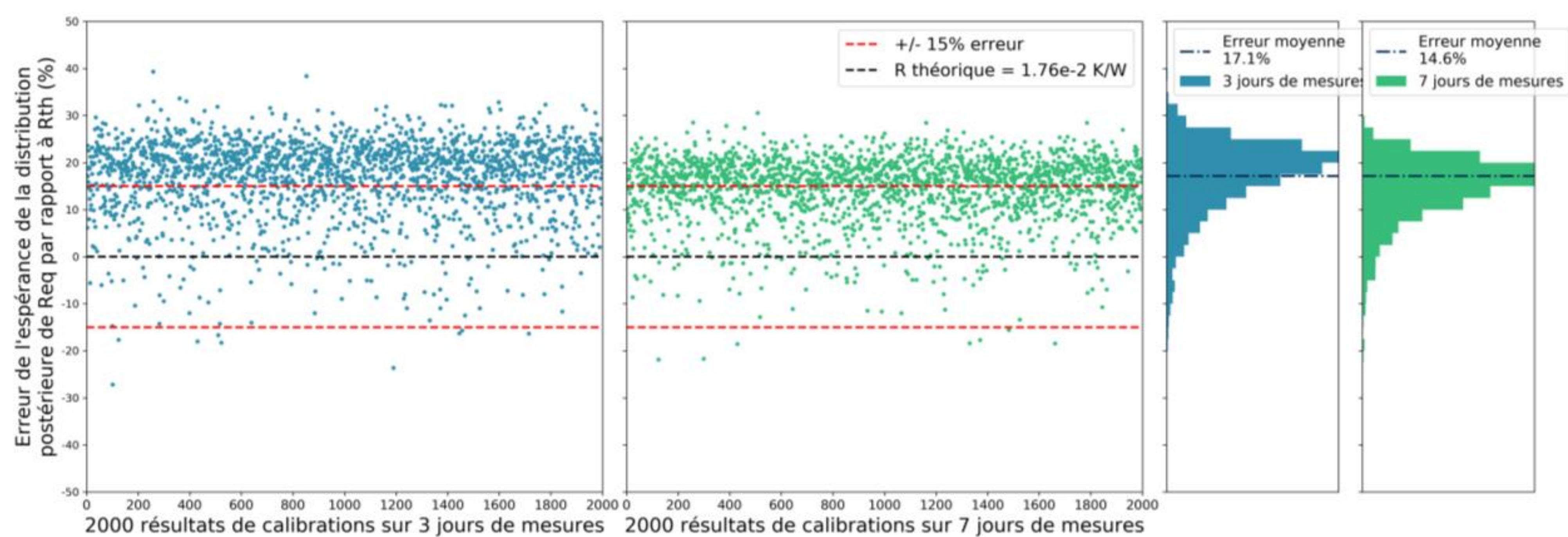


Figure 5 : Erreur pour chaque calibration de R_{eq} par rapport à R_{th}

4. DISCUSSION SUR LES DISPARITES OBSERVEES

4.1. ANALYSE DE SENSIBILITE DES ESPERANCES ET ECARTS-TYPES DES ESTIMATEURS

Pour appréhender au mieux l'influence des conditions météorologiques, les indices de sensibilité de Sobol sont calculés pour les espérances et les écart-types des distributions postérieures des paramètres R_e et R_i (Figure 6). Les indices de sensibilité varient entre 0 et 1 et représentent la part de responsabilité de chaque variable étudiée sur la variabilité de sortie, ici les espérances et les écarts-types. Ainsi, un indice de sensibilité de 0,75 pour une variable v_i signifie que 75% de la variance de sortie est expliquée par la variable v_i . Des indices de sensibilité négatifs, résultat possible avec les indices de Sobol, traduisent une incertitude sur les résultats d'autant plus grande que les valeurs sont négatives. Cela est dû à l'incertitude de l'évaluation des indices et peut de plus être dû à la part aléatoire dû au processus de calibration qui introduit une certaine variabilité non expliquée par les grandeurs météorologiques. Dans les résultats présentés ci-dessous, il sera donc prudent de ne considérer comme significatifs que les indices supérieurs à 0,1 en tant qu'indicateurs de tendance.

La Figure 6 regroupe les résultats de l'analyse de sensibilité sur l'espérance et sur l'écart-type pour les deux durées de mesures de l'étude. Dans le cas de l'espérance, Figure 6 à gauche, les indices calculés pour R_e montrent que sa variabilité sur 3 jours comme sur 7 jours est majoritairement expliquée par un effet de premier ordre de la température extérieure. Quant au paramètre R_i , sa variance est plus faiblement influencée par la variance de la température extérieure. La somme des indices pour R_i est significativement inférieure à 1 ce qui signifie que les effets d'interaction sont majoritaires. Rapporté à

la résistance équivalente R_{eq} , on peut alors considérer que la variable météorologique la plus influente est la température extérieure.

Les indices de sensibilité des écarts-types vis-à-vis des variables météorologiques, Figure 6 à droite, délivrent moins d'information : les indices sont considérés comme non significatifs. La variabilité des écarts-types des paramètres R_e et R_i n'est expliquée que par des effets d'interaction.

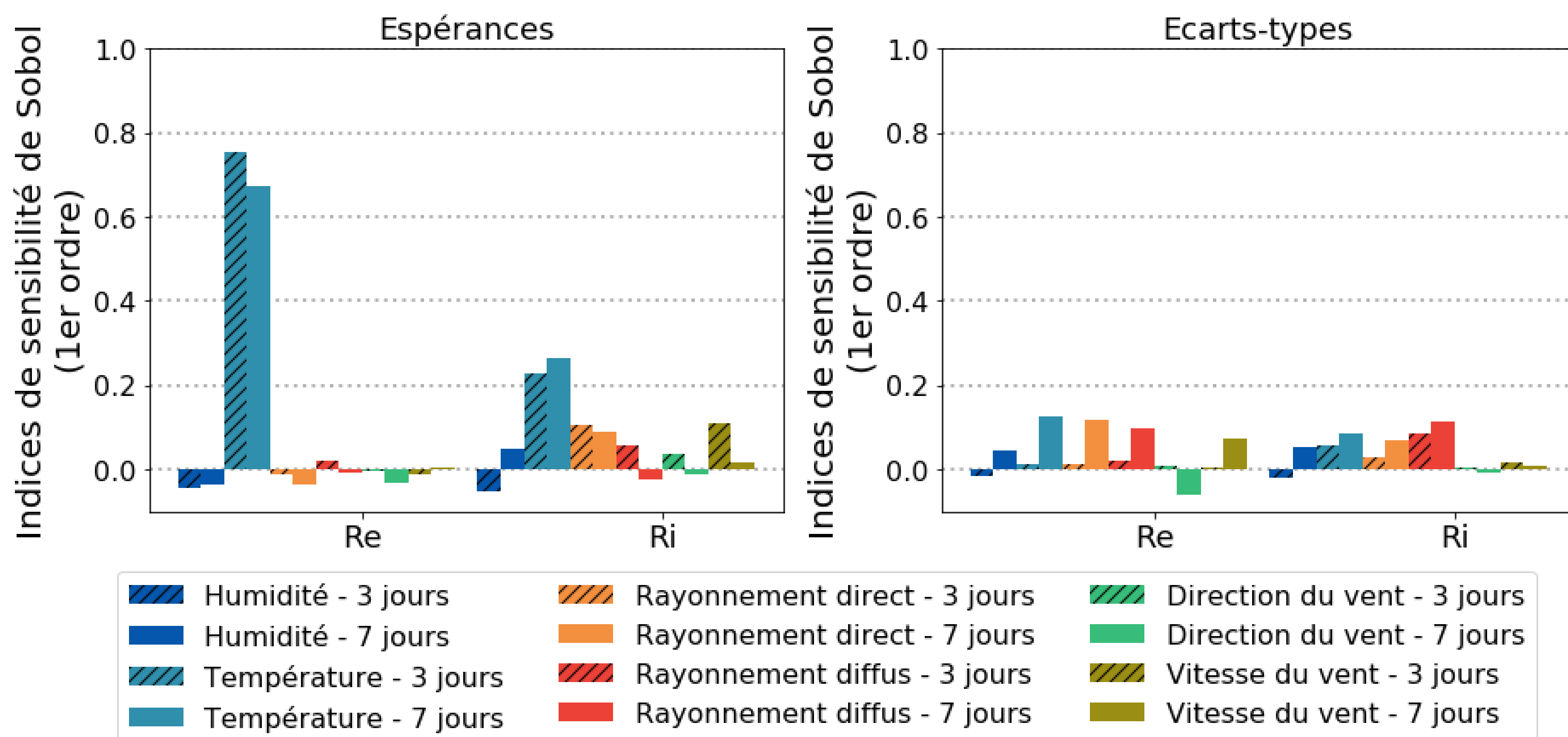


Figure 6 : Indices de sensibilité des espérances et des écarts-types des paramètres R_e et R_i du modèle réduit

4.2. ETUDE DES VALEURS ABERRANTES ET DISCUSSION

Les indices de sensibilité indiquent que la variable la plus influente sur la variabilité de l'estimation de R_{eq} est la température extérieure. Or vu la dispersion et le biais des résultats non négligeables montré sur la Figure 5, la dépendance entre température extérieure moyenne et valeurs de l'espérance de R_{eq} est maintenant étudié.

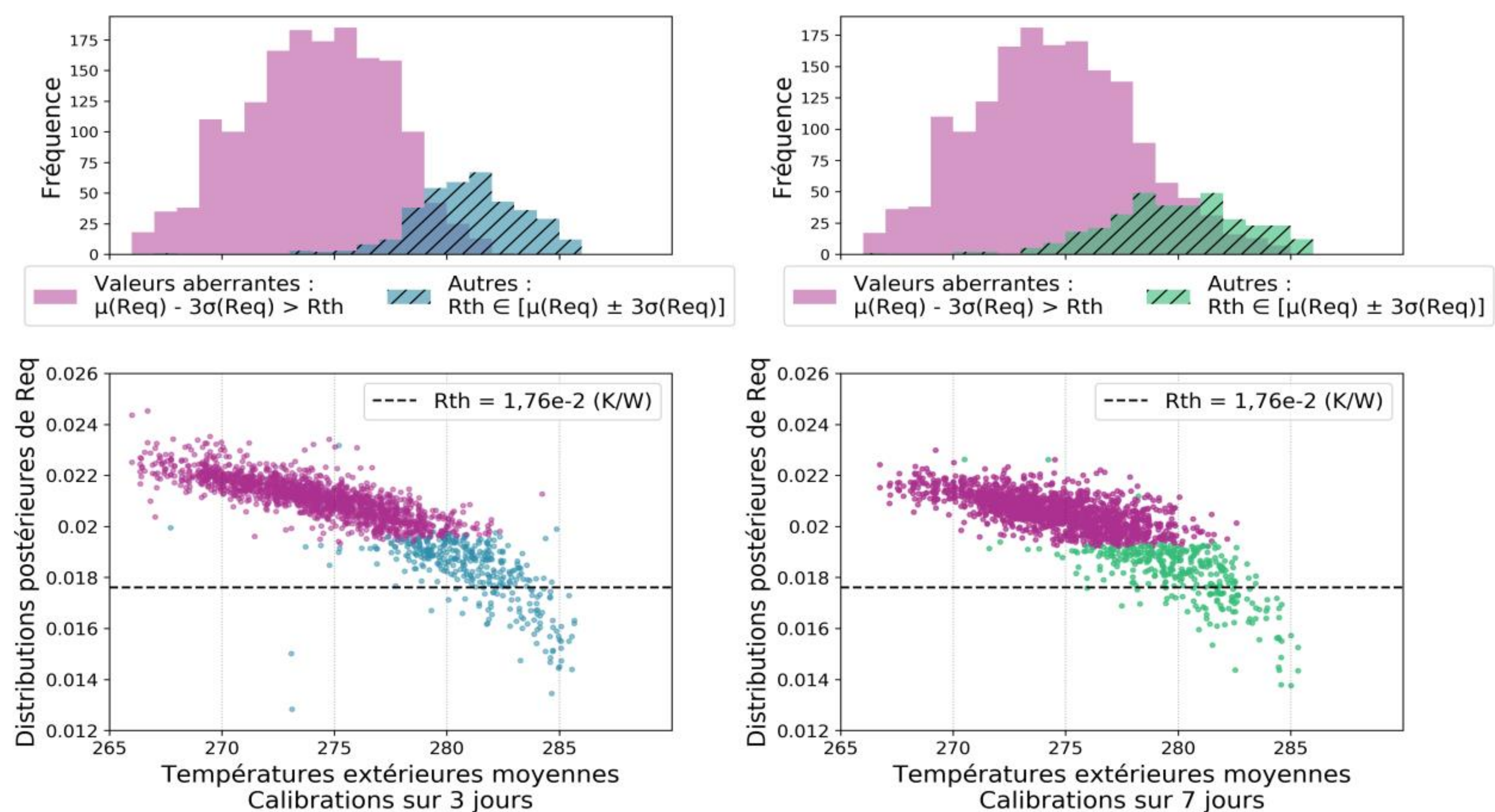


Figure 7 : Corrélations entre valeurs calibrées de R_{eq} et température extérieure moyenne

Connaissant R_{th} la valeur théorique de la résistance thermique globale de l'enveloppe, il est possible de classer les résultats de calibrations selon que le résultat est bien au-dessus ou bien au-dessous de la valeur théorique. Notamment, puisque la grande majorité des distributions postérieures sont supérieures à la valeur théorique, on sépare les distributions en deux catégories : celles strictement supérieures à R_{th} et les autres. Par exemple si l'espérance diminuée de 3 écarts-types reste supérieure à R_{th} , cela signifie que l'intervalle de confiance à 99 % ne contient pas R_{th} et on peut la classer dans la catégorie supérieure. La Figure 7 met en évidence, en violet non hachuré, parmi toutes les moyennes des températures extérieures pendant 3 jours, à gauche, et pendant 7 jours, à droite, celles qui ont donné une estimation surestimée. Les valeurs en bleu ou vert hachuré sont les températures moyennes extérieures liées à une valeur estimée autour de la valeur théorique.

Les estimations de R_{eq} à une température extérieure moyenne plus douces sont plus faibles que les estimations de R_{eq} pour des températures plus froides, notamment visible pour une calibration sur 3 jours (à gauche). La tendance est un peu moins prononcée pour la calibration sur 7 jours de mesures, à droite.

Avant tout, il s'agit d'étudier ces résultats compte tenu du biais possible dû au modèle Bestest utilisé : par températures douces, le modèle complet produit des périodes de surchauffe qui pourraient biaiser la pente observée dans la corrélation. Or parmi les 525 profils de 3 jours qui ne présentent pas de surchauffe, la moyenne de l'erreur est de 17,8% (écart-type 7,2%) contre une moyenne de 17,1% d'erreur pour l'ensemble des 2000 profils (écart-type 8,3%). La corrélation entre R_{eq} et la température extérieure moyenne n'est donc pas expliquée par la présence ou non d'une période de surchauffe.

Il n'en reste pas moins que le biais observé en figure 5 ne permet pas de conclure sur les températures extérieures favorisant l'identifiabilité. Quelles que soient les causes du biais, en l'état des conditions de calibrations décrites dans cet article, il semble que le modèle 2R2C soit un modèle sensible aux conditions aux limites et que son application en résolution de problème inverse ne soit donc pas satisfaisante.

5. PERSPECTIVES DE TRAVAIL SUR LES CONDITIONS D'IDENTIFIABILITE DE R_{EQ}

Cet article a montré l'application d'une méthodologie de quantification de la variabilité de l'estimation d'un paramètre vis-à-vis des conditions météorologiques, présentée au travers de l'exemple d'un modèle 2R2C. Les résultats du cas d'application mettent en évidence que l'estimation de la résistance équivalente R_{eq} par le modèle réduit 2R2C n'est pas robuste vis-à-vis de la variabilité des conditions météorologiques dans les conditions de calibration testées. Il a en effet été établi que le principal facteur influençant l'estimation de R_{eq} est la température extérieure et que dans ces conditions aux limites, des températures extérieures moyennes froides surestiment jusqu'à 40% la valeur de R_{eq} .

Cette variabilité de l'erreur est d'autant plus nuisible que l'incertitude déduite de la calibration bayésienne ne traduit pas cette variabilité et induit une confiance erronée en l'estimation de R_{eq} par l'espérance. (Brynjarsdóttir et O'Hagan 2014) ont justement montré cet effet pour des modèles simplifiés et concluent que pour éviter ce biais, il est nécessaire de prendre en compte l'erreur de caractérisation du modèle dans la formulation du problème, à la manière de (Kennedy et O'Hagan 2001). Il est donc prévu de poursuivre les travaux entamés ici en incluant une formulation de l'erreur de caractérisation dans l'inférence bayésienne. On pensera notamment à des modèles stochastiques par filtres de Kalman (Rouchier et al. 2018) ou à des processus gaussiens (Arendt et al. 2012).

Enfin, d'autres modèles réduits, d'ordre supérieur, pourraient être étudiés pour compléter le benchmark. Le risque de surapprentissage étant connu, le lien entre l'augmentation de l'ordre du modèle RC, la durée de mesure et la robustesse des estimateurs pourrait être approfondi pour déterminer les conditions d'une identifiabilité pratique. Notamment, le set de 2000 jeux de mesures numériques permettrait à cette occasion de définir, par modèle, un nombre de jours minimal pour lequel l'estimation de R_{eq} est robuste à une précision donnée.

6. REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient l'ANR pour le projet ANR-15-CE22-0003 BAYREB grâce auquel ces travaux peuvent être présentés.

Les résultats du projet ANR BAYREB sont en ligne sur locie.github.io/bayreb.

7. BIBLIOGRAPHIE

- Arendt, Paul D, Daniel W Apley, Wei Chen, David Lamb, et David Gorsich. 2012. « Quantification of Model Uncertainty : Calibration, Model Discrepancy and Identifiability ». *Journal of Mechanical Design* 134 (10): 40
- Brynjarsdóttir, Jenn, et Anthony O'hagan. 2014. « Learning about physical parameters: The importance of model discrepancy ».
- Deconinck, An-heleen, et Staf Roels. 2017. « Is stochastic grey-box modelling suited for physical properties estimation of building components from on-site measurements? » *Journal of Building Physics*, février
- Goffart, Jeanne, Thierry Mara, et Etienne Wurtz. 2017. « Generation of stochastic weather data for uncertainty and sensitivity analysis of a low-energy building ». *Journal of Building Physics* 41 (1): 41- 57.
- Haario, Heikki, Eero Saksman, et Johanna Tamminen. 2001. « An adaptive Metropolis algorithm ». *Bernoulli*.
- Judkoff, Ron, et Joel Neymark. 1995. « International Energy Agency Building Energy Simulation Test (BESTEST) and Diagnostic Model ».
- Kennedy, Marc C, et Anthony O'Hagan. 2001. « Bayesian Calibration of Computer Models ». *Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Statistical Methodology)* 63 (3): 425- 64.
- Madsen, Henrik, Peder Bacher, Geert Bauwens, An-Heleen Deconinck, Glenn Reynders, Staf Roels, Eline Himpe, et Guillaume Lethé. 2015. *IEA EBC Annex 58 : Thermal performance characterisation using time series data - statistical guidelines*.
- Mangematin, Eric, Guillaume Pandraud, et Didier Roux. 2012. « Quick measurements of energy efficiency of buildings ». *Comptes Rendus Physique* 13: 383- 90.
- Rouchier, Simon, Mickael Rabouille, et Pierre Oberlé. 2018. « Calibration of simplified building energy models for parameter estimation and forecasting: stochastic versus deterministic modelling », *Building and Environment* accepté pour publication
- Schetelat, Pascal, et Rémi Bouchié. 2014. « ISABELE : a Method for Performance Assessment at Acceptance Stage using Bayesian Calibration ». *9th International Conference on System Simulation in Buildings* 1 (1): 1- 16.
- Sonderregger, Robert. 1978. « Diagnostic tests determining the thermal response of a house ». In *ASHRAE Meeting*. Atlanta.

Etude de l'impact du microclimat urbain proche du bâti par une modélisation intégrée dans le logiciel TRNSYS

Adnane M'SAOURI EL BAT*¹, Zaid ROMANI², Emmanuel BOZONNET³, Abdeslam DRAOUI¹

¹ *ETTE, Equipe de recherche en Transferts Thermiques et Énergétique (UAE/E14FST), Faculté des Sciences et Techniques de Tanger, Université Abdelmalek Essaâdi, Maroc.*

² *Ecole Nationale d'Architecture de Tétouan, Maroc.*

³ *LaSIE, La Rochelle University, Avenue Michel Crépeau, 17000 La Rochelle, France.*

*a.msaourielbat@uae.ac.ma

RESUME. Le microclimat urbain influe sur les besoins énergétiques et le potentiel de ventilation naturelle des bâtiments. Implicitement, les bâtiments affectent leur environnement, par le piégeage solaires et le confinement aérauliques. Dans ce contexte, l'objectif de cette étude est de réaliser une modélisation intégrée dans le logiciel TRNSYS avec une approche simplifiée permettant de prendre en compte à la fois les phénomènes thermiques, aérauliques et radiatifs à l'échelle microclimatique d'un quartier. Pour évaluer la validité de cette méthode sur un canyon urbain, une comparaison a été effectuée entre nos résultats et les résultats expérimentaux existants. Les résultats numériques obtenus sont proches des observations expérimentales avec une erreur absolue moyenne sur la température surfacique des parois extérieures d'environ 1.5 °C et une erreur relative moyenne d'environ 8%. Le développement de cette méthode peut être intéressant pour son temps de calcul réduit par rapport à des calculs CFD, avec une précision satisfaisant les objectifs d'évaluation thermique et énergétique.

MOTS-CLÉS : Microclimat urbain ; approche simplifiée; TRNSYS.

ABSTRACT. The urban microclimate strongly affects the energy needs and natural ventilation potential of buildings. Implicitly, buildings affect their environment, by the creation of particular solar masks and air circulation particular. In this context, the objective of this study is to perform an integrated modeling in the TRNSYS software with a simplified approach to take into account thermal, aeraulic and radiative phenomena at the microclimatic scale of a neighborhood. To evaluate the validity of this method, a comparison between our results and the existing experimental results was performed. The numerical results obtained are close to the experimental observations with a mean absolute error on the outer wall surface temperature of 1.5 ° C and an average relative error of 8%. The use of this method is interesting for its reduced calculation time compared to CFD calculations while keeping a satisfactory accuracy for the thermal and energy evaluation objectives.

KEYWORDS: Urban microclimate, simplified approach, TRNSYS.

1. INTRODUCTION

L'architecture, la morphologie et le microclimat urbain diffèrent d'un quartier à un autre. Cette différence influe sur les besoins énergétiques des bâtiments ainsi que sur le confort extérieur. En revanche, l'influence du microclimat sur les besoins énergétiques est généralement négligée dans les simulations énergétiques des bâtiments. En effet, les outils de simulations énergétiques (TRNSYS, CODYBA, EnrgyPlus,...) utilisent les données météorologiques générées à partir des stations de

mesures situées dans les zones inter-urbaines qui sont insuffisantes pour décrire l'environnement extérieur d'un bâtiment.

À cet égard, dans la littérature de nombreuses études concernant le microclimat urbain et son impact sur les bâtiments sont présentées. Parmi ces études, on peut citer celle de (Bozonnet, Belarbi, et Allard 2007) qui a étudié l'impact du microclimat urbain sur la demande énergétique des bâtiments dans le cas d'une rue canyon à l'aide d'une modélisation thermoaéroulque par modèle zonal.

(Bouyer 2009) a développé une plateforme de simulation dynamique basée sur le couplage d'un modèle thermoradiatif (Solene) et d'un code de calcul numérique de mécanique des fluides (Fluent) afin de simuler les interactions climatiques bâtiment-microclimat urbain et de définir l'impact de l'aménagement urbain sur les consommations énergétiques des bâtiments.

Ensuite, (Athamena 2012) a étudié l'impact de l'hétérogénéité morphologique urbaine spécifique des éco-quartiers sur le confort thermique des espaces publics extérieurs. Pour ce faire, il a développé un modèle numérique basé sur un couplage entre un modèle CFD (Code_Saturne) et un modèle thermoradiatif Solene.

(Yang et al. 2012) ont développé un modèle pour évaluer les effets du microclimat sur la performance énergétique du bâtiment. Dans ce modèle, un couplage entre le modèle de microclimat ENVI-met et le logiciel de simulation énergétique du bâtiment EnergyPlus est réalisé.

(Gros et al. 2013) a proposé un modèle numérique couplant la simulation des besoins énergétiques des bâtiments au microclimat urbain par l'utilisation de logiciel Solene et EnviBatE. Ce modèle a été appliqué sur le quartier de Pin-Sec de la ville de Nantes en France selon différents scénarios de réaménagement.

Plus récemment, (Daviau-Pellegrin 2016) a réalisé un couplage entre un modèle de dynamique des fluides (Code_Saturne) avec le modèle de bâtiment BuildSysPro afin de modéliser les échanges énergétiques entre l'atmosphère urbaine et les bâtiments. Ces modèles sont généralement détaillés, par contre leur utilisation est complexe (temps de calcul élevé, couplage entre plusieurs logiciels).

Dans le but de répondre à cette problématique, nous proposons une modélisation intégrée dans le logiciel TRNSYS avec une approche plus simplifiée que les modèles décrits précédemment, mais intégrant un outil expert de la simulation thermique dynamique du bâtiment. Cette approche permet de prendre en considération le couplage des phénomènes thermiques, aéroulques et radiatifs à l'échelle microclimatique de l'environnement proche du bâtiment. Le modèle radiatif est basé sur le facteur de Gebhart (Gebhart 1961) pour calculer les échanges radiatifs et les inter-réflexions. Tandis que le modèle aéroulque est basé sur un modèle théorique qui prend en compte les effets des vents dominants (Soulhac, Perkins, et Salizzoni 2008). Pour évaluer la validité de la méthode développée, une comparaison entre nos résultats et les résultats expérimentaux est présentée dans la suite.

2. METHODE

2.1. MODELE THERMORADIATIF

Le modèle thermoradiatif proposé dans cette étude est développé à l'aide du logiciel TRNSYS 17. Ce logiciel est conçu pour la modélisation thermique des bâtiments et les systèmes énergétiques. Dans le présent modèle, les transferts de chaleur par conduction thermique sont modélisés par les fonctions

de transferts. Pour la modélisation des transferts de chaleur par convection à l'aide de TRNSYS, on a deux possibilités soit de fixer la valeur du coefficient d'échange convectif soit d'utiliser des corrélations spécifiques.

Concernant les échanges radiatifs, ils sont modélisés différemment pour les surfaces intérieures et les surfaces extérieures. Pour les surfaces intérieures, TRNSYS 17 utilise un modèle de rayonnement 3D basé sur les facteurs de Gebhart (Klein et al. 2010), permettant d'inclure les multi-réflexions des rayonnements solaires et thermiques. Ces facteurs sont calculés à partir de l'équation (1) :

$$G_{i,k} = (I - F_{i,k}\sigma_k)^{-1}F_{i,k}(I - F_{i,k}\rho_k) \quad (1)$$

Où G est la matrice du facteur de Gebhart, i la surface qui échange les rayonnements de courtes longueurs d'ondes avec la surface k ; I la matrice d'identité, F la matrice des facteurs de forme et ρ la réflectivité de la surface considérée.

Les flux des rayonnements solaires dans les volumes fermés sont calculés comme suit :

$$Q_{c,k} = A_k(1 - \alpha_k)I_{c,k} + \sum_{i=1}^n A_i G_{i,k}\alpha_i I_{c,i} \quad (2)$$

Avec n le nombre des surfaces, Q_c le flux de rayonnement solaire, A la surface, α l'albédo de surface et I_c le flux de rayonnement solaire sur la surface k .

En ce qui concerne le rayonnement thermique, il est distribué en utilisant les facteurs de Gebhart :

$$Q_{g,k} = A_k \varepsilon_k \sigma T_k^4 - \sum_{i=1}^n A_i \varepsilon_i \sigma T_i^4 G_{i,k} \quad (3)$$

$$G_{i,k} = (I - F_{i,k}\sigma_k)^{-1}F_{i,k}\varepsilon_k \quad (4)$$

Où Q_g est le flux de rayonnement thermique, ε l'émissivité, σ la constante de Stefan-Boltzmann et T la température des surfaces.

Pour les surfaces extérieures, les rayonnements solaires reçus sont considérés comme un gain de chaleur et les rayonnements thermiques comme une perte de chaleur vers le ciel. Les rayonnements thermiques échangés avec le ciel sont calculés par :

$$Q_{g,k} = A_k \varepsilon_k \sigma (T_k^4 - T_{ciel f}^4) \quad (5)$$

$$T_{ciel f} = (1 - f_{ciel})T_a + f_{ciel}T_{ciel} \quad (6)$$

Avec f_{ciel} le facteur de vue du ciel par la surface k , T_a est la température ambiante et T_{ciel} est la température fictive de ciel.

Généralement le logiciel TRNSYS ne permet pas de modéliser le microclimat urbain. De ce fait, le canyon est modélisé par un atrium avec un plafond ouvert et des bordures virtuelles. Ce choix permet au logiciel de considérer le canyon comme une zone thermique intérieure. De cette manière, l'ombrage des bâtiments voisins et les échanges des rayonnements de courtes et de grandes longueurs d'ondes entre les différents bâtiments de canyon peuvent être modélisés avec précision. De plus, TRNSYS 17 détermine les surfaces éclairées et celles qui sont ombragées, en fonction de la position du soleil et de l'orientation des surfaces.

2.2. MODELE DU SOL

La modélisation des transferts thermiques avec le sol est effectuée en se basant sur la norme française NF EN ISO 13370 et le type 77 de TRNSYS (Klein et al. 2010). Le type 77 est basé sur le modèle de william et glod. Ainsi, l'évolution cyclique de la température T_{sz} du sous-sol, à la profondeur z , s'exprime en fonction de la température moyenne de surface $T_{su,moy}$ pour la période étudiée par la relation suivante :

$$T_{sz}(t) = T_{su,moy} + \Delta T_{su} \cdot e^{-z \sqrt{\frac{\pi}{a_{sol} \cdot \Delta t}}} \cos\left(\frac{2\pi t}{\Delta t} - z \cdot \sqrt{\frac{\pi}{a_{sol} \cdot \Delta t}}\right) \quad (7)$$

Avec ΔT_{su} l'amplitude de variation de la température à la surface sur la période considérée, Δt la période considérée et a_{sol} la diffusivité thermique du sol.

2.3. MODELE AERAIQUE

Le vent est un élément microclimatique prépondérant et son comportement est lié à plusieurs facteurs dont la rugosité du site, sa direction et la géométrie urbaine. À l'échelle d'une rue canyon, l'écoulement d'air est généré par un vent dominant soufflant selon n'importe quelle direction par rapport à l'axe de la rue. Cet écoulement est caractérisé par une recirculation dans le plan transversal à la rue et un écoulement longitudinal le long de cette rue. Afin de calculer la vitesse moyenne dans la rue canyon (U_{rue}), le modèle théorique proposé par (Soulhac, Perkins, et Salizzoni 2008) est utilisé. L'expression mathématique de la vitesse de l'air est calculée par la formule suivante :

$$U_{rue} = U_H \cos(\varphi) \frac{\delta_i^2}{HW} \left[\frac{2\sqrt{2}}{c} (1 - \beta) \left(1 - \frac{c^2}{3} + \frac{c^4}{45} \right) + \beta \frac{2\alpha - 3}{\alpha} + \left(\frac{W}{\delta_i} - 2 \right) \frac{\alpha - 1}{\alpha} \right] \quad (8)$$

Avec :

$$\alpha = \ln\left(\frac{\delta_i}{z_{0,build}}\right) \quad (9)$$

$$\beta = e^{\frac{c}{\sqrt{2}} \left(1 - \frac{H}{\delta_i}\right)} \quad (10)$$

$$U_H = U_* \sqrt{\frac{\pi}{\sqrt{2} k^2 c} \left[Y_0(C) - \frac{J_0(C) Y_1(C)}{J_1(C)} \right]} \quad (11)$$

$$C \text{ est la solution de } \frac{z_{0,build}}{\delta_i} = \frac{2}{c} \exp\left[\frac{\pi Y_1(C)}{2 J_1(C)} - \gamma\right] \quad (12)$$

$$\delta_i = \min\left(H; \frac{W}{2}\right) \quad (13)$$

Où J_0 , J_1 , Y_0 et Y_1 sont des fonctions de Bessel, u^* la vitesse de friction, φ est la direction du vent externe par rapport à l'axe des rues. H et W sont respectivement la hauteur et la largeur de la rue considérée et $z_{0,build}$ est la rugosité aérodynamique des parois du canyon.

Le bilan massique de la rue est basé sur le calcul de débit d'air qui traverse sa section transversale. Un code de calcul sous Excel a été développé pour calculer la vitesse U_{rue} à partir de la résolution des équations (8) et (12).

3. RESULTATS ET VALIDATION

Afin de valider notre modèle, nous avons comparé nos résultats avec les mesures expérimentales de la campagne de mesures EM2PAU (Athamena 2012). Le dispositif de EM2PAU représente une rue canyon à l'échelle $\frac{1}{2}$, constituée de deux rangées : de longueur 24 m, de largeur 3.6 m et de hauteur

5.2m, ce qui donne un facteur d'aspect (hauteur/largeur) de 1.4. Chaque ligne est construite par un assemblage de quatre conteneurs de B=2.45 m de largeur représentant les bâtiments (figure 1). L'axe de la rue forme un angle de 43° avec la direction du Nord.

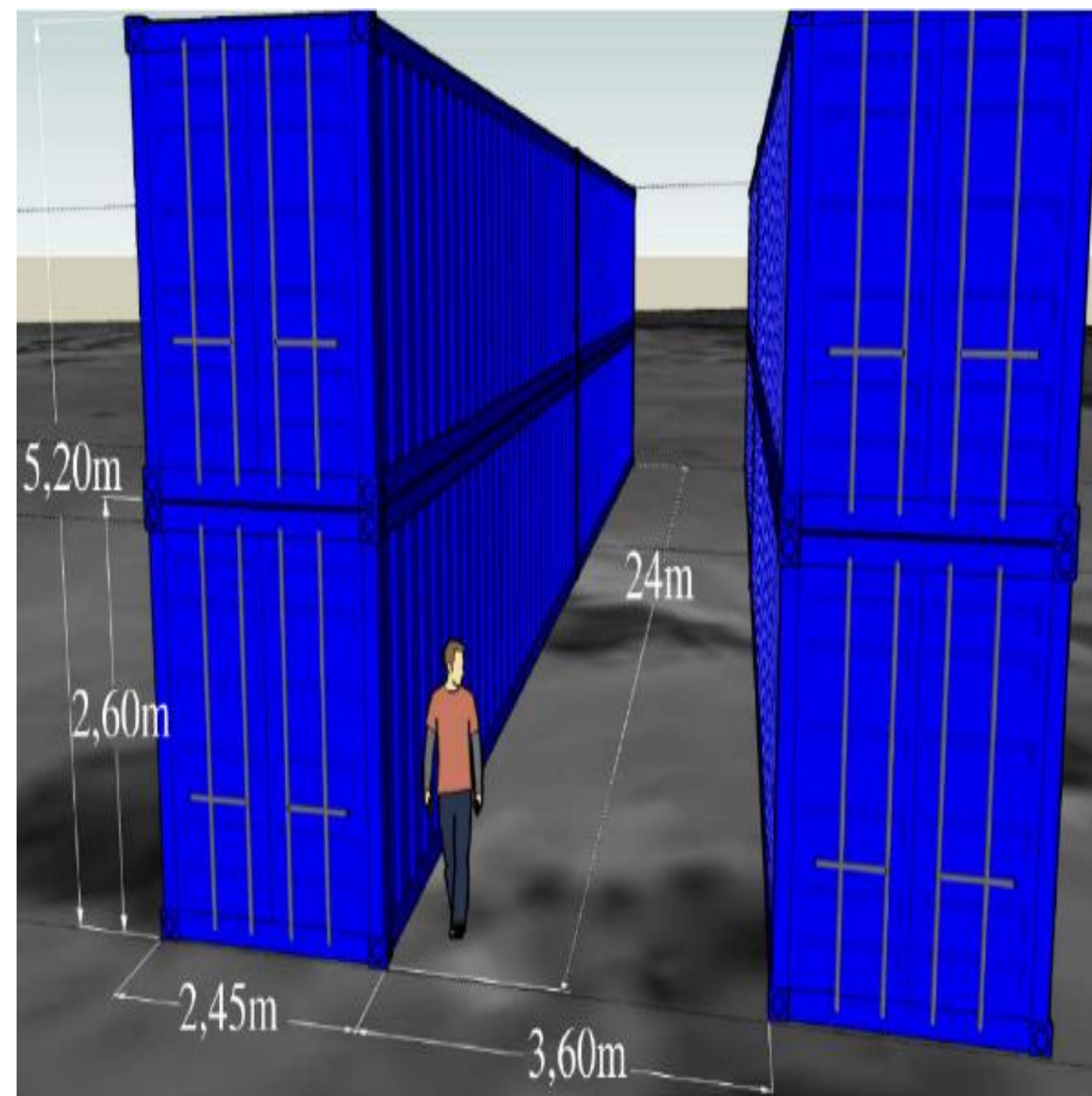


Figure 1: Dimensions des bâtiments de EM2PAU (Athamena 2012).

Le tableau (1) ci-dessous présente les propriétés des matériaux utilisés.

Matériaux	e (cm)	α	ε	λ (W/m ² .K)	ρ (Kg/m ³)	C_p (J/Kg.K)
Tôle	0.25	0.2	0.8	52	7830	500
Lame d'air	15	-	-	0.04	1.25	1000
Polystyrène	45	-	-	0.032	35	1450
Asphalte	5	0.17	0.91	2.4	1600	950
Terre	50	-	-	1.3	1600	1100

Tableau 1: Propriétés thermophysiques des matériaux constituant les bâtiments et le sol (Athamena 2012).

La valeur du coefficient d'échange convectif externe pour les façades des bâtiments, établie dans les simulations, est supposée constante et égale à $17.78 \text{ W/m}^2\text{K}$. Pour la face interne des murs, la valeur choisie est égale à $3.05 \text{ W/m}^2\text{K}$. Pour la détermination de la rugosité du sol, la méthode de décomposition de (Athamena 2012) est utilisée et la longueur de rugosité des conteneurs est de 0.01m (Daviau-Pellegrin 2016) (figure 3).



Figure 2: Rugosité du sol autour des conteneurs de EM2PAU (Athamena 2012).

Concernant les données météorologiques, un fichier de type TMY2 a été créé à partir des mesures expérimentales issues de la campagne de mesures EM2PAU pendant la période du 06/04/2011 au 09/04/2011.

Les résultats analysés ci-dessous correspondent aux évolutions temporelles de la température des surfaces extérieures des conteneurs Est et Ouest côté rue.

Pour la surface OUEST du canyon :

La comparaison des valeurs moyennes des températures obtenues à l'aide de notre modèle avec les résultats expérimentaux de (Athamena 2012) montre un bon accord (figure 9). Pour les surfaces Ouest du canyon, l'erreur relative moyenne entre nos résultats et ceux obtenus expérimentalement est d'environ 8% et l'erreur absolue est d'environ 1.5 °C (figure 3). Concernant le coefficient de régression R^2 , il est de 0.9718 entre nos résultats et les résultats expérimentaux st de (figure 4).

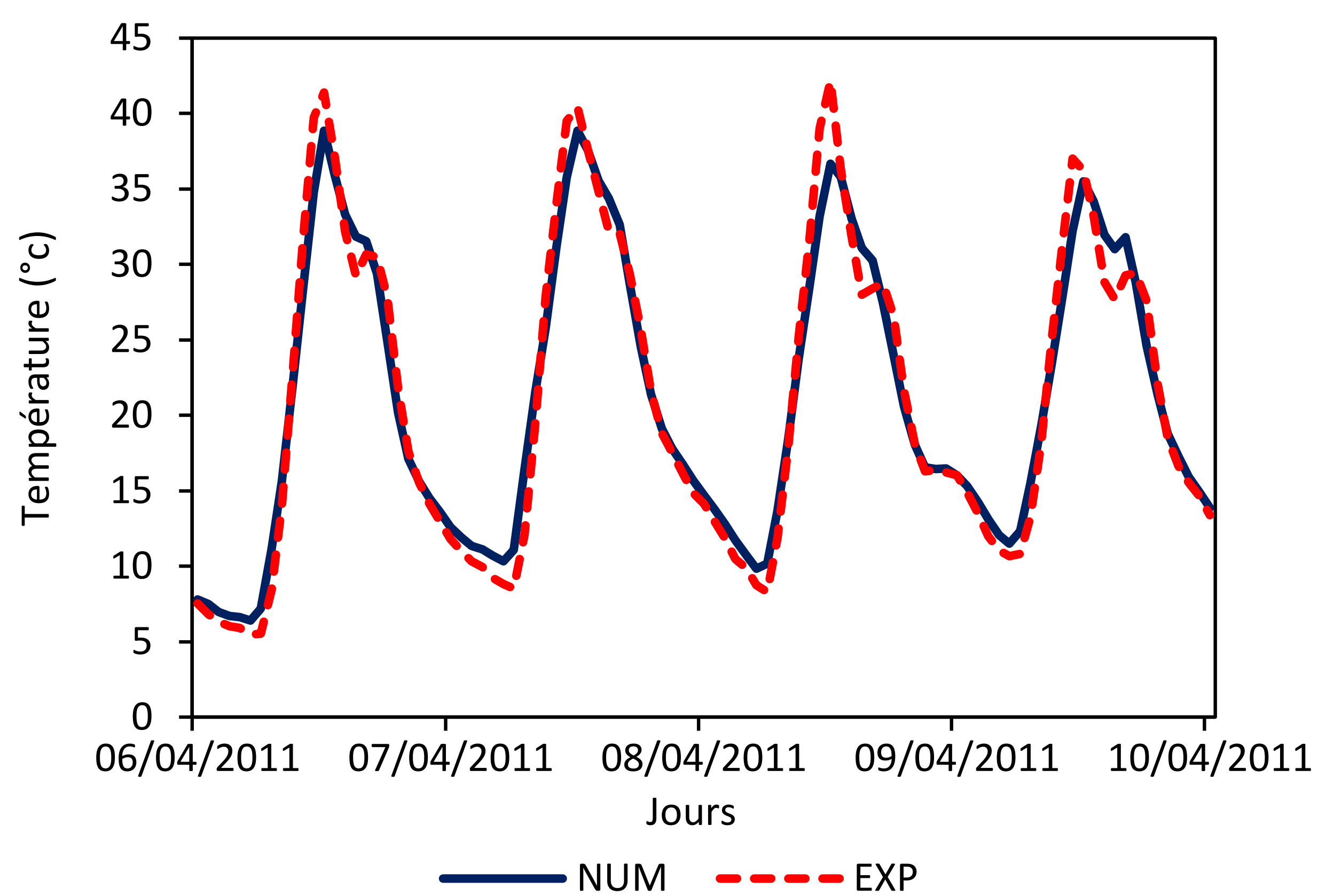


Figure 3 : Variation temporelle de la température des surfaces Ouest étudiées.

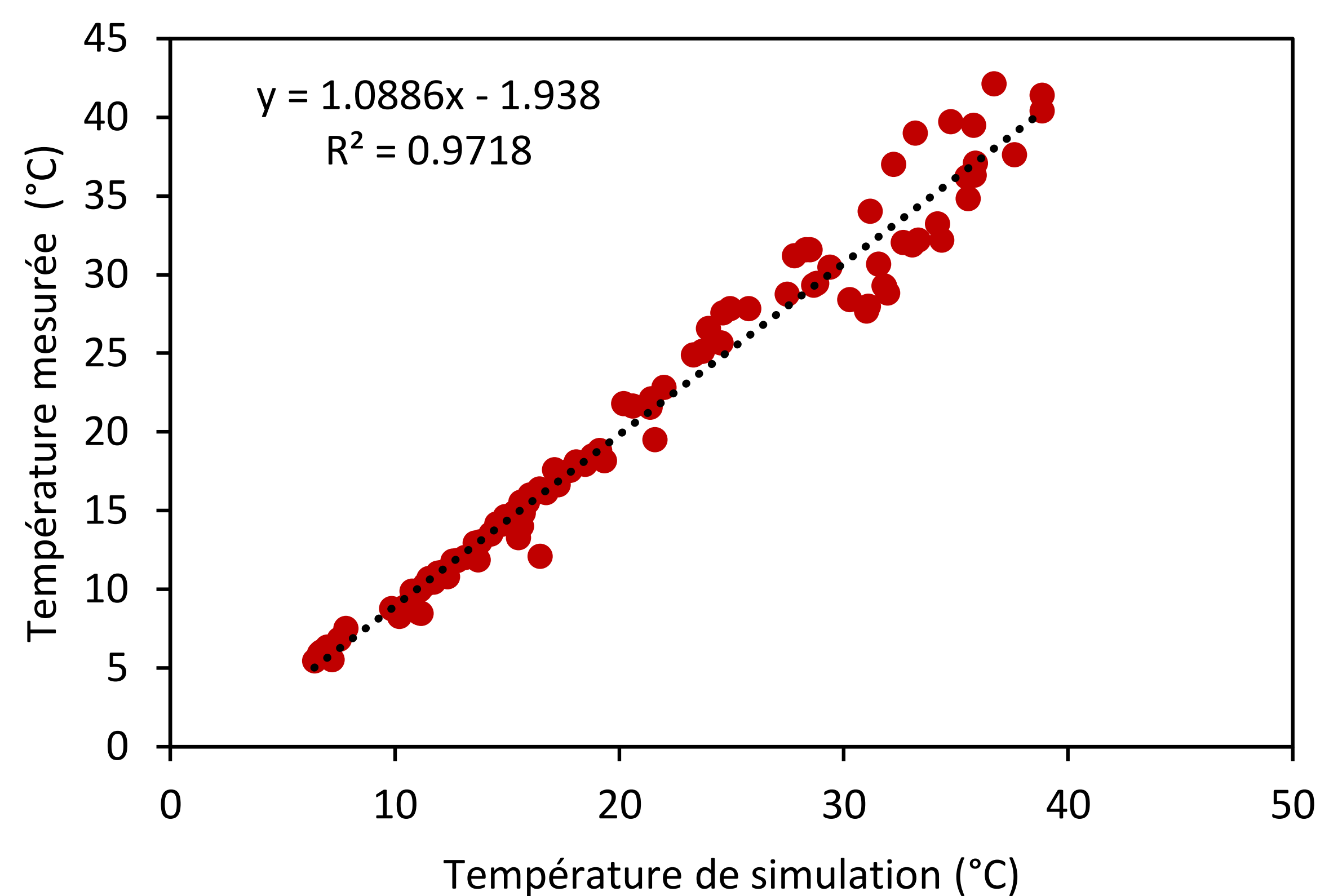


Figure 4 : Comparaison des valeurs simulées et mesurées de la température pour les surfaces Ouest.

Pour la surface EST du canyon :

La comparaison des valeurs moyennes des températures obtenues à l'aide du notre modèle avec celles des résultats expérimentaux de (Athamena 2012) et numériques de CFD (Athamena 2012) montre un bon accord (figure 5). Pour les surfaces de la face Est du canyon, l'erreur relative moyenne entre nos résultats et les résultats expérimentaux est d'environ 4.38 % et l'erreur absolue est de 0.92°C (figure n). Concernant le coefficient de régression R^2 , il est de 0,9789 entre nos résultats et les résultats expérimentaux (figure 6).

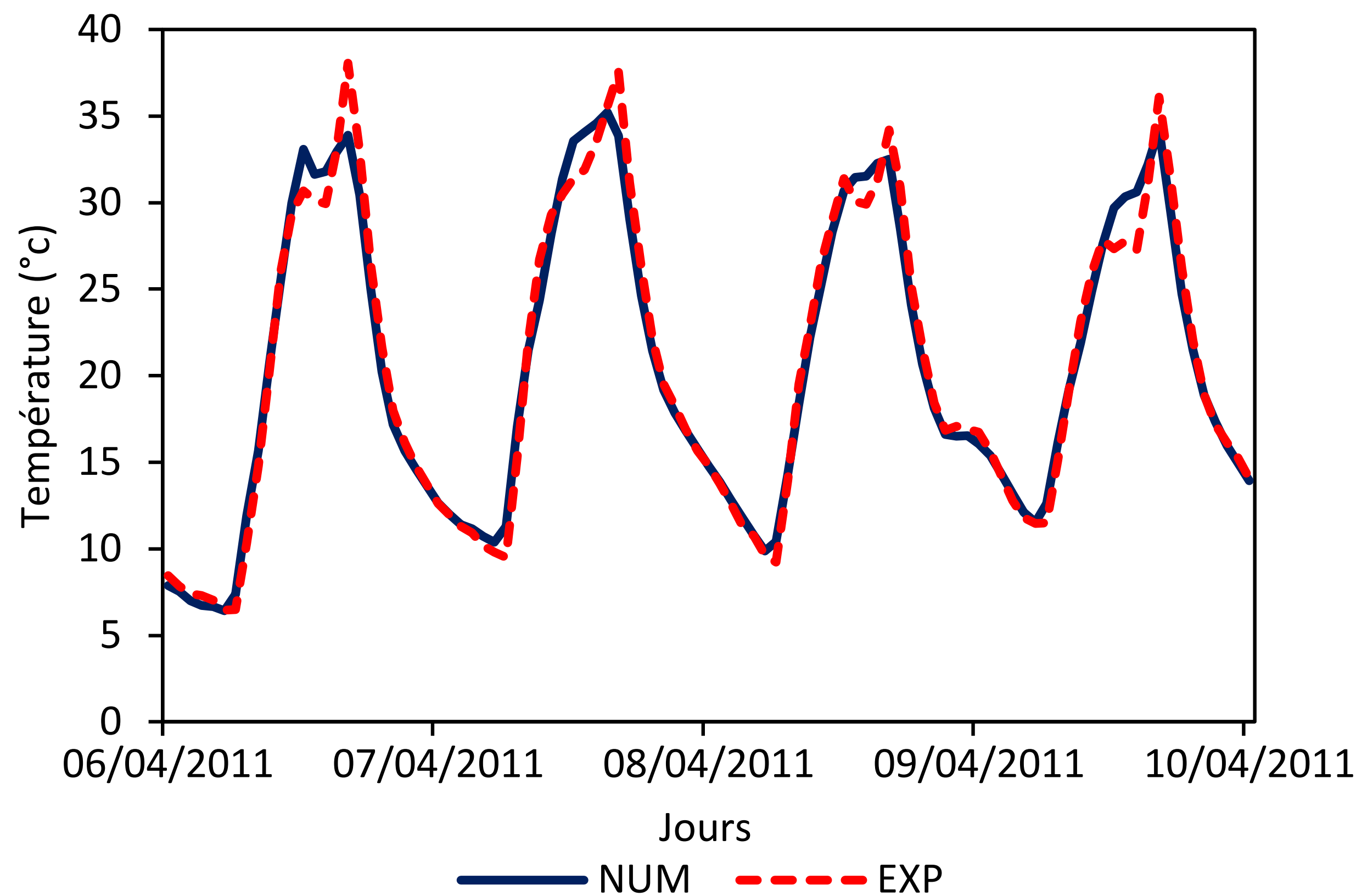


Figure 5 : Variation temporelle de la température des surfaces Est étudiées.

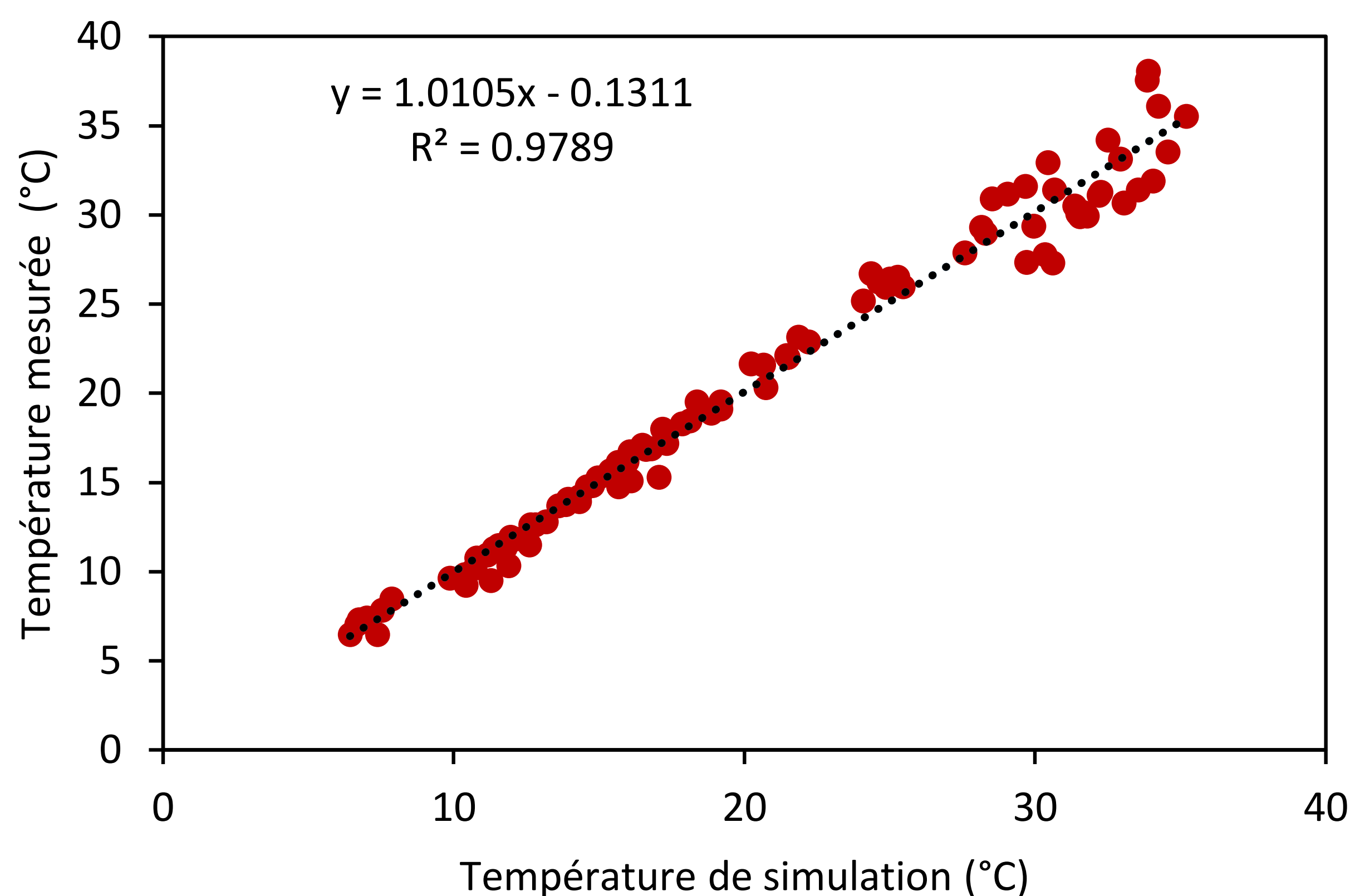


Figure 6 : Comparaison des valeurs simulées et mesurées de la température pour les surfaces Est.

Nous considérons que ces résultats valident la méthode et le modèle que nous avons développés. Par conséquent ils peuvent être appliqués à la modélisation énergétique des bâtiments et le microclimat urbain.

4. CONCLUSION

Dans cette étude, une approche simplifiée sous TRNSYS a été développée dans le but d'évaluer l'impact du microclimat urbain sur la demande énergétique des bâtiments. Cette approche prend en

considération les effets des vents dominants, l'ensoleillement et les inter-réflexions. Afin de vérifier la fiabilité du présent modèle, une étude comparative entre les résultats expérimentaux de la campagne de mesure EM2PAU et nos résultats numériques a été effectuée. Les résultats numériques obtenus sont proches des observations expérimentales avec une erreur absolue moyenne sur la température surfacique des parois extérieures d'environ 1.5°C et une erreur relative moyenne d'environ 8%. L'utilisation de cette méthode est intéressante pour son temps de calcul réduit par rapport à celui des calculs CFD tout en gardant une précision satisfaisante pour les objectifs d'évaluation thermique et énergétique.

5. BIBLIOGRAPHIE

- Athamena, Khaled. 2012. « Modélisation et simulation des microclimats urbains: Étude de l'impact de la morphologie urbaine sur le confort dans les espaces extérieurs. Cas des éco-quartiers ». Ecole Centrale de Nantes (ECN)(ECN)(ECN)(ECN).
- Bouyer, Julien. 2009. « Modélisation et simulation des microclimats urbains-Étude de l'impact de l'aménagement urbain sur les consommations énergétiques des bâtiments ». Université de Nantes.
- Bozonnet, Emmanuel, Rafik Belarbi, et Francis Allard. 2007. « Thermal Behaviour of buildings: modelling the impact of urban heat island ». *Journal of Harbin Institute of Technology (New Series)* 14 (Sup.): 19-22.
- Daviau-Pellegrin, Noëlie. 2016. « Modélisation fine des échanges thermiques entre les bâtiments et l'atmosphère urbaine ». Université PARIS-EST.
- Gebhart, B. 1961. « Surface temperature calculations in radiant surroundings of arbitrary complexity –for gray, diffuse radiation ». *Int. J. Heat Mass Transfer* 3: 341-46.
- Gros, Adrien, Petroula Alexaki, Emmanuel Bozonnet, et Christian Inard. 2013. « Influence of cool materials on building energy demand at district scale ». In *Energy conservation technologies for mitigation and adaptation in the built environment: the role of ventilation strategies and smart materials*, 1050-60. Athens, Greece.
- Klein, S.A., W.A. Beckman, J.W. Mitchell, J.A. Duffie, N.A. Duffie, T.L. Freeman, J.C. Mitchell, et al. 2010. *TRNSYS 17: A Transient System Simulation Program*. Madison, USA: Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin.
- Soulhac, Lionel, Richard J Perkins, et Pietro Salizzoni. 2008. « Flow in a Street Canyon for any External Wind Direction », 365-88. doi:10.1007/s10546-007-9238-x.
- Yang, Xiaoshan, Lihua Zhao, Michael Bruse, et Qinglin Meng. 2012. « An integrated simulation method for building energy performance assessment in urban environments ». *Energy & Buildings* 54. Elsevier B.V.: 243-51. doi:10.1016/j.enbuild.2012.07.042.

Optimisation des plans de mesure pour la garantie de performance énergétique

Antoine Caucheteux*^{1,2}, Fally Titikpina², Abderafi Charki², David Bigaud²

¹ Cerema Ouest, 23 Avenue de l'Amiral Chauvin, 49 136 Les Ponts de Cé, France

² Laris, EA7315 université d'Angers, 62 avenue Notre Dame du Lac, 49000 Angers

*antoine.caucheteux@cerema.fr

RESUME

Un processus de garantie de performance énergétique des bâtiments a pour objectif de garantir à l'utilisateur final d'un bâtiment une consommation d'énergie annuelle maîtrisée. Les objectifs de performance sont la plupart du temps définis lors de la conception du bâtiment, et vérifiés dans sa période d'exploitation. Cet article présente une méthode d'optimisation de plan de mesure pour la phase de vérification des performances. En effet, au-delà des consommations faisant l'objet de la garantie d'autres variables influant les consommations comme la météorologie, ou la température intérieure peuvent permettre d'ajuster la consommation garantie à l'usage réel du bâtiment. En s'appuyant sur l'estimation des incertitudes de mesures et de non mesure puis d'analyses de sensibilité et de propagation d'incertitudes, le cas étudié a permis de mettre en évidence que la mise en place de 4 paramètres mesurés a permis de diviser par 3 l'incertitude sur la consommation garantie.

MOTS-CLÉS : garantie de performance énergétique des bâtiments, plan de mesure et vérification, optimisation

ABSTRACT.

Energy performance contracting aims at ensuring building final users a controlled energy consumption. Target consumptions are usually defined in the design phase, while verified in building exploitation phase. This paper presents a methodology for optimising measure and verification plans. Indeed, if building energy consumptions have to be measured, some other influent parameters should also be measured in order to take climate variability or users confort willingness and use (indoor temperature for example) into account. Adjustments could then be done on guaranteed building consumption in connection with more realistic use of the building. The methodology is based on sensitivity analysis and uncertainty propagation using Monte Carlo. It needs a thorough analysis of input parameters uncertainty. 2 levels are considered according to whether the measurements are done or not. The case studied shows that the measure of 3 parameters should divide the guaranteed consumption uncertainty by 3.

KEYWORDS : Building energy performance contracting, measure and verification plan, optimisation.

1. INTRODUCTION

Un processus de garantie de performance énergétique des bâtiments a pour objectif de garantir à l'utilisateur final d'un bâtiment une consommation d'énergie annuelle maîtrisée. Les objectifs de performance sont la plupart du temps définis dans la période de conception du bâtiment et vérifiés dans la période d'exploitation. Pour cette vérification, des mesures doivent être mises en place. Selon le contrat, il s'agit à minima des consommations faisant l'objet de la garantie. Il peut également être choisi de mesurer d'autres variables influant les consommations comme la météorologie ou la

température intérieure. Ces variables permettront d'ajuster la consommation garantie, on parle alors de paramètre d'ajustement. La méthode générale d'un processus de garantie de performance est décrite par Ligier (Ligier et al 2017).

Dans cet article, il s'agit de proposer une méthode pour l'élaboration d'un plan de mesure et vérification (PMV) optimisé. Dans le contexte de garantie de performance énergétique, on utilise tout d'abord, dans la phase de conception du bâtiment, un modèle numérique de bâtiment et sa simulation thermique dynamique (STD). Une fois la conception du bâtiment arrêtée, on réalise alors une série de calculs visant à couvrir l'ensemble des conditions possibles auxquelles le bâtiment est susceptible d'être confronté. Pour cela, des méthodes d'analyse de sensibilité et d'incertitude sont utilisées. Il ne s'agit pas dans cet article de discuter de ces méthodes : la littérature à ce sujet est assez vaste [Macdonald 2002, Spitz 2013, Goffart 2013, Bontemps et al 2017]. Un des verrous majeurs des méthodes de propagation d'incertitude reste la caractérisation de l'incertitude des paramètres incertains. Or, établir un contrat de garantie de performance énergétique nécessite pour être viable de maîtriser au mieux ces incertitudes.

Dans cet article, il est proposé une méthode de définition et d'optimisation des plans de mesure, qui s'inscrit dans la méthode plus globale du processus de garantie de performance. La garantie porte sur le besoin de chauffage : énergie nécessaire pour assurer le confort thermique du bâtiment, indépendamment du système de production de chaleur installé.

2. METHODE

La méthode de définition et d'optimisation des plans de mesure, qui s'inscrit dans la méthode plus globale du processus de garantie de performance, suit les 7 étapes présentées ci après.

2.1. PARAMETRES D'AJUSTEMENTS POTENTIELS

Parmi les paramètres incertains d'un modèle, on peut distinguer des paramètres statiques (ou d'enveloppe) et des paramètres dynamiques. Les paramètres faisant l'objet d'un processus de garantie et pouvant être considérés comme paramètres d'ajustement sont de l'ordre des paramètres dynamiques : température intérieure, météorologie, occupation, etc... Certains paramètres plus statiques peuvent également être considérés comme des paramètres d'ajustement, même si ces paramètres peuvent faire l'objet de commissionnement ou de garantie à eux seuls : infiltration, débit de ventilation, rendement des échangeurs, etc...

2.2. DEFINITION DES INCERTITUDES

L'incertitude d'un paramètre se définit selon la loi de distribution statistique que sa valeur peut prendre (loi normale, loi uniforme, etc.) ainsi que selon les paramètres de cette loi (moyenne, écart type, bornes). On définit deux niveaux d'incertitudes : lorsque la mesure est effectuée (niveau bas) et lorsqu'elle ne l'est pas (niveau haut). La définition des incertitudes se, pour la non mesure sur des statistiques de valeurs observées (collectif Cerema 2016, Bailly 2016) données historiques de météorologie (Météo-France), etc.), et pour la mesure, on ne garde que l'incertitude de la mesure en elle-même, qui provient de deux sources : capteurs et échantillonnage. (Caucheteux et al 2017, Titikpina 2016). Dans ce travail, on ne s'intéresse qu'aux incertitudes systématiques. L'ensemble des valeurs (sur une année de calcul par exemple), est modifié de la même façon.

2.3. ANALYSE DE SENSIBILITE

L'objectif de l'analyse de sensibilité est de pouvoir classer les paramètres d'ajustement selon la sensibilité du modèle. On tient également compte dans cette analyse de sensibilité des autres paramètres incertains. La méthodologie employée ici est celle de Morris (Bontemps 2017) 50 trajectoires sont réalisées. On se basera sur le calcul de la moyenne des variations pour chaque paramètre (μ^*).

2.4. DEFINITIONS DES PLANS DE MESURE

Le premier plan de mesure est l'absence de mesure. Tous les paramètres d'ajustement présentent donc un niveau d'incertitude haut. On ajoute ensuite à chaque plan la mesure d'un nouveau paramètre, dans l'ordre défini par l'analyse de sensibilité. Son niveau d'incertitude passe alors de haut à bas.

2.5. PROPAGATION D'INCERTITUDE

La méthode utilisée dans cet article est la méthode de Monte Carlo avec tirage aléatoire pur selon la loi et les niveaux d'incertitudes pour l'ensemble des paramètres incertains (statiques et dynamique). Pour les séries temporelles, l'incertitude de chaque tirage est appliquée à l'ensemble des valeurs. On réalise 200 simulations. Le choix du nombre de tirage résulte d'un compromis entre précision des résultats et nombre de calcul. L'incertitude type obtenue correspond à l'écart type des consommations calculées sur les 200 échantillons. La théorie statistique montre que, en fonction de la taille de l'échantillon choisi, cet écart type suit une loi de Chi2. On élargit cette incertitude avec une probabilité de 95% pour tenir compte de l'incertitude due à l'échantillonnage.

2.6. CHOIX DU PLAN DE MESURE OPTIMUM

Le choix d'un optimum dépend du(es) critère(s) d'optimisation choisi(s). Ce peut être le coût d'instrumentation ou le niveau d'incertitude que l'on souhaite atteindre. Ce choix doit être discuté entre les différents acteurs impliqués dans le processus de garantie de performance.

En l'absence d'analyse économique, le critère retenu ici est le nombre de paramètres mesurés. On trace le niveau d'incertitude en fonction du nombre de paramètres d'ajustement retenus dans chaque plan de mesure.

2.7. DEFINITION DE LA CONSOMMATION GARANTIE ET REGLES D'AJUSTEMENT

Lors de la phase de conception, les mesures ne sont pas encore disponibles. On réalise les calculs avec des valeurs moyennes ou standards. On obtient pour chaque plan de mesure (PMV_i) une consommation garantie non ajustée ($C_{garantie-PMV_i}$) qui se calcule de la manière suivante (eq. 1) :

$$C_{garantie-PMV_i} = C_{moyenne\ PMV_i} + 2 * \sigma_{PMV_i} \quad (1)$$

Ce qui correspond à un risque de 2,5%. L'ajustement s'effectue sur la base du calcul déterministe : le calcul effectué avec les valeurs mesurées prévues par le plan de mesure correspondant ($C_{det-PMV_i}$). (eq 2) :

$$C_{ajustée-i} = C_{det-PMV_i} + 2 * \sigma_{PMV_i} \quad (2)$$

À noter que lorsque l'on injecte la température extérieure mesurée sans l'irradiation globale horizontale, on perd la corrélation qui peut exister entre ces 2 paramètres. On négligera cet effet, le calcul portant sur la valeur annuelle, on fait l'hypothèse que les erreurs potentielles se compensent.

3. CAS D'ETUDE

Le bâtiment Cerema (dit du CECP, Figure 1) est un bâtiment en R+1 construit en 2011/ 2012. Il est situé à Angers (49000). La hauteur de chaque étage est de 2,5m. Il est constitué d'environ 900 m² de bureaux et d'un atelier de 700 m². Ce bâtiment est de performance énergétique proche d'un Bâtiment Basse Consommation : le Cep calculé par la RT 2005 est de 55,33 kWh/m².an pour la zone atelier (non soumise à réglementation) et 53,59 pour la zone bureaux. Les systèmes installés sont : un système de boucle d'eau alimentant des radiateurs basse température équipés de robinets thermostatiques ; deux centrales de traitement d'air avec échangeur de chaleur de type double flux et cassette / radiateurs reliés à la boucle d'eau ; une VMC simple flux permanente pour évacuer l'air vicié des sanitaires, des locaux de ménage et des vestiaires.



Figure 1 : Vue 3D du bâtiment Cerema à Angers (dit du CECP)

Pour le suivi de ce bâtiment, ont été installés les points de mesurages suivants : station météorologique sur site (température, humidité relative, irradiation globale horizontale, vitesse et direction du vent), températures intérieures ambiantes dans la majeure partie des pièces, énergie calorifique en chaufferie pour chaque départ (pour chaque CTA, pour les radiateurs basse température de la partie bureau, etc.), énergie électrique pour chaque disjoncteur différentiel permettant de séparer les consommations d'éclairage, les consommations d'ECS, les consommations des prises de courants des bureaux, les consommations des auxiliaires. L'occupation, quant à elle, est évaluée grâce à des détecteurs de mouvement, des mesures de concentrations en CO₂, des capteurs d'ouverture des fenêtres, des luxmètres et des détecteurs de passage aux entrées et sorties du bâtiment. Le bâtiment dans son ensemble est modélisé sous TRNsys (Solar energy 2009). Il est divisé en 74 zones thermiques cohérentes avec le plan d'instrumentation mis en œuvre.

4. RESULTATS ET DISCUSSIONS

4.1. PARAMETRE CHOISIS ET INCERTITUDE ASSOCIEES

39 paramètres incertains ont été considérés, selon cinq catégories différentes : 4 paramètres liés au site concernant l'albédo et la météo. 23 paramètres sont liés au bâtiment : ce sont les paramètres liés aux propriétés physiques des éléments constituant les parois du bâtiment (conductivité, chaleur massique, masse volumique, émissivité, etc.) et les propriétés des fenêtres, ainsi que les ponts thermiques, les infiltrations et le débit de ventilation. 3 paramètres sont liés aux occupants, 3 paramètres liés à la modélisation : ce sont notamment les coefficients de convection des surfaces intérieures et extérieures. Enfin 4 paramètres sont liés aux équipements.

Pour les paramètres ne faisant pas l'objet d'un plan de mesure, l'hypothèse de travail est que l'incertitude ou la variation des caractéristiques des matériaux ou paramètres, résulte : de la variabilité intrinsèque des matériaux lorsqu'ils sont posés dans les règles de l'art (variabilité de fabrication), de la variabilité induite par la pose (compression de l'isolant, légères imperfection de pose, etc.), de la non possibilité de détection d'une imperfection (du matériaux ou de la pose) lors d'un suivi normal de chantier. 11 paramètres ont été retenus comme pouvant faire l'objet d'un ajustement de la consommation. Pour chacun d'eux, on évalue l'incertitude (loi statistique et caractéristique) dans le cas d'absence de mesure, et dans le cas de la mise en place d'une mesure. Le tableau 1 récapitule, pour chaque paramètre, la loi d'incertitude ainsi que ses caractéristiques pour les deux niveaux d'incertitudes.

Paramètre	Loi de distribution	Moyenne (valeur dans le projet)	Ecart-type	Borne inférieure	Borne supérieure
<i>Coefficient de perméabilité à l'air</i>	<i>Lognormale (mesure)</i>	<i>1,3 m³/hm²</i>	<i>Mean = 1,18 / sd = 0,21</i>		
	<i>Gamma (sans mesure)</i>	<i>1,3 m³/hm²</i>	<i>Shape = 2,93 / scale = 0,3</i>		
<i>rendement_CTA_Bur</i>	<i>Normale tronquée</i>	<i>76,2%</i>	<i>*0,05 / *0,029</i>	<i>*0,8</i>	<i>*1,2</i>
<i>Rdt_CTA_Sdr</i>	<i>Normale tronquée</i>	<i>89%</i>	<i>*0,05 / *0,029</i>	<i>*0,8</i>	<i>*1,2</i>
<i>deb_CTA_bur</i>	<i>Normale tronquée</i>	<i>1724 m³/h</i>	<i>*0,15 / *0,05</i>	<i>*0,8</i>	<i>*1,2</i>
<i>deb_CTA_sdr</i>	<i>Normale tronquée</i>	<i>550 m³/h</i>	<i>*0,15 / *0,05</i>	<i>*0,8</i>	<i>*1,2</i>
<i>Température extérieure</i>	<i>Normale tronquée</i>	<i>Fichier météo standard</i>	<i>1,72 K</i>	<i>-3 K</i>	<i>+3 K</i>
		<i>mesure sur site</i>	<i>0,62 K</i>	<i>-1.2 K</i>	<i>+1.2 K</i>
<i>Irradiation globale horizontale</i>	<i>Normale tronquée</i>	<i>Fichier météo standard</i>	<i>28 %</i>	<i>-50 %</i>	<i>+ 50%</i>
		<i>mesure sur site</i>	<i>2 %</i>		
<i>Vitesse du vent</i>	<i>Normale tronquée</i>	<i>Fichier météo standard</i>	<i>19 %</i>	<i>-50 %</i>	<i>+ 50%</i>
		<i>mesure sur site</i>	<i>12%</i>		
<i>Tint</i>	<i>Normale tronquée</i>	<i>Statistique</i>	<i>1,5 K</i>	<i>-3 K</i>	<i>+3 K</i>
		<i>Mesure</i>	<i>0,38 K</i>	<i>-1 K</i>	<i>+1 K</i>
<i>Apports Internes (hors occupant)</i>	<i>Normale tronquée</i>	<i>Statistique (9W/m2)</i>	<i>95%</i>	<i>-90%</i>	<i>+200%</i>
		<i>Mesure</i>	<i>15%</i>	<i>-30%</i>	<i>+30%</i>
<i>occupation</i>	<i>Normale tronquée</i>	<i>Statistique</i>	<i>30%</i>	<i>-60%</i>	<i>+60%</i>
		<i>Mesure</i>	<i>11%</i>		

Tableau 1 : lois d'incertitudes des paramètres pouvant faire l'objet d'un plan de mesure

4.2. ANALYSE DE SENSIBILITE

L'analyse est conduite sur 50 trajectoires de Morris, en combinant les paramètres statiques et les paramètres dynamiques. Sont extraits de cette analyse les indicateurs sur les paramètres qui pourraient être retenus pour les plans de mesure. La Figure 2 présente le classement des paramètres selon la moyenne (mustar : μ^*). On retrouve classiquement comme paramètres les plus influents, les températures intérieures et extérieures, les infiltrations, et les apports internes. Le modèle est moins sensible aux rendements et débits des CTA.

On utilise ce classement pour élaborer les plans de mesures et vérification (PMV) possibles, du PMV0 sans mesure au PMV 1 pour lequel on ajoute la mesure du paramètre auquel le modèle est le plus influent (ici la température intérieure), au PMV11, pour lequel on mesure les 11 paramètres.

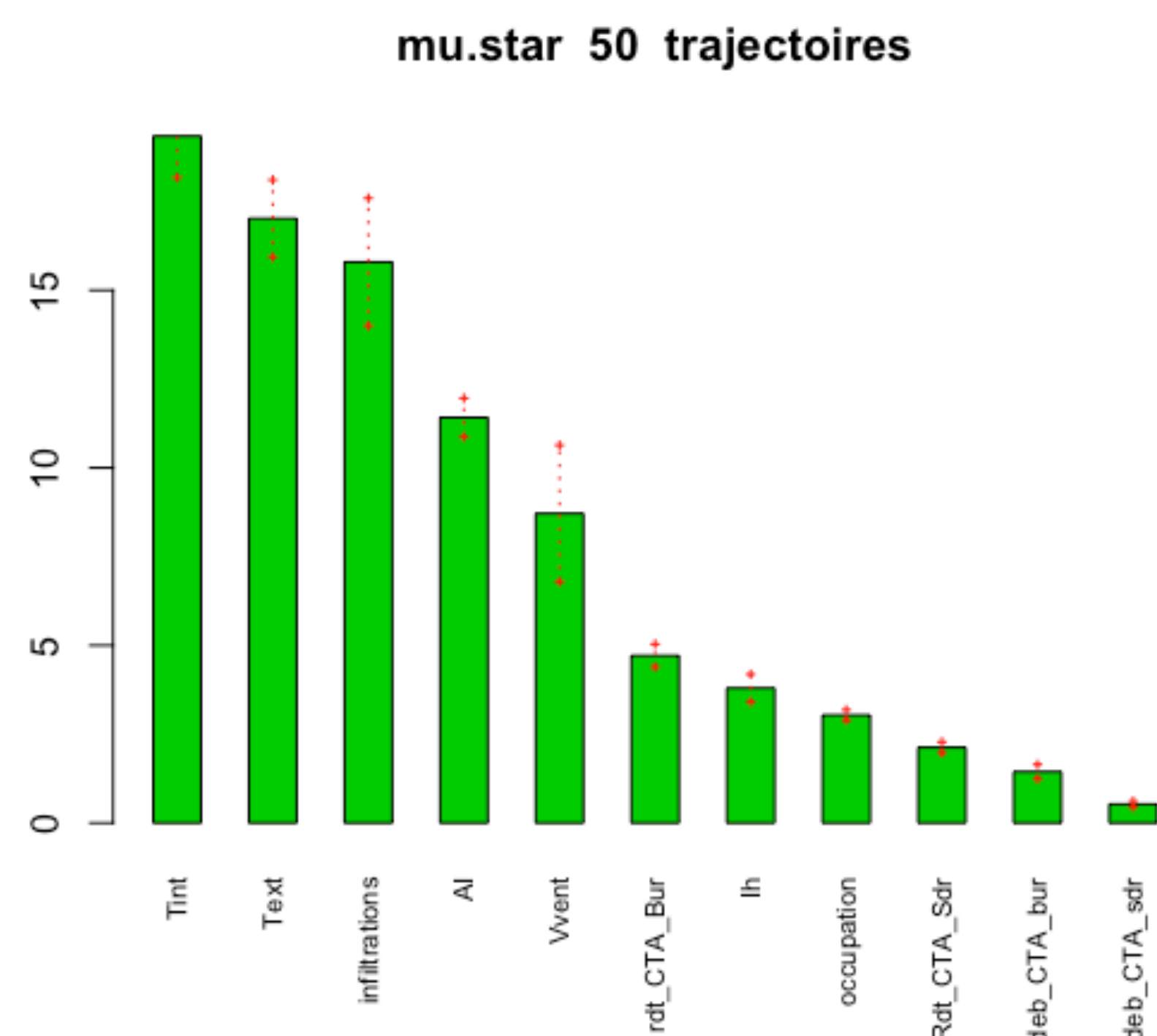


Figure 2 : Classement des effets des paramètres dynamiques sur la consommation annuelle, indice de sensibilité et incertitudes sur cet indice

4.3. PROPAGATION D'INCERTITUDE

On réalise la propagation d'incertitude sur l'ensemble des plans de mesure possibles (l'incertitude des paramètres est défini selon que la mesure est réalisée ou non). D'un plan de mesure au suivant, un seul paramètre passe d'une incertitude haute (sans mesure) à une incertitude basse (avec mesure). La figure 3 présente les incertitudes pour chaque plan de mesure, encadrées par l'incertitude due à l'échantillonnage (200 échantillons).

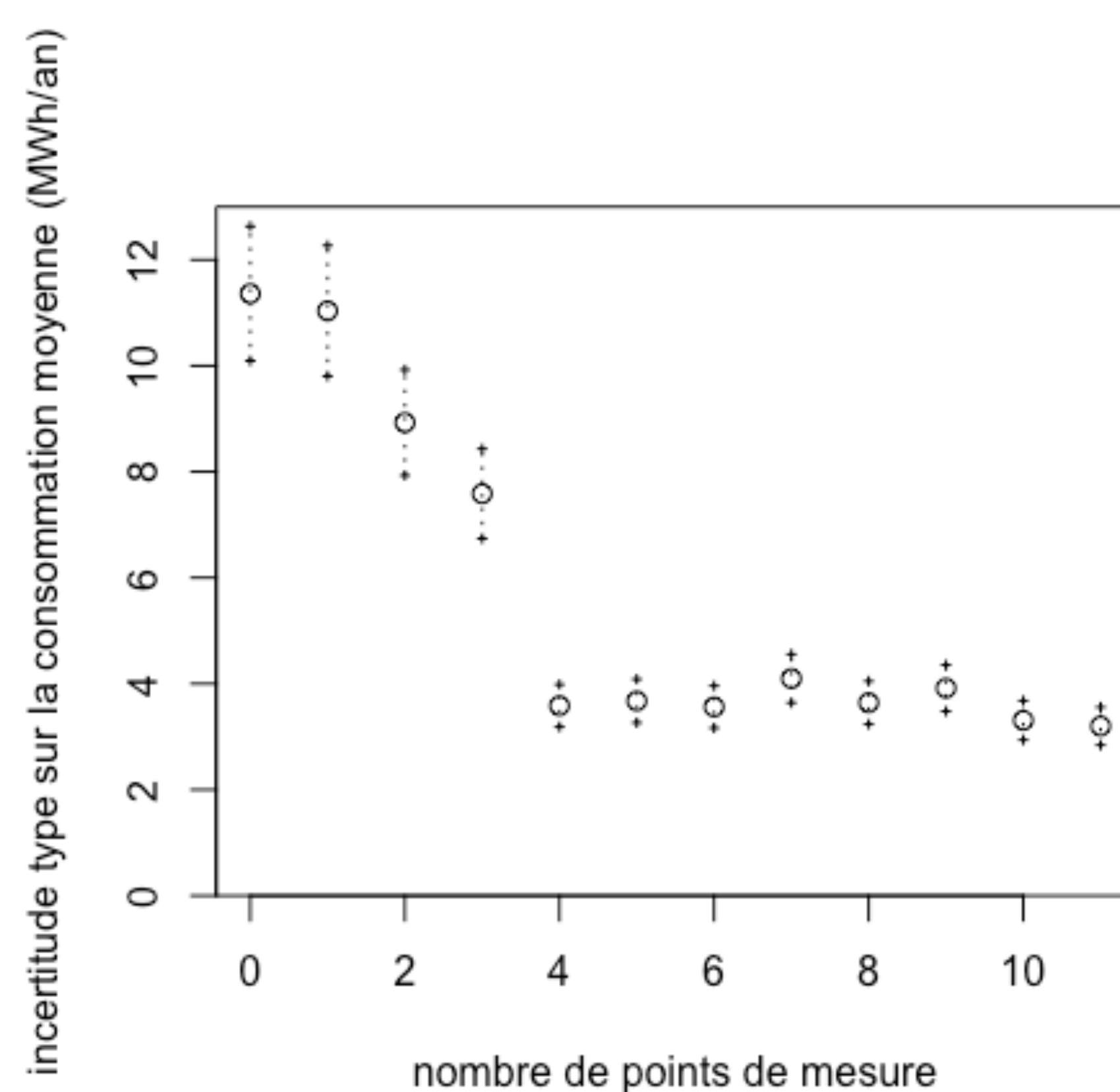


Figure 3 : Incertitude sur la consommation calculée en fonction du nombre de point de mesure

Pour la seule mesure de la température intérieure ou de la température extérieure, la réduction de l'incertitude est faible (12,3 et 12,2 pour 12,6). Celle-ci commence à être significative lorsque ces 2 paramètres sont mesurés conjointement (9,9). En effet, la consommation dépend de la différence entre température extérieure et intérieure (dT). Or l'incertitude sur dT dépend de celle sur la mesure des 2 températures, les variances s'ajoutent (eq.3) :

$$\sigma_{dT}^2 = \sigma_{Tint}^2 + \sigma_{Text}^2 \quad (3)$$

Soit, 2,3 lorsqu'il n'y a pas de mesure, 1,76 pour la température intérieure mesurée seule et 0,73 lorsque les deux températures sont mesurées. La réduction la plus importante est finalement sur

l'évaluation des apports internes (dans ce cas d'étude évalué par les consommations électriques, hors présence de l'occupant). À partir de la quatrième mesure, il semble que la moyenne et l'écart type se stabilisent. Les réductions des incertitudes d'un PMV à l'autre ne classent pas les paramètres dans le même ordre que pour l'analyse de sensibilité de Morris. Il pourrait être envisagé d'itérer la méthode en modifiant le classement.

4.4. AJUSTEMENT DE LA CONSOMMATION GARANTIE

Le tableau 2 présente les résultats des simulations TRNsys réalisées avec les paramètres ajustés, pour les PMV les plus représentatifs.

Nombre de points de mesures	Moyenne (MWh/an)	Ecart type élargi	Consommation garantie ajustée
0	27,9	12,6	53,1
1 - Tint	44,1	12,3	68,7
2 - Text	36,8	9,9	56,6
3 - Q4	36,7	8,4	53,5
4 - AI	45,2	4,2	53,6
11 – toutes mesures	42,8	3,6	50

Tableau 2 : Résultats de simulation, incertitudes et consommations garanties ajustées (MWh/an)

La consommation réelle étant de 35 MWh/an, soit 38,9 kWh/m².an, il n'y a aucun cas où l'on dépasse la consommation garantie. Pourtant, pour les apports internes, qui sont estimés d'après les consommations électriques, les valeurs mesurées sont de 60% inférieures à la valeur moyenne retenue initialement (soit en dehors des plages de variations attendues) ce qui engendre une surconsommation pour le chauffage. On notera que les valeurs garanties après ajustement sont supérieures à la valeur garantie sans ajustement jusqu'au plan de mesure 9. Les calculs déterministes pour tous les plans surestiment la consommation (le modèle n'a pas été calé).

5. CONCLUSION

La méthode présentée dans cet article permet d'optimiser les plans de mesure pour la mise en place d'un processus de garantie de performance. Le point clé est la bonne évaluation des incertitudes de mesure et de non mesure. Dans le cas d'étude présenté, la mise en place de 4 mesures (températures intérieure et extérieure, perméabilité à l'air et apports internes) a permis la réduction d'un facteur 3 de l'incertitude sur le besoin de chauffage. La consommation réelle était bien dans la plage garantie, quel que soit le plan de mesure. Pourtant, certaines incertitudes n'ont pas été prises en compte : les consommations mesurées, les incertitudes dues à construction du modèle numérique (dans cette étude, la cohérence du modèle a pu être validée puisque l'étude a été réalisée après la mesure). Ce cas d'étude nous enseigne que la seule mesure de la température intérieure ou de la température extérieure n'est pas efficace, il est important de disposer des deux mesures conjointement.

La méthode présente quelques pistes d'améliorations. Tout d'abord il semble nécessaire d'évaluer la part d'incertitude contenue dans la non prise en compte de la corrélation entre la température extérieure et l'irradiation (cf. Ligier2017). D'un point de vue opérationnel, il pourrait être envisagé d'utiliser des méthodes de screening plus efficaces comme l'hypercube latin, et d'optimiser le nombre

de trajectoires nécessaires à l'analyse de sensibilité. Il s'agit ensuite d'affiner les incertitudes de non mesure (par la prise en compte de données statistiques de plus grande ampleur) ainsi que l'évaluation des incertitudes de mesure selon la façon dont le paramètre est mesuré. Par exemple pour la température extérieure, s'agit-il d'une sonde sur site, sur un autre site ou de données officielles pour une ville ? Pour la température intérieure, le nombre de capteurs installés a une influence sur l'incertitude. On pourrait aussi se contenter d'une information sur les températures de consigne... Enfin, Une méthode itérative pourrait être utilisée pour prendre en compte le classement des paramètres par la réduction de l'incertitude sur la consommation apportée par leur mesure.

6. ACKNOWLEDGEMENT

Une partie de ces travaux a été financé par l'Agence Nationale de la Recherche, dans le cadre du projet OMEGA (Appel à Projet Ville et Bâtiments durable 2013).

7. REFERENCES

- Bailly Adeline, Guyot Gaelle, Leprince Valérie, 2016 « Analyses of about 90 000 Airtightness Measurements Performed in France on Residential and Non-Residential Buildings from 2008 to 2014 », Proceedings IAQ 2016 Defining Indoor Air Quality: Policy, Standards and Best Practices Co-Organized by ASHRAE and AIVC
- Bontemps, Stéphanie, Laurent Mora, Charles Garnier et Bruno Peuportier, 2017 « Projet OMEGA, rapport de la tâche 2 : Analyse de sensibilité et propagation d'incertitude », rapport du projet OMEGA, financé par l'ANR, 2017.
- Caucheteux Antoine, Fally Titikpina et al, 2017 “Projet OMEGA, rapport sur les mesures, protocoles et incertitudes”, rapport du projet OMEGA financé par l'ANR, (programme ville et bâtiment durable, édition 2013), 2017.
- Coackley, D., Raftery, P., Keane, M., 2014. A review of methods to match building energy simulation models to measured data. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 37, 123–141.
- Collectif Cerema 2016 « Bâtiment démonstrateurs à basse consommation d'énergie, enseignements opérationnels tirés de 60 constructions et rénovations du programme Prebat 2012-2015 » Cerema, collection connaissance février 2016.
- Daly, D., Cooper, P., Ma, Z., 2014. Understanding the risk and uncertainties introduced by common assumptions in energy simulations for Australian commercial buildings. *Energy and Buildings* 75, 382–393
- Goffart Jeanne . 2013, « Impact de la variabilité des données météorologiques sur une maison basse consommation. Application des analyses de sensibilité pour les entrées temporelles ». PhD thesis, Université de Grenoble, 2013.
- Ligier Simon, Robillard Maxime, Schalbart Patrick, Peuportier Bruno, 2017 « Energy performance contracting Based upon simulation and measurement », Proceeding of the 15th IBPSA Conference, San Francisco, CA, USA, AUG 7-9 2017
- MacDonald I.A. Quantifying the effects of uncertainty in building simulation, University of Strathclyde, Glasgow, 2002 (phd thesis)
- Solar-Energy, 2009. TRNsys v17 a TRaNsient System Simulation program. TRNsys (version 17), a TRaNsient System Simulation program, Solar Energy 2009-2010,
- Spitz, Clara, 2012. « Analyse de la fiabilité des outils de simulation et des incertitudes de métrologie appliquée à l'efficacité énergétique des bâtiments. » Phd thesis, Université de Grenoble.
- Titikpina, Fally. 2016. « Optimisation des plans de mesure dans un contexte de garantie de performance énergétique des bâtiments ». Thèse de doctorat, Université d'Angers.

Optimisation multicritère et analyse de cycle de vie de bâtiments zéro-énergie

Mija Frossard*¹, Bruno Peuportier¹, Patrick Schalbart¹

¹ MINES ParisTech – PSL Research University
CES (Centre efficacité énergétique des systèmes)
60 boulevard Saint-Michel, F-75272 Paris Cedex 06
*mija.frossard@mines-paristech.fr

RESUME. L'article présente une méthode d'optimisation multicritère (critères de consommation d'énergie finale et de coût d'investissement relatif) basée sur un algorithme génétique NSGA-II couplé à un modèle de simulation énergétique dynamique (COMFIE). La méthode est appliquée à un cas d'étude de type maison passive situé en Bulgarie, dans le cadre du projet européen AZEB (Affordable zero energy building), afin de déterminer des solutions zéro-énergie à moindre coût d'investissement. Des conceptions de différents niveaux de performance sont identifiées au sein du front de Pareto dont les impacts environnementaux sont évalués par analyse de cycle de vie (ACV, Eguer). Les résultats montrent que pour identifier des solutions à énergie positive efficaces en termes de coûts et d'impacts environnementaux et éviter d'aboutir à des conceptions sous-optimales, il est recommandé d'intégrer à l'algorithme d'optimisation une fonction objectif tirée de l'ACV ou de compléter l'optimisation par une étude ACV.

MOTS-CLÉS : optimisation multicritère, analyse de cycle de vie, bâtiment zéro-énergie

ABSTRACT. This article presents a multicriteria optimization method (criteria of final energy consumption and relative investment costs) based on a genetic algorithm (NSGA-II) coupled with a building performance simulation model (COMFIE). The optimization is applied to a passive house case study based in Bulgaria in the frame of from the european project AZEB (Affordable zero energy building). Designs from different levels of performance have been identified among the Pareto-optimal front and life cycle analysis (LCA, Eguer) has been applied to assess their environmental impacts. LCA results analysis steer a recommendation to include an LCA objective function in the optimisation process or to complete optimisation study with LCA in order to identify energy plus solutions that are efficient in terms of cost and environmental impacts, and in order to avoid sub-optimal designs.

KEYWORDS : multicriteria optimization, life cycle assessment, zero-energy building

1. INTRODUCTION

La « Directive européenne sur la performance énergétique des bâtiment » de 2010 énonce l'objectif de bâtiments neufs « quasi zéro-énergie » à l'horizon 2020 dans tous les pays de l'UE (European Parliament and Council of the European Union 2010). Le concept de bâtiment zéro-énergie repose sur un bilan énergétique annuel net qui soit nul et sur la capacité du bâtiment à produire de l'énergie qui sera réinjectée sur le réseau. Afin de limiter le surcoût de construction des bâtiments zéro-énergie, il est nécessaire de développer des outils d'aide à la décision capables d'identifier les solutions de conception les plus économiques pour chaque cas unique de bâtiment parmi un large éventail de possibilités techniques. L'optimisation multicritère couplée à un modèle de simulation énergétique du bâtiment permet de minimiser la consommation énergétique finale annuelle nette et le coût de

construction en explorant un vaste espace de recherche de manière rapide et automatisée, apportant un gain de temps et d'efficacité au concepteur. Néanmoins il est important d'intégrer l'utilisation d'outils d'ACV afin de vérifier l'efficacité du rapport entre coûts d'investissement et impacts environnementaux de la conception identifiée, notamment lorsque la procédure de conception est principalement guidé par la performance énergétique.

La méthode est appliquée à un cas d'étude de type maison passive situé en Bulgarie. L'objectif est d'établir, à partir des résultats d'optimisation, des recommandations de conception pour que le cas de base atteigne un niveau zéro-énergie pour un surcoût d'investissement minimal. Une étude ACV est réalisée afin de vérifier que l'optimisation multicritère en énergie et en coût est cohérente avec l'objectif de réduire les impacts environnementaux du bâtiment. Différentes solutions de référence sont identifiées parmi le front de Pareto résultant de l'optimisation et leurs impacts sont comparés par diagramme radar. En conclusion des recommandations sont données quant à la nécessité d'utiliser l'outil ACV en optimisation ou, de manière générale, en conception de bâtiments zéro-énergie et à énergie positive.

2. METHODOLOGIE

2.1. ALGORITHME D'OPTIMISATION NSGA-II

L'algorithme NSGA-II développé par Deb et al. (2002) fait parti de la famille des algorithmes génétiques. Les algorithmes génétiques sont des algorithmes d'optimisation méta-heuristique qui s'inspirent de la théorie Darwinienne de l'évolution. Le processus est itératif et consiste à faire évoluer, de génération en génération, une population de solutions. NSGA-II a la particularité d'être élitiste : les individus sont évalués et classés selon leur niveau de dominance sur les fonctions objectifs et les solutions non-dominées sont sélectionnées pour établir la génération suivante. Des opérateurs de croisement et de mutation sont appliqués pour renouveler la population à chaque génération et converger vers les solutions optimales du problème tout en diversifiant l'exploration de l'espace de recherche. La gestion de multiples fonctions objectifs en optimisation implique de résoudre des objectifs parfois contradictoires. Cet aspect est géré dans l'algorithme NSGA-II par le concept de dominance des solutions qui permet de conserver le caractère réellement multi-objectif du problème en ne procédant pas à une agrégation pondérée des fonctions objectifs en une seule fonction objectif globale (Evins, 2013). Un front de Pareto des solutions optimales non-dominées, couvrant l'ensemble des compromis de performances sur toutes les fonctions objectifs est déterminé à l'issue du processus d'optimisation.

L'algorithme NSGA-II est implémenté dans l'outil *Amapola* lié au logiciel *Pléiades*. Développé par l'équipe *Kocliko*¹, le module d'optimisation *d'Amapola* repose sur les travaux de Recht (2016) sur l'optimisation par algorithme génétique appliquée à l'éco-conception de bâtiment à énergie positive.

2.2. MODELE DE SIMULATION ENERGETIQUE DYNAMIQUE COMFIE

Le modèle de simulation énergétique dynamique (SED) utilisé est COMFIE (Bruno Peuportier et Blanc-Sommereux 1990). Dans ce modèle le bâtiment est divisé en zones thermiques, ces zones sont considérées à température opérative homogène. Un maillage par discrétisation en volumes finis est

¹ <http://www.kocliko.co/>

réalisé. Pour chaque zone les murs sont découpés en mailles suffisamment fines pour être à température homogène et une maille supplémentaire regroupe le volume d'air, le mobilier et les cloisons intérieures. Un bilan thermique est appliqué à chaque maille, ce qui peut être représenté au niveau de la zone par un système linéaire continu et invariant. Une méthode de réduction modale est utilisée afin de réduire les temps de calcul. Les systèmes matriciels réduits de chaque zone sont regroupés par une procédure de couplage. Les sorties à chaque pas de temps sont calculées en fonctions des sollicitations intérieures (émissions de chaleur des occupants et des équipements) et extérieures (température extérieure, rayonnement solaire) du bâtiment. Les phénomènes non linéaires (ventilation) ou les paramètres variables (résistance supplémentaire liée aux occultations) sont pris en compte par correction du vecteur des sollicitations. Le modèle a été validé *via* la procédure internationale BESTEST de comparaison numérique des modèles référence (Judkoff et Neymark 1995, 2013) et sa fiabilité a été plusieurs fois étudiée dans le contexte particulier de bâtiments à haute performance (Brun et al. 2009 ; Munaretto et al. 2013 ; Recht et al. 2014).

La surcouche logicielle *Pléiades* réalise l'interfaçage entre l'algorithme d'optimisation et le moteur de calcul COMFIE. Après avoir réalisé le croisement et généré la composition de la génération suivante, l'algorithme d'optimisation transmet à *Pléiades* les données de conception des solutions à faire évaluer par COMFIE. Les coûts d'une variante sont calculés dans *Pléiades* à partir des données de coûts indiqués par l'utilisateur chaque composant. Les résultats de simulation issus du modèle et les coûts sont transmis à l'algorithme d'optimisation qui évalue et classe les solutions sur les fonctions objectifs.

2.3. ANALYSE DE CYCLE DE VIE

L'analyse de cycle de vie est une méthode normalisée d'évaluation et de comparaison des impacts environnementaux de produits, systèmes ou services ayant la même unité fonctionnelle. Cette approche holistique et multicritère vise à quantifier les impacts d'un produit à partir d'un inventaire de cycle de vie. Cet inventaire répertorie l'ensemble des substances extraites et émises dans la biosphère à toutes les étapes du cycle de vie du produit : de la production à la fin de vie, en passant par la phase d'utilisation. Les impacts sont évalués à travers le calcul d'indicateurs environnementaux qui font le lien entre les substances de l'inventaire et des catégories d'impacts sur l'environnement et la santé humaine. Equer est un outil d'ACV des bâtiments et des quartiers (Polster 1995 ; Popovici 2005) dont la fiabilité a été étudiée par inter-comparaison avec d'autres d'outils ACV (Peuportier et al. 2004 ; Salmon et al. 2011). Dans un bâtiment conventionnel, la majeure partie des impacts environnementaux provient de la phase d'utilisation notamment à cause de la longue durée de vie de celui-ci. Les impacts et les flux liés à cette phase d'utilisation doivent donc être évalués de manière précise à travers la simulation par un modèle de SED performant. Pour assurer une évaluation fiable des impacts liés à la consommation d'énergie en phase d'utilisation, Equer est couplé au modèle de SED COMFIE. Le couplage consiste à transférer les simulations de consommation, la géométrie et les données de construction depuis COMFIE vers l'inventaire constitué par Equer. D'autres informations sont saisies par l'utilisateur : consommations d'eau, production de déchets ménagers, choix des fiches d'impacts des procédés, de la fabrication des composants et des fins de vie. Ces fiches proviennent de la base de donnéesecoinvent v2.2 (Frischknecht 1998). Enfin, les impacts du bâtiment sont calculés selon 12 indicateurs environnementaux.

3. ÉTUDE DE CAS

3.1. PRESENTATION GENERALE

Le bâtiment résidentiel étudié est certifié Maison Passive. Situé en Bulgarie, il a été fourni par le constructeur Bulgare Oberon, partenaire dans le cadre du projet européen AZEB (*Affordable Zero-Energy Building*). Ce projet vise à mettre au point une méthodologie permettant la conception, la rénovation et le suivi de bâtiment zéro-énergie à moindre coût. Le cas d'étude présente un intérêt particulier car il est certifié selon la référence internationale passive. Des leviers de réduction des impacts environnementaux peuvent être identifiés pour un type de bâtiment déjà très performant.

Dans un premier temps les fonctions objectives choisies pour l'optimisation sont les suivantes : la minimisation du bilan annuel net d'électricité (la consommation énergétique n'est constituée que d'électricité) et la minimisation du coût d'investissement. Des données météo bulgares de l'année 1995 sont utilisées et la course du soleil est simulée pour les coordonnées géographiques réelles du bâtiment. Le modèle est divisé en quatre zones dont deux zones chauffées : une zone « Jour » chauffée à une température moyenne de 20,3°C et une zone « Nuit » chauffée à une température moyenne de 19,6°C. Les scénarios de consigne de température, d'occupation, de consommation d'ECS et d'électricité spécifique sont générés par un modèle stochastique d'occupation développé par Vorger (2014) et implémenté dans le logiciel *Amapola*. Le modèle a été calibré sur les données de l'Enquête Emploi du Temps de l'INSEE² et génère des scénarios d'usages détaillés et réalistes. L'occupation est considérée pour une famille de quatre personnes.



Figure 1 - Maquette 3D du cas d'étude. Maison Passive située en Bulgarie (source : Oberon)

3.2. ESPACE DE RECHERCHE

Les variables de conception explorées sont indiquées en Tableau 1. Dans le cas de base, toutes les parois donnant sur l'extérieur ou sur une zone non chauffée ont une épaisseur d'isolant de 25 cm. Cela concerne neuf types de parois différentes : plancher sur terre-plein, plancher sur vide sanitaire, toiture terrasse en RDC, mur donnant sur une pièce non chauffée (vide sanitaire, garage), mur extérieur,

² <https://www.insee.fr/fr/statistiques/2118074>

plancher des combles, mur extérieur des combles. Toutes les fenêtres du cas de base sont en triple vitrage. Afin de réduire les dimensions de l'espace de recherche et de respecter une certaine cohérence architecturale dans les types de vitrage proposés au constructeur, les fenêtres ont été rassemblées par orientation, niveau et zone thermique. Le nombre de fenêtres à faire varier dans l'optimisation passe ainsi de quatorze à neuf. Une surface de panneaux solaires photovoltaïques de 33 m² est installée en toiture orientée Sud. La borne supérieure de variation de la surface photovoltaïque est définie par rapport à la surface de toiture disponible de 63 m².

Les données de coûts sont définies pour chaque valeur possible des paramètres de conception et permettent d'évaluer le surcoût par rapport à la variante initiale. Ces données de coûts sont fournies par le constructeur et sont confidentielles.

Tableau 1 - Espace de recherche de l'optimisation

Élément : paramètre	Nombre	Valeur de base	Espace de recherche	Unité
Parois extérieures et sur LNC : épaisseur d'isolant	7	25 cm	[10, 15, 20, 25, 30, 35]	cm
Fenêtres : Type de vitrage	9	Triple vitrage	[Double vitrage, Triple vitrage]	-
Fenêtres : surface de chaque fenêtre	9	Base	[-10%, base, +10%]	m ²
Panneau solaire PV : surface totale	1	33 m ²	[25, 33, 40, 50, 60]	m ²

3.3. HYPOTHESES DE L'ANALYSE DE CYCLE DE VIE

L'unité fonctionnelle considérée est 1 m² de logement d'une maison résidentielle bulgare habitée par 4 occupants pendant 80 ans correspondant au standard de confort thermique de la maison passive (taux d'inconfort sur l'année < 10 %). Les équipements sont remplacés tous les 20 ans, les menuiseries sont remplacées tous les 30 ans. Le mix électrique considéré est le mix moyen bulgare de 2015, basé sur les données provenant du site internet de l'Agence Internationale de l'Energie (IEA)³. Le chauffage est assuré par une pompe à chaleur électrique. L'ECS est fournie par 4 m² de capteurs solaires thermiques dont l'appoint est assuré par de l'électricité. La consommation moyenne d'eau froide, la production de déchets ménagers et le transport des occupants ne sont pas considérés car ils ne sont pas influencés par l'espace de recherche de l'optimisation. Les fins de vie considérées sont le recyclage des métaux et l'incinération du bois, des fenêtres et des isolants. Le reste des composants est considéré comme déchets inertes en fin de vie.

4. RESULTATS

4.1. RESULTATS DE L'OPTIMISATION

Des solutions de référence sont identifiées dans le front de Pareto (Figure 2) : le cas de base (bleu), la solution de même performances énergétique que le cas de base à coût optimisé (jaune) ; une

³ <https://www.iea.org/statistics/statisticssearch/report/?country=Bulgaria&product=electricityandheat>

solution zéro-énergie (vert foncé) ; la solution à énergie positive la plus performante énergétiquement (rouge). Les caractéristiques des solutions de référence sont indiquées en Tableau 2 - Caractéristiques des solutions de référence.

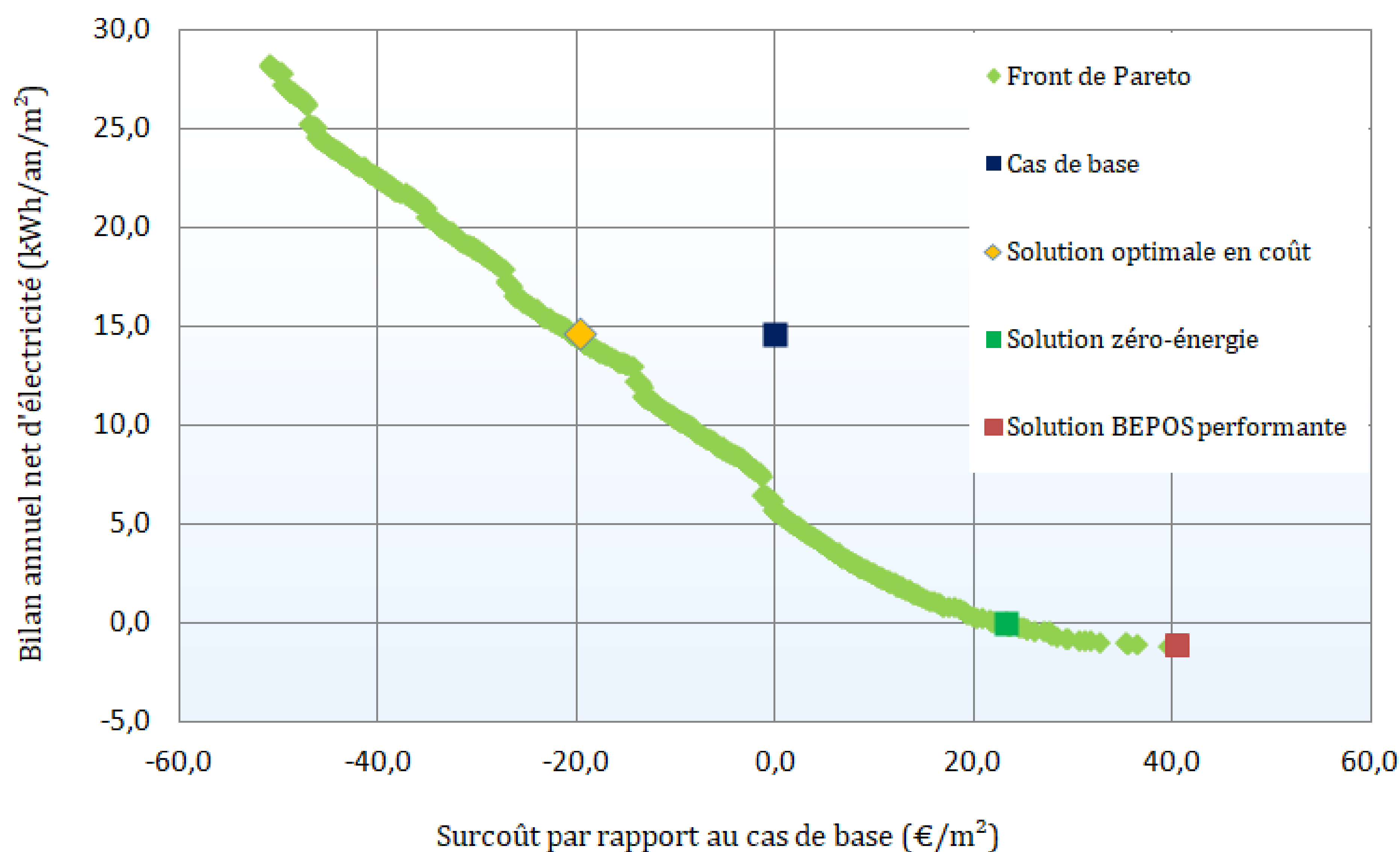


Figure 2 - Front de Pareto et solutions de référence sélectionnées

Tableau 2 - Caractéristiques des solutions de référence

Variante	Bilan net annuel d'élec (kWh/m²/an)	Surcoût / cas de base (€/m²)	Besoins chauffage (kWh/m²)	Épaisseur isolant (cm)	Taux triple vitrage (%)	Surface PV (m²)	Surface de fenêtre / cas de base (%)
Cas de base	14,6	0	13	25	100	33	-
Coût optimale	14,7	-19,7	23	Min : 10 Max : 20	10	40	-9
Zéro-énergie	0	23,4	14	Min : 10 Max : 25	99	60	-9
BEPOS performante	-1,1	40,4	11	Min : 20 Max : 35	100	60	-9

Par rapport au cas de base (bleu), son homologue énergétique à moindre coûts (jaune) implique une réduction globale des épaisseurs d'isolants, la réduction des surfaces de fenêtres et leur passage en double vitrage afin de réduire les coûts liés à l'enveloppe. Ceci induit une augmentation des besoins de chauffage qui est compensée par l'installation de 7 m² supplémentaire de panneaux solaires photovoltaïques. Les caractéristiques d'enveloppe des solutions zéro-énergie (vert foncé) et BEPOS (rouge) montrent que le cas de base est sous-optimal à cause de parois inutilement sur-isolées et de

surfaces de fenêtres légèrement surdimensionnées. La réduction des surfaces des fenêtres diminue les besoins de chauffage et les coûts de construction liés à l'enveloppe. C'est ainsi que les solutions zéro-énergie et BEPOS, si elles présentent globalement moins d'épaisseurs d'isolant, conservent des besoins de chauffage proches du cas de base, voire réduits. Enfin, le surcoût de construction est investi dans une plus grande surface de solaire PV dont la production permet d'atteindre l'objectif zéro-énergie et l'énergie positive.

4.2. RESULTATS DE L'ACV

Les figures ci-dessous Figure 3 – Comparaison des impacts des variantes de référence sur leur cycle de vie présentent les comparaisons des impacts environnementaux sur leur cycle de vie des différentes variantes de référence. Tout d'abord, les résultats montrent que la variante passive optimale en coûts (jaune) a des impacts environnementaux équivalents à ceux du cas de base (bleu). Les différences d'impacts entre les phases respectives de construction et de rénovation se compensent sur le cycle de vie malgré des différences dans les taux d'isolation d'enveloppe et les surfaces de panneaux solaires. Les phases d'utilisation sont équivalentes en raison de bilans énergétiques nets identiques : les impacts liés à l'augmentation de la consommation d'électricité sont compensés par la production d'électricité des panneaux PV injectée sur le réseau. La comparaison entre le cas de base (bleu) et la solution zéro-énergie (vert foncé) montre qu'une réduction du bilan énergétique grâce à l'installation de panneaux PV supplémentaires permet une forte réduction des impacts sur le cycle de vie (-30 % d'émissions de CO₂ eq.) malgré l'augmentation des impacts liés aux remplacements des panneaux PV. Les impacts des phases de construction et de démolition des deux variantes sont proches. Enfin, la comparaison entre la variante zéro-énergie (vert foncé) et la variante BEPOS la plus performante (rouge) indique des impacts proches sur de nombreux indicateurs.

5. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Une optimisation multicritère a été appliquée à une maison passive afin d'identifier les leviers de réduction des coûts pour une performance passive identique et des variantes de référence : la variante zéro-énergie optimale et la variante BEPOS optimale la plus performante énergétiquement. Les variantes de référence ont ensuite été évaluées par analyse de cycle de vie.

Des recommandations de conception peuvent être tirées de l'analyse des résultats d'optimisation de ce cas d'étude. D'abord, il est important de définir les épaisseurs d'isolants suivant les types de parois pour éviter une sur-utilisation inutile de matériaux. Par ailleurs, il est important d'identifier des surfaces et types de fenêtres optimales en fonction de la morphologie du bâtiment. De manière générale, il existe un équilibre énergétique optimal entre performance énergétique de l'enveloppe et production *via* les panneaux photovoltaïques. Cet équilibre optimal peut être identifié au moyen d'un algorithme d'optimisation pour assurer la conception d'un bâtiment zéro-énergie optimal.

Les résultats ACV des variantes de référence montrent que la pratique de l'optimisation visant à réduire la consommation d'énergie finale et les coûts d'investissement permet d'évoluer vers des solutions zéro-énergie à plus faibles impacts environnementaux. En revanche, les impacts de la variante « BEPOS la plus performante énergétiquement » sont égaux, voire supérieurs, aux impacts de la variante « zéro-énergie ». Une conclusion peut être tirée de ce résultat : concentrer l'optimisation sur les performances énergétiques risque d'aboutir à des solutions à énergie positive sous-optimales sur les critères environnementaux. Or, la motivation derrière la construction de bâtiments à haute

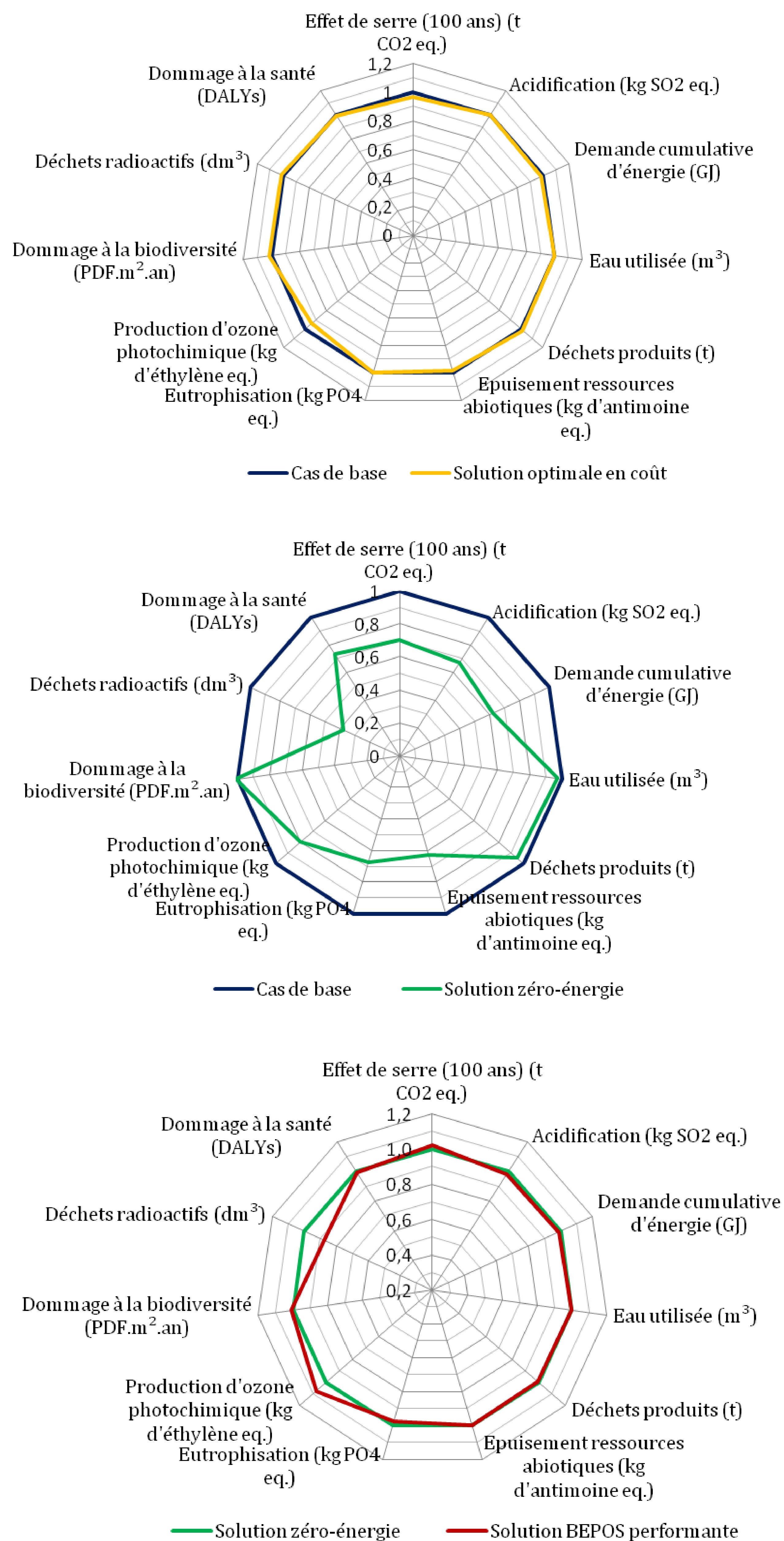


Figure 3 – Comparaison des impacts des variantes de référence sur leur cycle de vie

performance énergétique est bien de réduire les impacts environnementaux et, si possible, à moindre coût. Il est donc recommandé d'utiliser l'ACV dans l'optimisation multicritère ou en vérification de conceptions, notamment dans le cas de bâtiments à énergie positive dont la conception a été principalement guidée par un critère énergétique. Cette approche permet d'éviter le risque de construire des bâtiments ayant un rapport entre coûts d'investissement et impacts environnementaux

sous-optimal, qui gaspilleraient des ressources matérielles et financières. La généralisation de l'ACV dans les pratiques de conception est d'autant plus importante que le bâtiment à énergie positive deviendra prochainement la norme européenne, alors que sa définition technique est toujours floue.

En outre, il convient de rappeler les limites du cadre de l'étude : le contexte bulgare est différent de celui de la France, par exemple en termes de coûts de construction et de composition du mix électrique. Dans la méthodologie utilisée dans *Equer*, les bénéfices environnementaux de la production d'un panneau solaire photovoltaïque dépendent de la composition du mix électrique qu'il permet d'éviter de consommer. Le mix électrique bulgare étant composé à 48 % de charbon, l'utilisation de panneaux photovoltaïques y est donc plus bénéfique en termes de réduction des impacts qu'en France où le mix comporte moins d'énergies fossiles. Ainsi, ce travail rappelle l'importance de traiter chaque cas de bâtiment dans son contexte et ses caractéristiques propres afin d'identifier une conception réellement optimale.

Enfin, une perspective de développement est l'intégration d'un modèle de mix électrique dynamique dans le processus d'optimisation (Roux et al. 2016). Cette amélioration permettrait de quantifier de façon plus précise les bénéfices environnementaux liés à la production des panneaux photovoltaïques, en prenant en compte le décalage entre la forte production photovoltaïque en été et les phénomènes de pointes hivernales où le taux d'énergies fossiles augmente dans le mix électrique.

REMERCIEMENTS

Ces travaux ont été réalisés dans le cadre du projet européen AZEB, financé par le programme de recherche et d'innovation Horizon 2020 de l'Union Européenne (*Grant agreement* N° 754174).

6. BIBLIOGRAPHIE

- Brun, Adrien, Clara Spitz, Etienne Wurtz, and Laurent Mora. 2009. 'Behaviourial Comparison of Some Predictive Tools Used in a Low-Energy Building'. In *11th International IBPSA Conference*, 1185–90. Glasgow, Scotland.
- Deb, K., A. Pratap, S. Agarwal, and T. Meyarivan. 2002. 'A Fast and Elitist Multiobjective Genetic Algorithm: NSGA-II'. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation* 6 (2): 182–97. <https://doi.org/10.1109/4235.996017>.
- European Parliament, and Council of the European Union. 2010. *Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the Energy Performance of Buildings. Official Journal of The European Union - L 153/13*. <http://data.europa.eu/eli/dir/2010/31/oj>.
- Evins, Ralph. 2013. 'A Review of Computational Optimisation Methods Applied to Sustainable Building Design'. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 22 (June): 230–45. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.02.004>.
- Frischknecht, Rolf. 1998. 'Life Cycle Inventory Analysis for Decision-Making'. *The International Journal of Life Cycle Assessment* 3 (2): 67–67. <https://doi.org/10.1007/BF02978487>.
- Judkoff, R., and J. Neymark. 2013. 'Twenty Years On!: Updating the IEA BESTEST Building Thermal Fabric Test Cases for ASHRAE Standard 140'. In *Proceedings of BS2013*, 63–70. Chambéry, France. <https://doi.org/10.2172/1220110>.
- Munaretto, Fabio, Bruno Peuportier, and Alain Guiavarch. 2013. 'Accounting for thermal mass in thermal simulation tools: comparison of several assumptions'. In *Proceedings of BS2013*. Chambéry, France. http://www.ibpsa.org/proceedings/BS2013/p_1266.pdf.

- Peuportier, B., D. Kellenberger, D. Anink, H. Mötzl, J. Anderson, S. Vares, J. Chevalier, and H. König. 2004. 'Inter-Comparison and Benchmarking of LCA-Based Environmental Assessment and Design Tools'. In *Sustainable Building Conference 2004*. Warsaw, Poland.
- Peuportier, Bruno, and 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. <https://doi.org/10.1080/01425919008909714>.
- Polster, Bernd. 1995. 'Contribution à l'étude de l'impact Environnemental Des bâtiments Par Analyse Du Cycle de Vie'. Thèse de doctorat, École nationale supérieure des mines de Paris.
- Popovici, Emil. 2005. 'Contribution to the Life Cycle Assessment of Settlements'. Thèse de doctorat, École Nationale Supérieure des Mines de Paris.
- Judkoff, R., and J. Neymark. 1995. 'International Energy Agency Building Energy Simulation Test (BESTEST) and Diagnostic Method'. NREL/TP-472-6231. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory. <http://www.nrel.gov/docs/legosti/old/6231.pdf>.
- Recht, Thomas. 2016. 'Étude de l'écoconception de Maisons à Énergie Positive'. Thèse de doctorat, École nationale supérieure des mines de Paris.
- Recht, Thomas, Fabio Munaretto, Patrick Schalbart, and Bruno Peuportier. 2014. 'Analyse de la fiabilité de COMFIE par comparaison à des mesures. Application à un bâtiment passif'. In *IBPSA France 2014*, 9. Arras, France. <https://hal-mines-paristech.archives-ouvertes.fr/hal-01461407/document>.
- Roux, Charlotte, Patrick Schalbart, and Bruno Peuportier. 2016. 'Accounting for Temporal Variation of Electricity Production and Consumption in the LCA of an Energy-Efficient House'. *Journal of Cleaner Production* 113: 532–40. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.11.052>.
- Salmon, N., L. Duclos, B. Peuportier, G. Herfray, J. Chevalier, N. Schiopu, S. Lasvaux, et al. 2011. 'Connaissance de l'impact Environnemental Des bâtiments - COIMBA 2011, Développement Des Outils d'évaluation de La Qualité Environnementale Des bâtiments Par Analyse de Cycle de Vie'. Nobatek, ARMINES, CSTB, IZUBA Energies, ENERTECH. http://www.nobatek.com/downloads/Etudes%20publiques/Coimba_Synthese_NOBATEK.pdf.
- Vorger, Eric. 2014. 'Etude de l'influence Du Comportement Des Occupants Sur La Performance Énergétique Des bâtiments'. Thèse de doctorat, École nationale supérieure des Mines de Paris.

RBD-FAST : une méthode d'analyse de sensibilité rapide et rigoureuse pour la garantie de performance énergétique

Jeanne Goffart*¹, Monika Woloszyn¹

¹ Univ. Grenoble Alpes, Univ. Savoie Mont Blanc, CNRS, LOCIE, 73000 Chambéry

***jeanne.goffart@univ-smb.fr**

RESUME. L'article présente la méthode RBD-FAST basée sur la variance, qui couple analyse de sensibilité et analyse d'incertitude. Ces deux types d'analyses sont des outils indispensables pour la garantie de performance énergétique. Les informations obtenues sont de même qualité que la méthode de SOBOL, mais avec un nombre réduit de simulation et du même ordre de grandeur que le criblage de Morris. Ainsi la rapidité d'évaluation de la sensibilité des différents paramètres n'a plus à se faire au détriment de la qualité de l'information extraite par analyse de sensibilité. Avec le même nombre de simulation, la comparaison entre RBD-FAST et Morris est réalisée sur l'étude des besoins de chauffage d'une maison individuelle BEPOS avec 50 paramètres incertains. Les résultats illustrent la richesse et la qualité des informations extraites en une analyse avec RBD-FAST : quantification de la part d'influence de chaque entrée sur la dispersion de sortie, analyse d'incertitude rigoureuse, analyse graphique des tendances. Ces atouts en font donc une méthode privilégiée pour la garantie de performance énergétique.

MOTS-CLÉS : Analyse de sensibilité, garantie de performance, bonne pratique

ABSTRACT. The paper presents the variance-based method RBD-FAST which combines sensitivity and uncertainty analysis. These two kind of analysis are essential tools for the energy performance guarantee. The information obtained is of the same quality as the SOBOL method, but with a reduced number of simulations and of the same order of magnitude as the Morris screening. Thus, the speed of evaluation of the sensitivity of the various parameters no longer has to do to the detriment of the quality of the information extracted by sensitivity analysis. With the same number of simulations, the comparison between RBD-FAST and Morris is made on the study of the need for heating of a BEPOS individual house with 50 uncertain parameters. The results illustrate the richness and quality of the information extracted in an analysis with RBD-FAST: quantification on the part of the influence of each input on the output dispersion, rigorous uncertainty analysis, graphical analysis of trends. These strengths make it a preferred method for the energy performance guarantee.

KEYWORDS : sensitivity analysis, energy performance guarantee, good practice

1. INTRODUCTION : ANALYSE DE SENSIBILITE ET D'INCERTITUDE POUR LA GARANTIE DE PERFORMANCE

La garantie de performance énergétique (GPE) est un enjeu majeur et les méthodes statistiques couplées à la simulation thermique dynamique (STD) deviennent des outils incontournables pour sa mise en place. Ainsi, l'analyse d'incertitude et l'analyse de sensibilité (AS) interviennent à différentes étapes du processus de garantie de résultat énergétique. Par perturbation des entrées incertaines, l'analyse d'incertitude évalue l'intervalle de confiance sur les performances du bâtiment de manière à maîtriser la marge d'erreur sur l'engagement de la garantie. En complément, l'analyse de sensibilité identifie les paramètres les plus influents sur la variabilité des performances du bâti modélisé. Cette quête des paramètres les plus influents guident et/ou justifient la mise en place d'un protocole de mesures prioritaires ponctuelles sur le bâtiment livré et/ou la définition du plan de mesure et de vérification en

phase d'exploitation. Cela permet également, dans la phase conception, d'identifier les éléments clés dans le bâti pour l'optimisation des performances. Ainsi le laboratoire numérique qu'est la STD couplée aux analyses d'incertitude et de sensibilité permet de tester un grand nombre de configurations sur le modèle afin d'évaluer la réponse du bâti et donc d'extraire les dépendances des variables les plus influentes sur les consommations.

Les méthodes d'analyse de sensibilité dites globales et notamment celles basées sur la variance dites ANOVA sont tout indiquées pour répondre aux enjeux et aux objectifs de la GPE. En effet la STD requiert une méthode d'AS indépendante de la complexité du modèle et qui évalue le modèle de bâtiment sur la globalité des plages de variation des paramètres en prenant en compte leurs interactions. L'estimation des indices de sensibilité est robuste, l'interprétation intuitive et les informations sur la sensibilité et l'incertitude sont extraites avec les mêmes simulations. Cependant les méthodes ANOVA sont souvent associées à des temps de calcul prohibitifs, notamment les méthodes basées sur la décomposition fonctionnelle de la variance telle que la méthode de Sobol (Sobol' 2001). Bien que moins fine et dépendante de la régularité du modèle, la méthode de criblage de Morris est alors préférée, car avec un nombre drastiquement plus limité d'évaluations (de 10 à 100 fois inférieur), elle permet d'obtenir une information pertinente sur les paramètres influents.

L'enjeu de l'article est d'illustrer les performances de la méthode RBD-FAST. Basée sur la décomposition de la variance fréquentielle, elle estime les paramètres influents en STD avec une qualité d'informations sur les indices de sensibilité similaire à la méthode de Sobol, et ce avec un nombre réduit de simulations. Ce nombre d'évaluations est du même ordre de grandeur, voire inférieur au nombre nécessaire pour le criblage de Morris. Ainsi la rapidité d'évaluation de la sensibilité des différents paramètres n'a plus à se faire au détriment de la qualité et la quantité des informations extraites par AS. Pour appuyer ce discours, l'article présente une analyse de sensibilité avec un grand nombre de paramètres sur un cas d'étude de bâtiment BEPOS avec les deux méthodes : Morris et RBD-FAST. Le fonctionnement des deux méthodes est tout d'abord présenté.

2. DESCRIPTION DES METHODES : MORRIS ET RBD-FAST

Diverses méthodes d'AS existent et le choix dépend de la problématique (Saltelli et al. 2008). Il est déconseillé en STD d'utiliser des méthodes dites « un facteur à la fois » *i.e.* « One-at-a-time » (OAT) ou locale, car l'exploration de l'espace des paramètres n'étant pas optimal, les valeurs de sensibilité peuvent être biaisées, d'autant plus si le modèle physique évalué est non linéaire, non monotone et comportant des interactions.

2.1. LE CRIBLAGE DE MORRIS : UNE METHODE « UN FACTEUR A LA FOIS » AMELIOREE

Le principe de la méthode de Morris est d'effectuer une estimation de la sensibilité un paramètre à la fois (OAT), appelée trajectoire, et de répéter cette évaluation dans plusieurs points de l'espace des paramètres. La méthode combine ainsi la rapidité des méthodes types OAT tout en explorant un maillage sur une échelle globale et limite ainsi le risque de manquer des zones de l'espace des paramètres déterminantes. Cependant seuls peuvent être évalués les points appartenant à la grille multidimensionnelle construite par la méthode, l'information extraite est donc dépendante du maillage mis en place et du nombre de trajectoires. Ainsi il s'agit d'une méthode efficace et robuste tant que le modèle sondé est régulier. L'information extraite reste cependant qualitative et seule une hiérarchisation des effets est possible.

Le principe du maillage est le suivant : la plage de variation des k paramètres est discrétisée en Q niveaux, le croisement de ces Q niveaux définit un ensemble de nœuds Q^k . La méthode de Morris consiste à l'échantillonnage de ces nœuds par un ensemble de r trajectoires aléatoires dont chacune passe par $k + 1$ nœuds de manière à ce que chaque facteur ne varie qu'une seule fois par trajectoire. Aucune zone de l'espace ne peut être privilégiée, la méthode de Morris n'autorise donc que l'évaluation de loi uniforme sur une plage de variation initiale de 0 à 1 qui est ensuite transposée aux plages de variations attendues. L'influence de chaque facteur X_i est évaluée en comparant des simulations d'une trajectoire entre lesquelles seul le facteur X_i a varié. Il s'agit de l'effet élémentaire, effet seul de X_i que l'on estime à un point de l'espace. L'analyse de chaque trajectoire permet d'extraire les influences sur la sortie par la moyenne de la valeur absolue des effets (μ^*) et la variabilité des effets par l'écart type (σ). Ce dernier qualifie un niveau d'interaction et/ou de non linéarité du paramètre dans le modèle.

Le nombre de simulations dépend du nombre k des paramètres pris en compte dans l'analyse et du nombre de trajectoire r tel que $N = r(k + 1)$. Afin de réduire ce nombre de simulations, l'échantillonnage est optimisé par une sélection des trajectoires évaluant au mieux l'espace (Campolongo et al. 2007).

2.2. LA METHODE RBD-FAST POUR L'ESTIMATION DES INDICES DE SENSIBILITE DE SOBOL

Les indices de sensibilité de Sobol reposent sur la décomposition complète de la variabilité du modèle. Ils estiment la part de variance (dispersion) de la sortie du modèle induite par chaque entrée perturbée. Les indices sont compris entre 0 et 1. Un indice élevé indique une relation forte entre la variation de X_i et celle de la sortie Y . Un indicateur des interactions entre effets seuls est une somme des indices significativement inférieure à 1.

La méthode RBD-FAST (Random Balance Design – Fourier Amplitude Sensitivity Test) (Tarantola et al. 2006) estime des indices de Sobol de premier ordre robustes et précis avec seulement un jeu d'échantillons de N simulations de l'ordre de quelques centaines d'évaluations, quel que soit le nombre de paramètres. Pour cela la méthode évalue la variance partielle à partir de l'analyse des premières fréquences de la décomposition d' Y par transformée de Fourier. L'originalité de RBD-FAST est l'utilisation de randomisation par permutation qui permet de faire apparaître une seule et même fréquence ω_0 pour chaque variable aléatoire X_i . La procédure est la suivante : (1) permutation aléatoire R_i de l'ensemble des échantillons pour chaque variable d'entrée X_i échantillonnée au préalable avec la même fréquence ω_0 ; (2) simulation du modèle en utilisant les ensembles permutés de variables d'entrée; (3) réorganisation des N valeurs de sortie selon les vecteurs de permutation R_i pour chaque variable d'entrée X_i , afin de ramener la fréquence initiale (ω_0). Pour chaque ensemble réorganisé la fréquence ω_0 est reconstituée pour une unique entrée, les autres restants aléatoires. Une analyse fréquentielle des N évaluations de la sortie du modèle Y ainsi réorganisée montrera l'effet de l'entrée X_i dans les fréquences ω_0 et leurs harmoniques $\{2\omega_0, 4\omega_0, 6\omega_0, \dots\}$ et l'effet de toutes les autres variables sera un bruit blanc étalé sur toutes les fréquences. Afin de généraliser la méthode, l'algorithme de prétraitement EASI (Effective Algorithm for variance-based Sensitivity Indices) transforme un échantillon aléatoire de N simulations en un signal de forme triangulaire de fréquence $\omega_0=1$. Pour optimiser la convergence et minimiser le nombre d'évaluation du modèle, une méthode d'échantillonnage avancée est employée : LHS Maximin. Plus d'informations sur RBD-FAST avec EASI et son application en STD sont disponibles dans (Goffart et al. 2015).

3. CAS D'ETUDE

L'objectif de l'étude est avant tout de comparer les capacités de RBD-FAST et du criblage de Morris sur un modèle cohérent de maison optimisée énergétiquement avec un nombre important de paramètres pour l'analyse de sensibilité. Ainsi les conclusions et la démarche de l'étude se focaliseront sur les performances des méthodes respectives plutôt qu'à l'interprétation et la performance du bâtiment évalué.

3.1. MODELE NUMERIQUE

Le modèle numérique utilisé pour l'étude est un modèle EnergyPlus d'une maison individuelle dite BEPOS construite dans le cadre du projet COMEPOS¹. La maison a une superficie de 137 m² habitables répartie sur deux niveaux. La perméabilité à l'air est de 0,4 m³/(h.m²) et la résistance thermique des murs extérieurs isolés par l'intérieur est de 6 m².K/W. La modélisation est faite sur l'année pour le climat type de Strasbourg. Le détail ainsi que la validation du modèle sont disponibles dans (Josse 2017).

3.2. CONDITIONS DE L'ANALYSE

L'enjeu principal de l'étude porte sur l'illustration des capacités de RBD FAST et de Morris afin de comparer des indicateurs clés entre les deux méthodes : le temps de calcul, la qualité de l'information extraite, la convergence des résultats, mais aussi la quantité des informations. Ainsi il est choisi d'évaluer sur 50 entrées du modèle l'impact de leurs variations sur la variabilité du besoin de chauffage annuel avec d'une part la méthode de Morris et d'autre part la méthode RBD-FAST. Sachant que la méthode de Morris impose des lois uniformes, ce type de loi est choisie afin de comparer au mieux les deux méthodes. Ce type de loi impose une équiprobabilité d'évènement entre les valeurs possibles du paramètre ce qui est une contrainte forte sur la représentation des incertitudes. Les gammes de variations sont en accord avec une variabilité cohérente dans la vie d'un bâtiment et sont renseignées entre parenthèses dans la suite du texte.

Les paramètres pris en compte dans l'analyse de sensibilité sont associés : aux usages du bâtiment, tels que les charges internes des occupants et des usagers, des ouvertures de fenêtres, certains usages sont fragmentés en plusieurs paramètres pour évaluer leur impact à différente période de la journée ; aux paramètres thermophysiques ($\pm 10\%$) tels que la conduction, chaleur spécifique et densité de chaque matériau de construction ainsi que le facteur solaire et la résistance thermique des fenêtres ; aux conditions limites du bâti, telles que l'albédo (0.3 ± 0.1), la température du sol ($\pm 10\%$), l'infiltration ($\pm 20\%$) et l'orientation ($\pm 5^\circ$) ; à la gestion du bâtiment, telle que la ventilation ($\pm 10\%$) et la température de consigne ($\pm 1^\circ\text{C}$). Le choix des plages de variations est important et est une étape délicate de l'analyse de sensibilité. Dans le cadre de l'étude les variations correspondent à la phase d'exploitation du bâtiment, elles sont raisonnables avec un maximum de 33 % pour l'albédo et en accord avec les valeurs des grandeurs physiques observées en littérature. L'analyse fine de l'impact des paramètres d'usage et le détail de leur variation notamment pour le confort estival de la maison étudiée font l'objet d'une autre étude présentée à IBPSA France 2018 (Gondian et al. 2018).

L'analyse est faite avec 306 simulations pour chaque méthode. Pour Morris cela correspond à 6 trajectoires de 51 simulations, préalablement optimisées sur 10 fois plus de trajectoires

¹ www.comepos.fr

(Campolongo et al. 2007). Le maillage est fait avec une valeur usuelle de $Q = 4$. Les résultats exposent la convergence de chaque méthode ainsi que les informations extraites et leur qualité.

4. COMPARAISON DES PERFORMANCES DE MORRIS ET RBD-FAST

4.1. CONVERGENCE DE L'ANALYSE POUR CHAQUE METHODE

Après une analyse, le premier indicateur qui doit être vérifié est la convergence, *i.e.* si le nombre de simulation est suffisant pour obtenir des résultats de sensibilité stables. La Figure 1 présente, pour les deux méthodes, la convergence de la variance et de la moyenne de la sortie du modèle (besoins de chauffage) pour l'échantillon statistique. Ce sont des grandeurs statistiques importantes pour le calcul de la sensibilité pour les deux méthodes. On observe que RBD-FAST est plus rapidement stable, en effet 150 simulations auraient été suffisantes pour l'analyse. Pour la méthode de Morris, la variance s'écarte de 10 à 15 % de la variance finale. Afin de compléter l'étude de convergence de la méthode de Morris avec plus de trajectoires, 1020 simulations ont été faites *i.e.* 20 trajectoires. La méthode atteint une variance finale inférieure à 5 % pour 16 trajectoires, *i.e.* 816 simulations, elle n'est plus que de 2 %. On observe un facteur 5 en nombre de simulation pour obtenir la même stabilité de l'échantillon entre RBD-FAST et Morris.

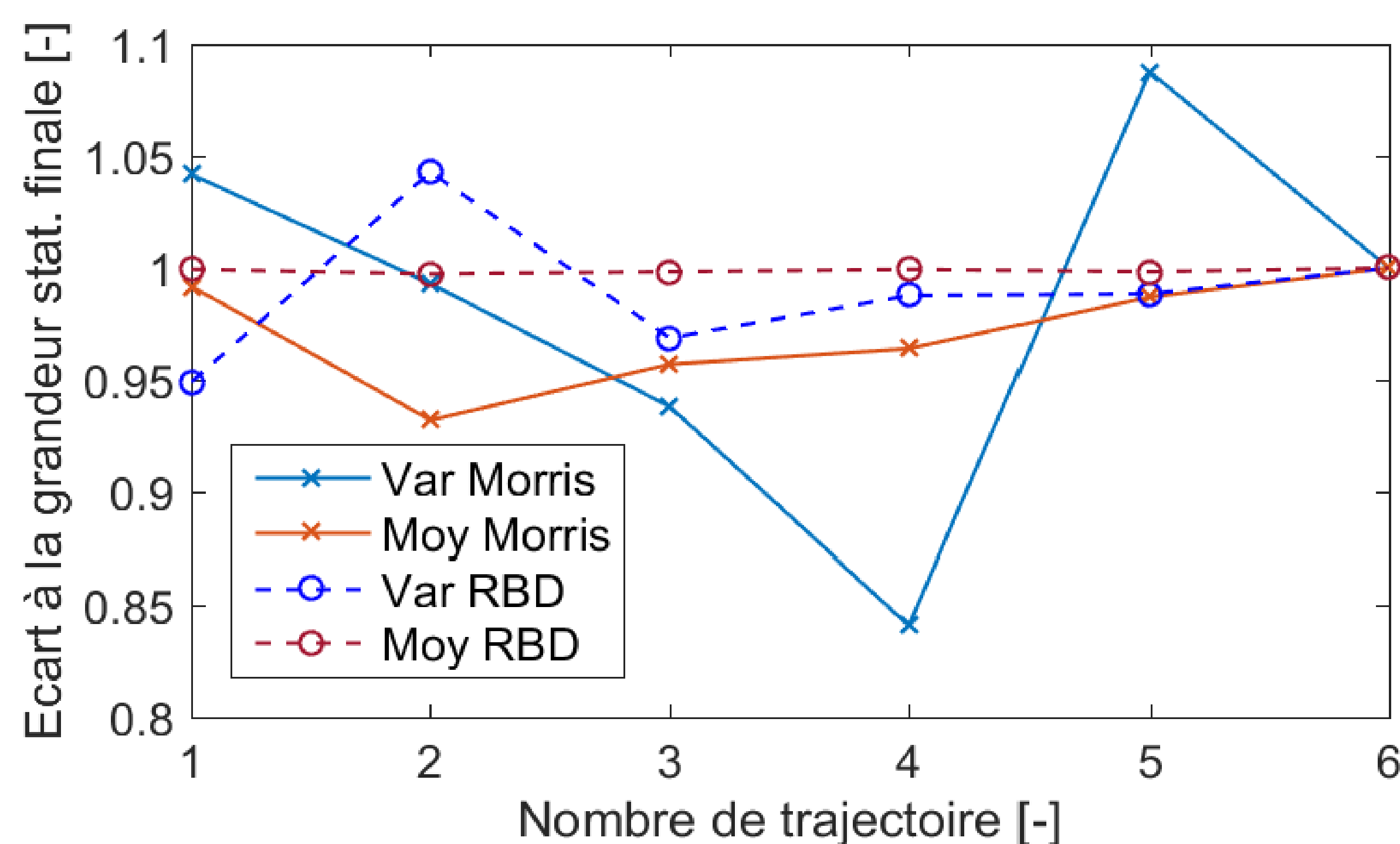


Figure 1 : Convergence de la variance et de la moyenne pour chaque méthode ($N=306$)

4.2. DISPERSION DE LA SORTIE D'INTERET : LE BESOIN DE CHAUFFAGE ANNUEL

De manière générale, il est toujours important de vérifier que la dispersion de sortie est significative pour justifier d'en estimer les paramètres les plus influents et donc l'analyse de sensibilité. Contrairement à la méthode de Morris, RBD-FAST permet de coupler à l'analyse de sensibilité une analyse d'incertitude. En effet la méthode de Morris ne prend en compte que les distributions uniformes et la méthode de maillage et de nœud implique que le modèle est souvent évalué aux bornes des plages de variations. Ceci biaise la dispersion de sortie en surévaluant les valeurs max et min des paramètres tel qu'illustré en Figure 2. Les distributions cumulées du besoin de chauffage pour les 306 simulations, pour chaque méthode y sont représentées. On observe bien le décalage entre les méthodes et la surestimation de la dispersion des consommations avec la méthode de Morris. Cet écart est lié à la méthode elle-même et non au nombre de simulation, il est en effet également observé le même écart avec les 1020 simulations, *i.e.* les 20 trajectoires.

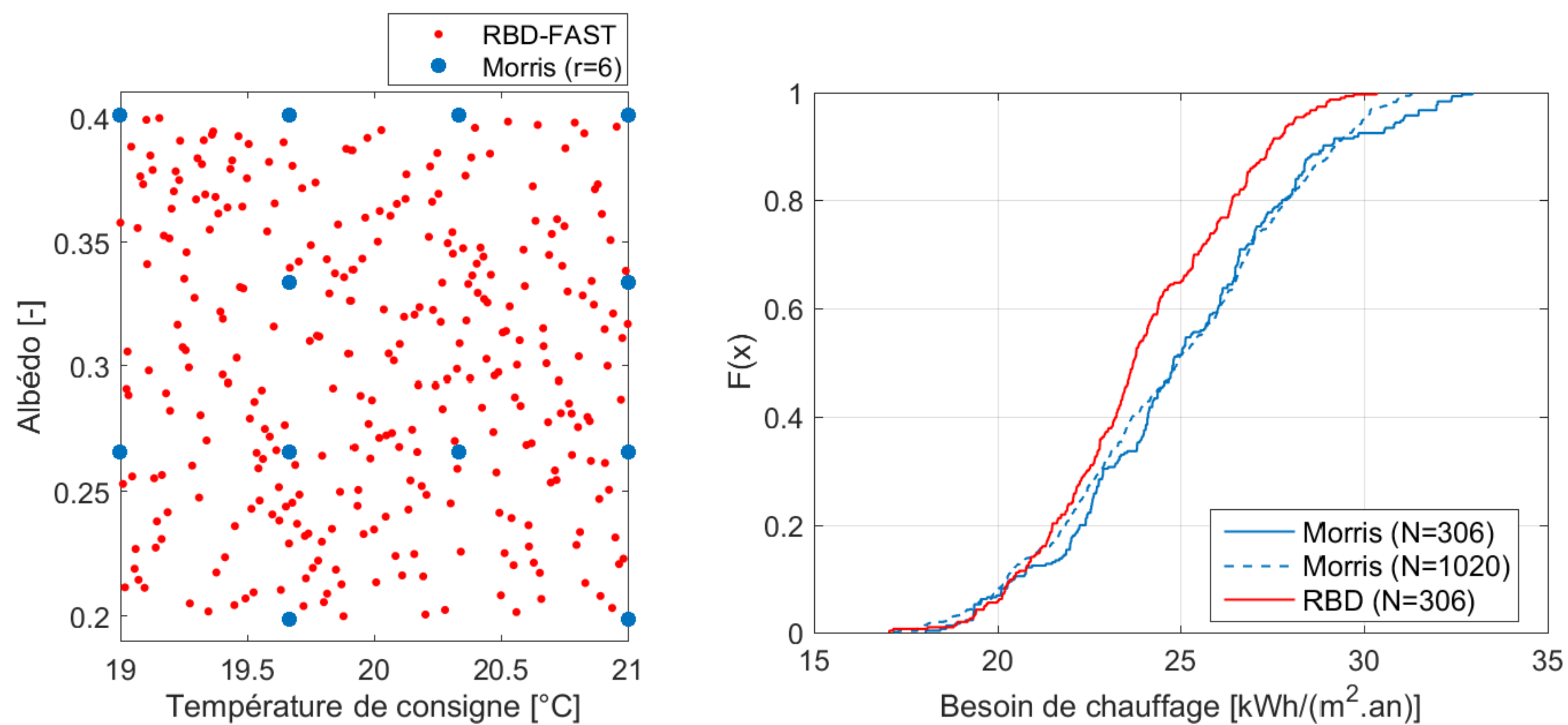


Figure 2 : Pour chaque méthode : (gauche) exploration de l'espace pour 2 paramètres (droite) distribution cumulée du besoin de chauffage.

4.3. ESTIMATION DES PARAMETRES LES PLUS INFLUENTS

En fonction de la méthode utilisée, l'indicateur de la sensibilité est assez différent. Dans le cas de RBD-FAST, les indices de sensibilité sont calculés et quantifient la part de variance de chaque paramètre d'entrée sur la variance totale *i.e.* la dispersion de la sortie. Dans le cadre de Morris l'indicateur est qualitatif et permet de classer les paramètres par ordre d'influence et de visualiser leur placement les uns par rapport aux autres. La Figure 3 montre le graphe de Morris : ainsi on voit qu'un paramètre se détache, il s'agit de la température de consigne. Il est possible de classer selon $d^* = \sqrt{\mu^{*2} + \sigma^2}$. Le Tableau 1 regroupe les paramètres par ordre décroissant d'influence selon RBD-FAST avec les variations d'entrées, les indices de sensibilité selon RBD-FAST et la distance d^* selon Morris ($r=6$) et le rang obtenu avec la méthode de Morris ; les rangs sont conservés entre $r=6$ et $r=20$.

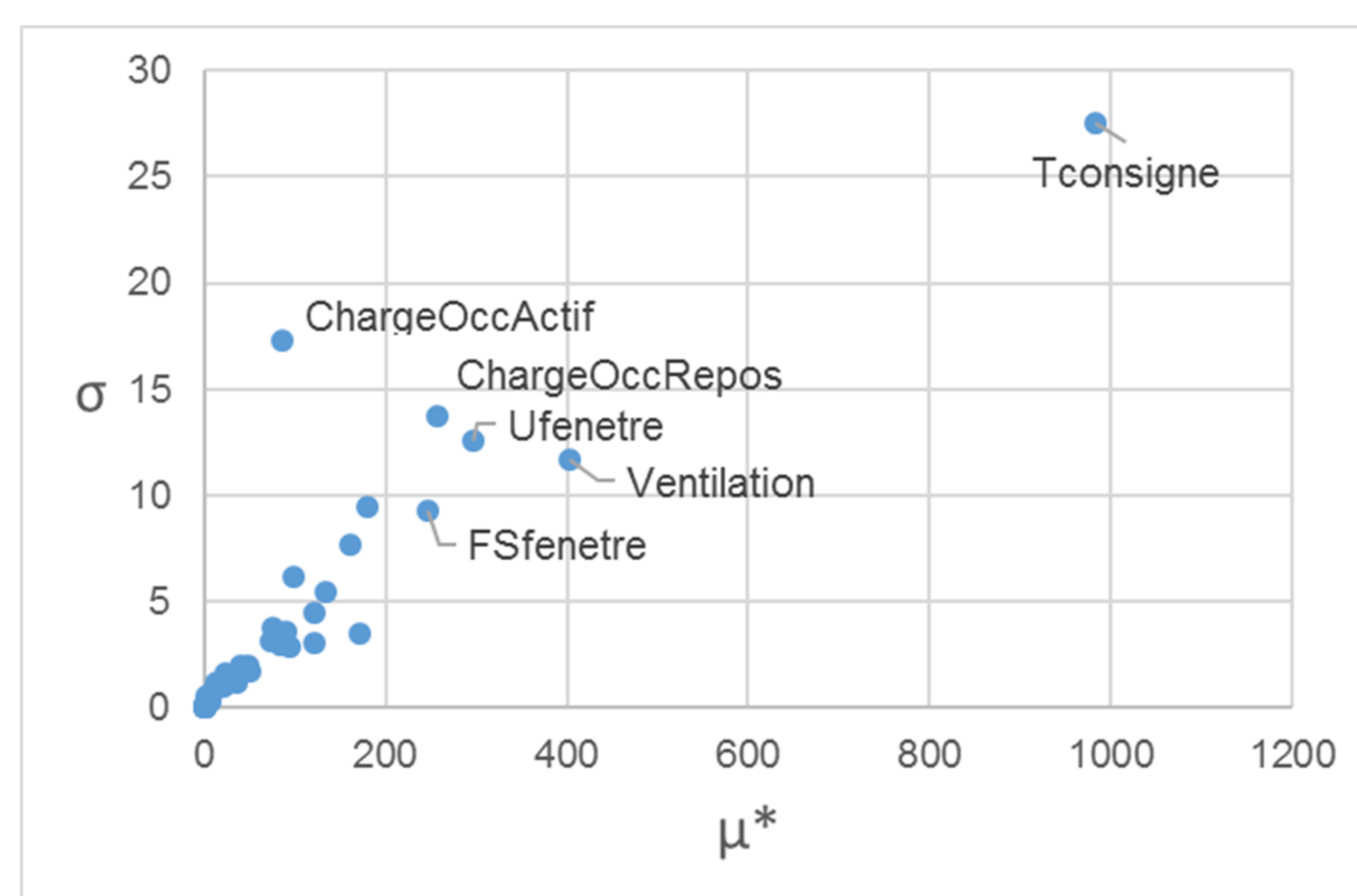


Figure 3 : Graphe de Morris : moyenne μ^* de la valeur absolue des effets en fonction de l'écart type σ des effets pour chaque paramètre ($r=6$).

Paramètres	Variation du paramètre dans l'AS	Indice RBD-FAST	Distance d^* Morris	Rang Morris
Température de consigne [°C]	20 ± 1	60 %	984	1
Ventilation [$\text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$]	$2,05 \cdot 10^{-4} \pm 10 \%$	11 %	404	2
Charge interne occupant au Repos [W]	63 ± 20	8 %	257	4
Conductance Fenêtre [$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$]	$1,3 \pm 10 \%$	7 %	298	3
Albédo [-]	$0,3 \pm 0,1$	7 %	179	6
Puissance équipement le matin de 6 h à 8 h [W]	200 ± 200	5 %	162	8
Facteur solaire Fenêtre [-]	$0,49 \pm 10 \%$	< 4 %	246	5
Puissance équipement continue [W]	100 ± 20	< 4 %	172	7
Puissance équipement le soir de 20 h à 22 h [W]	200 ± 200	< 4 %	135	9

Tableau 1 : Sensibilité et variations des paramètres les plus influents avec RBD-FAST et Morris

On remarque que les jeux de paramètre identifiés comme étant les plus influents sont les mêmes avec les deux méthodes. La température de consigne est particulièrement influente et les autres variables sont toutes dans une zone de moindre influence, ce que l'on retrouve avec RBD-FAST et la méthode de Morris. Quelques permutations sont observées dans le classement mais pour des variables d'influence similaire. RBD-FAST permet en complément de quantifier ; ainsi 60 % de la dispersion est due à la température de consigne. Une information supplémentaire sur le niveau d'interaction est donnée par la somme des indices. Celle-ci étant proche de 1, il n'y a pas d'interaction entre paramètres dans le modèle.

Un des atouts majeurs de RBD-FAST est également de pouvoir obtenir la tendance, i.e. l'évolution des besoins en fonction du ou des paramètre(s) influent(s). Dans notre étude il s'agit du besoin de chauffage en fonction de la température de consigne. La Figure 4 représente cette tendance. En moyenne une augmentation de 1 °C augmente le besoin de 3,5 kWh/(m².an). Cette approche permet d'aller vers les polynômes d'ajustement en garantie de performance. Pour cela, les consommations et non les besoins doivent être considérées ainsi que la prise en compte de l'ensemble des tendances des entrées influentes pour obtenir des polynômes multifactoriels.

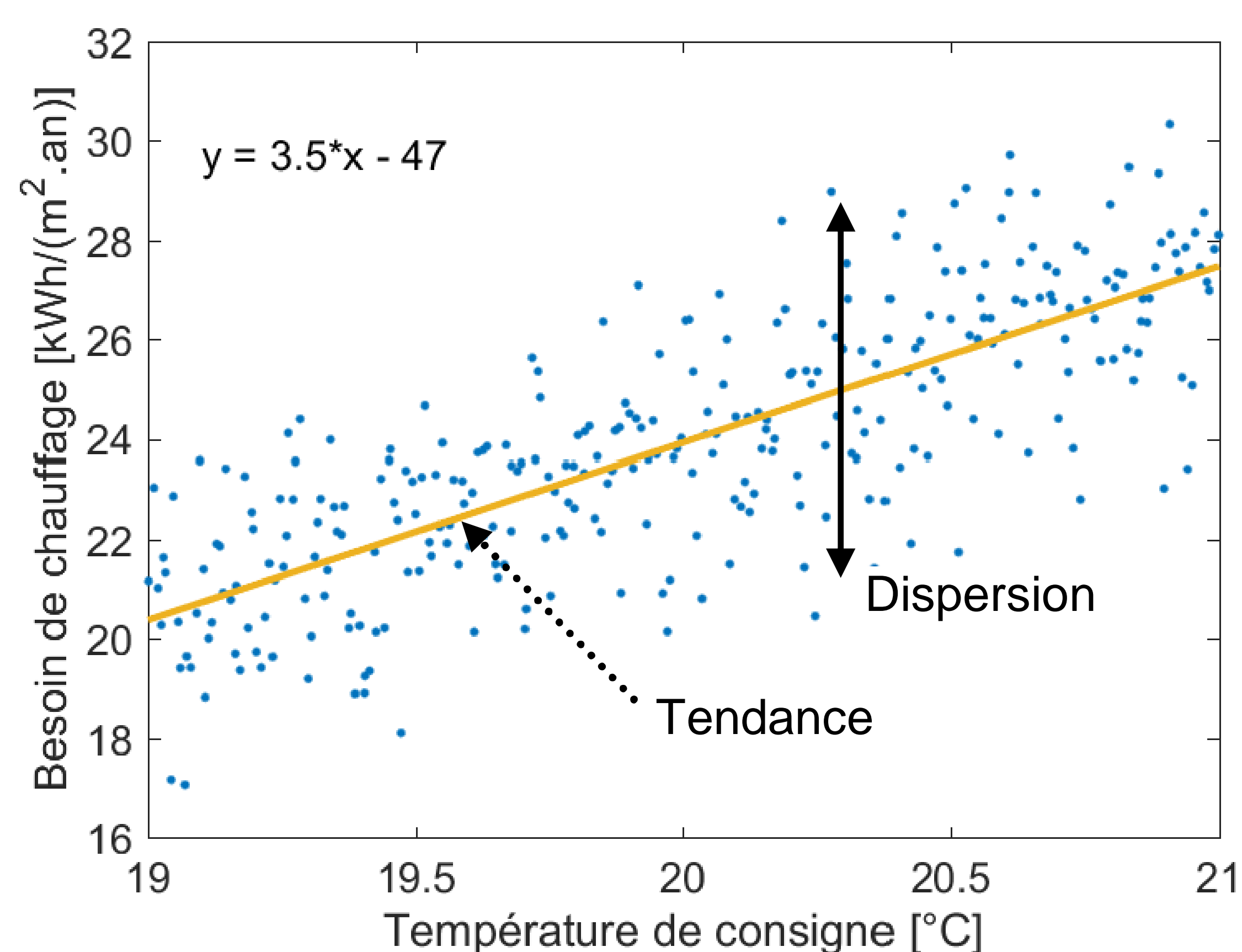


Figure 4 : Evolution de la valeur du besoin de chauffage en fonction de la température de consigne

5. CONCLUSION

Sur un cas pertinent de bâtiment réel optimisé, il a été montré que la méthode RBD-FAST est un outil décisif dans la mise en place de la GPE. Les méthodes de Morris et RBD-FAST arrivent aux mêmes niveaux de précision sur l'ordre des paramètres influents mais la méthode RBD-FAST permet avec le même nombre de simulation, voire moins, d'extraire plus d'informations. En effet, les effets de chaque paramètre sont quantifiés en un indice de sensibilité simple et clair. De plus, l'exploration de l'espace est maximisée et est compatible avec toutes les lois de distribution (discrète également) ce qui permet, de coupler à l'analyse de sensibilité, une analyse d'incertitude mais aussi une analyse graphique des résultats (interaction, régression, etc.). Par ailleurs, RBD-FAST fait partie des méthodes indépendantes de la complexité du modèle ce qui donne une liberté d'exploration pour différentes configurations d'études en STD (étude d'indice de sensibilité temporelle, étude de seuil d'inconfort thermique, etc.).

L'enjeu de l'article est d'avoir illustré les capacités de RBD-FAST afin d'en encourager son utilisation. Dans cette démarche la méthode complète a été ajoutée à la librairie d'analyse de sensibilité sous Python 3 : SALib (Herman et Usher 2017).

Remerciements

Ces travaux ont été menés dans le cadre du projet COMEPOS accompagné par l'ADEME (programme Énergies Décarbonées des Investissements d'Avenir).

6. BIBLIOGRAPHIE

- Campolongo, Francesca, Jessica Cariboni, and Andrea Saltelli. 2007. "An Effective Screening Design for Sensitivity Analysis of Large Models." *Environmental Modelling and Software* 22 (10): 1509–18. doi:10.1016/j.envsoft.2006.10.004.
- Goffart, Jeanne, Mickael Rabouille, and Nathan Mendes. 2015. "Uncertainty and Sensitivity Analysis Applied to Hygrothermal Simulation of a Brick Building in a Hot and Humid Climate." *Journal of Building Performance Simulation* 10 (1) 2017. Taylor & Francis: 37–57. doi:10.1080/19401493.2015.1112430 (online 2015).
- Gondian Léa, Jeanne Goffart, Monika Woloszyn, Etienne Wurtz, Catherine Buhé, Philippe Maréchal. 2018 "Évaluation de l'influence des occupants sur le confort estival : utilisation des analyses d'incertitude et de sensibilité", Conférence IBPSA France, 15-16 mai 2018, Bordeaux.
- Herman, Jon, Will Usher. 2017. "SALib: An open-source Python library for Sensitivity Analysis", *Journal of Open Source Software*, 2(9), 97, doi:10.21105/joss.00097
- Josse, Rozenn. 2017. "Méthode et outils pour l'identification de défauts des bâtiments connectés performants. Énergie électrique". Université Grenoble Alpes. Français.
- Saltelli, Andrea, Marco Ratto, Terry Andres, Francesca Campolongo, Jessica Cariboni, Debora Gatelli, Michaela Saisana, and Stefano Tarantola. 2008. "Introduction to Sensitivity Analysis." In *Global Sensitivity Analysis. The Primer*, 1–51. John Wiley & Sons, Ltd. doi:10.1002/9780470725184.ch1.
- Sobol', I. M. 2001. "Global Sensitivity Indices for Nonlinear Mathematical Models and Their Monte Carlo Estimates." *Mathematics and Computers in Simulation* 55 (1–3): 271–80. doi:10.1016/S0378-4754(00)00270-6.
- Tarantola, Stefano, D Gatelli, and Thierry Mara. 2006. "Random Balance Designs for the Estimation of First Order Global Sensitivity Indices." *Reliability Engineering & System Safety* 91 (6): 717–27. doi:10.1016/j.res.2005.06.003.

Développement d'une méthodologie pour la garantie de performance énergétique en réhabilitation basée sur la régression quantile

Simon Ligier*¹, Patrick Schalbart¹, Bruno Peuportier¹

¹ MINES ParisTech, PSL Research University CES - Centre d'efficacité énergétique des systèmes 60 Bd St Michel 75006 Paris, France

* simon.ligier@mines-paristech.fr

RESUME. La garantie de performance énergétique (GPE) vise à favoriser le financement de projets de réhabilitation mais est limitée par la fiabilité des prévisions de consommations. La méthodologie proposée est basée sur l'exploitation statistique de données issues de simulations, selon une approche Monte-Carlo incluant la définition des incertitudes sur les paramètres du modèle de bâtiment et la génération de sollicitations stochastiques représentatives de données météorologiques et d'usage. L'originalité de cette méthodologie réside dans l'intégration de l'impact des incertitudes liées à l'étape de mesure et vérification (M&V) en amont de l'engagement et sur la méthode de régression quantile permettant l'expression d'une limite garantie de consommations associée à un risque. Celle-ci est appliquée à un projet de réhabilitation d'un bâtiment de logements collectifs pour lequel un engagement sur la diminution des consommations énergétiques de chauffage est pris. Une dépendance aux facteurs d'ajustement du gain relatif garanti, pour un risque de défaut donné, est notamment constatée.

MOTS-CLÉS : garantie de performance énergétique, mesure & vérification, analyse des incertitudes et variabilités

ABSTRACT. Energy Performance Contracting (EPC) aims at promoting refurbishment funding but its development is constrained by consumption forecasting reliability. The methodology presented in this article is based on a statistical study of a Monte-Carlo analysis including the description of model inputs' uncertainties, and the modelling of dynamic loads variability. The impact of measurement uncertainties during the verification period is integrated in the methodology and a risk model is provided using a quantile regression method. It allows the joint determination of a guaranteed consumption limit and the failure risk of this commitment. A case study is presented in which a guaranteed relative gain on heating energy consumption is obtained thanks to the refurbishment of a residential building. The variation of the expected percentage gain according to adjustment factors is studied.

KEYWORDS: energy performance contracting, measurement & verification, uncertainty and variability analysis

1. INTRODUCTION

Les objectifs de réduction des émissions de gaz à effet de serre s'appuient sur une forte diminution des consommations énergétiques dans les bâtiments. Celle-ci repose sur la conception de bâtiments neufs à haute performance énergétique mais aussi sur la rénovation du parc immobilier existant. Les exigences de moyen prévues par la réglementation tendent à s'accompagner d'exigences de résultats sur les consommations énergétiques effectives suite aux travaux. Ceci s'explique par l'analyse de nombreux retours d'expérience faisant état de performances réelles non conformes aux prévisions réalisées lors des projets d'amélioration de la performance énergétique. La garantie de performance énergétique (GPE) repose sur l'engagement de l'entreprise de construction ou de service énergétique sur des consommations énergétiques après travaux. Ce mécanisme permet au maître d'ouvrage de

sécuriser un coût d'exploitation et donc le retour sur investissement lié à la rénovation. La GPE peut ainsi permettre une massification des réhabilitations. La concrétisation de ce type d'engagement constitue un verrou scientifique et doit s'appuyer sur une analyse fine du bâtiment à rénover et des performances attendues. Dans cet article, une méthodologie basée sur l'exploitation de résultats de simulation énergétique dynamique (SED) et sur des mesures réalisées en exploitation est présentée.

2. PROPAGATION DES INCERTITUDES ET VARIABILITES

2.1. ANALYSES DE SENSIBILITE ET D'INCERTITUDES

La littérature scientifique souligne les limitations des outils de simulation pour répondre à un objectif de prévision des consommations énergétiques futures d'un bâtiment (van Dronkelaar et al., 2016). Une des solutions mises en avant pour répondre à cette problématique est de passer d'une approche de modélisation déterministe à une approche probabiliste. Les nombreux paramètres géométriques, physiques et techniques du modèle ne sont ainsi plus spécifiés avec une valeur unique mais décrits selon des lois de probabilité. Des méthodes d'analyse de sensibilité permettent d'identifier les paramètres dont l'incertitude a le plus d'influence sur la variabilité des sorties d'intérêt de la simulation. La spécification des fonctions de densité de probabilité est ainsi concentrée sur les paramètres influents, les autres pouvant être considérés selon une valeur unique, diminuant ainsi la dimension de l'espace de variation des entrées statiques du modèle.

2.2. MODELISATION STOCHASTIQUE DU COMPORTEMENT DES OCCUPANTS

Les modèles de SED nécessitent aussi un ensemble de paramètres d'entrée dits dynamiques. Ces sollicitations temporelles décrivent notamment l'influence des usagers des bâtiments. Des scénarios d'occupation, de puissance dissipée, de température de consigne, de puisages d'ECS sont ainsi nécessaires. L'approche communément utilisée en SED est de considérer des scénarios moyens ou réglementaires potentiellement très éloignés des conditions réelles en exploitation. L'influence du comportement des occupants a été étudié pour des logements et des bureaux (Haldi et Robinson, 2011). Différents travaux s'intéressent à la modélisation stochastique du comportement des occupants. Vorger et al. (2014) s'appuient sur des enquêtes statistiques françaises pour construire un modèle probabiliste générant des sollicitations statistiquement représentatives pour la SED.

2.3. VARIABILITE DES CONDITIONS METEOROLOGIQUES

Les conditions météorologiques constituent aussi des sollicitations temporelles très influentes sur la variabilité des consommations énergétiques (Hong et al., 2013). Afin de prendre en compte leur variabilité naturelle, un modèle de génération de données météorologiques a été développé (Ligier et al., 2017). Des séries temporelles météorologiques de température extérieure et de rayonnement solaire horizontal global et diffus sont synthétisées à partir d'un jeu de données unique correspondant aux données types de la zone géographique étudiée. Le modèle décrit l'autocorrélation temporelle de chaque série et l'intercorrélacion les liant. Des ensembles de données aléatoires et statistiquement représentatives sont alors créés et utilisés en entrée du logiciel de simulation du bâtiment.

2.4. SIMULATION DU MODELE PHYSICO-PROBABILISTE

La méthodologie présentée dans cet article repose dans un premier temps sur la simulation du modèle physico-probabiliste complet comprenant le modèle thermique du bâtiment, l'ensemble des fonctions de densité de probabilité des paramètres statiques influents et les modèles de génération

stochastique des sollicitations temporelles. Des tirages aléatoires sont effectués dans ces ensembles permettant la réalisation d'un grand nombre de simulations (approche Monte-Carlo). Cette propagation des incertitudes (des paramètres statiques) et variabilités (des sollicitations dynamiques non prévisibles), dite PIV, fournit en sortie une distribution statistique des grandeurs d'intérêt, et notamment des consommations énergétiques. La méthodologie pour la définition d'éléments contractuels pour la GPE repose sur l'analyse de cet ensemble de résultats de simulation.

3. ENGAGEMENT POUR LA GPE

3.1. FACTEURS D'AJUSTEMENT

Dans les contrats de GPE, un processus d'ajustement est fréquemment considéré. Il vise à isoler l'influence de phénomènes dont on souhaite s'affranchir dans la prise de risque liée à l'engagement de GPE. Certains éléments influents ne sont en effet pas liés à la qualité du bâtiment, à sa performance énergétique ou à son exploitation, sur lesquels porte la garantie. Des facteurs d'ajustement (FA), caractérisant ces phénomènes liés aux sollicitations de l'ouvrage – les conditions météorologiques et le comportement des usagers – sont définis. Les FA, permettant la contextualisation de l'exploitation du bâtiment, seront mesurés et pris en compte dans le processus de vérification de la performance.

3.2. MODELE DE REFERENCE AVANT TRAVAUX

En rénovation, l'engagement de GPE porte fréquemment sur une diminution des consommations énergétiques par rapport à la situation avant travaux. L'IPMVP (EVO, 2012) décrit le principe de comparaison des consommations d'exploitation du bâtiment rénové avec les consommations hypothétiques du bâtiment avant rénovation dans les conditions observées en exploitation. Afin d'estimer ces dernières, il est nécessaire de définir un modèle liant les consommations énergétiques du bâtiment initial aux FA considérés. Ce modèle peut être déterminé à partir de données historiques si elles sont connues, ou grâce à un modèle de SED, si possible calibré avec des données réelles.

Ainsi, à partir d'une propagation des incertitudes et variabilités effectuée sur le modèle d'un bâtiment avant travaux, la régression linéaire multiple fournit un modèle de l'espérance sur les consommations énergétiques en fonction de facteurs d'ajustement. Connaissant la valeur des FA et consommations en exploitation (FA_{obs}, C_{obs}), il est possible de déterminer la consommation théorique avant travaux (C_{pre}) associée à ces conditions et donc d'établir un gain relatif GR_{obs} par rapport à cette valeur de référence.

$$GR_{obs} = [C_{pre}(FA_{obs}) - C_{obs}] / C_{pre}(FA_{obs}) \quad (1)$$

3.3. INFLUENCE DES INCERTITUDES DE M&V

La vérification de l'engagement de GPE nécessite la mesure des FA et des consommations énergétiques. Une incertitude de mesure est associée aux capteurs et les valeurs relevées sont donc entachées d'une possible erreur de mesure. Ces erreurs font courir un risque supplémentaire de non-respect de l'engagement qui doit être intégré à la méthodologie globale. L'approche de modélisation probabiliste du bâtiment vise à créer un modèle statistique pour lequel la réalité d'exploitation pourrait être considérée comme une réalisation aléatoire. On constate cependant que la connaissance des conditions d'exploitation effectives est entachée d'une erreur de mesure et l'on propose donc, pour conserver cette équivalence entre simulation et réalité de réaliser des mesures virtuelles des résultats de simulation, de considérer une erreur supplémentaire liée à la mesure, sur les sorties d'intérêt du modèle. Ainsi, à partir du plan de mesure associé aux FA retenus et donc des capteurs associés, des

fonctions de densité de probabilité sont établies, décrivant la plage d'incertitude des grandeurs d'intérêt, des FA et des consommations, à partir des standards scientifiques (EVO, 2012). Pour chaque simulation, des tirages sont réalisés, déterminant une erreur de mesure virtuelle. Ces résultats de simulation bruités sont par la suite considérés pour établir le niveau d'engagement de la GPE.

3.4. MODELE DE RISQUE APRES TRAVAUX

3.4.1. La régression quantile

La détermination d'un gain relatif minimal associé à un risque α de non-respect de cette valeur repose sur l'étude statistique des résultats issus des simulations énergétiques. Afin de caractériser le risque de défaut, le quantile de la distribution des consommations énergétiques est étudié. La fonction de répartition F_Y de la variable de sortie Y , la consommation énergétique, est définie comme :

$$F_Y(y) = P(Y \leq y) \quad (2)$$

Le quantile d'ordre τ ($\tau = 1 - \alpha$) est alors :

$$q_\tau(Y) = F_Y^{-1}(\tau) \quad (3)$$

La régression quantile (Koenker, 2005) est une méthode de régression permettant de définir un modèle linéaire liant les quantiles de la grandeur d'intérêt connaissant les valeurs des variables explicatives X (les FA dans notre cas) :

$$q_\tau(Y|X) = X\beta_\tau + \varepsilon \quad (4)$$

où ε désigne le vecteur des résidus. L'estimateur $\widehat{\beta}_\tau$ du vecteur β_τ de la régression quantile est :

$$\widehat{\beta}_\tau = \underset{\beta \in \mathbb{R}^p}{\operatorname{argmin}} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \rho_\tau(Y_i - X_i\beta) \quad (5)$$

avec ρ_τ une fonction test définie par :

$$\rho_\tau(u) = \begin{cases} \tau \cdot u & \{u \geq 0\} \\ (\tau - 1) \cdot u & \{u < 0\} \end{cases} \quad (6)$$

On définit la limite garantie de consommation énergétique, LGC_α , comme le quantile conditionnel de la distribution des consommations d'énergie. Ainsi qu'indiqué dans l'équation ci-dessous, on l'exprime par rapport au taux d'accroissement des FA par rapport à une valeur de référence arbitraire à définir. Les coefficients du modèle sont ainsi adimensionnalisés :

$$LGC_\alpha = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i \cdot \frac{FA_i - FA_{i,ref}}{FA_{i,ref}} \quad (7)$$

La Figure 1 illustre la construction des modèles de régression dans un cas monodimensionnel où un seul FA, les degrés heures DH_{18} est considéré parmi deux jeux de 1000 simulations pre- et post-rénovation. On constate la différence entre les pentes des modèles C_{pre} et $LGC_{5\%}$.

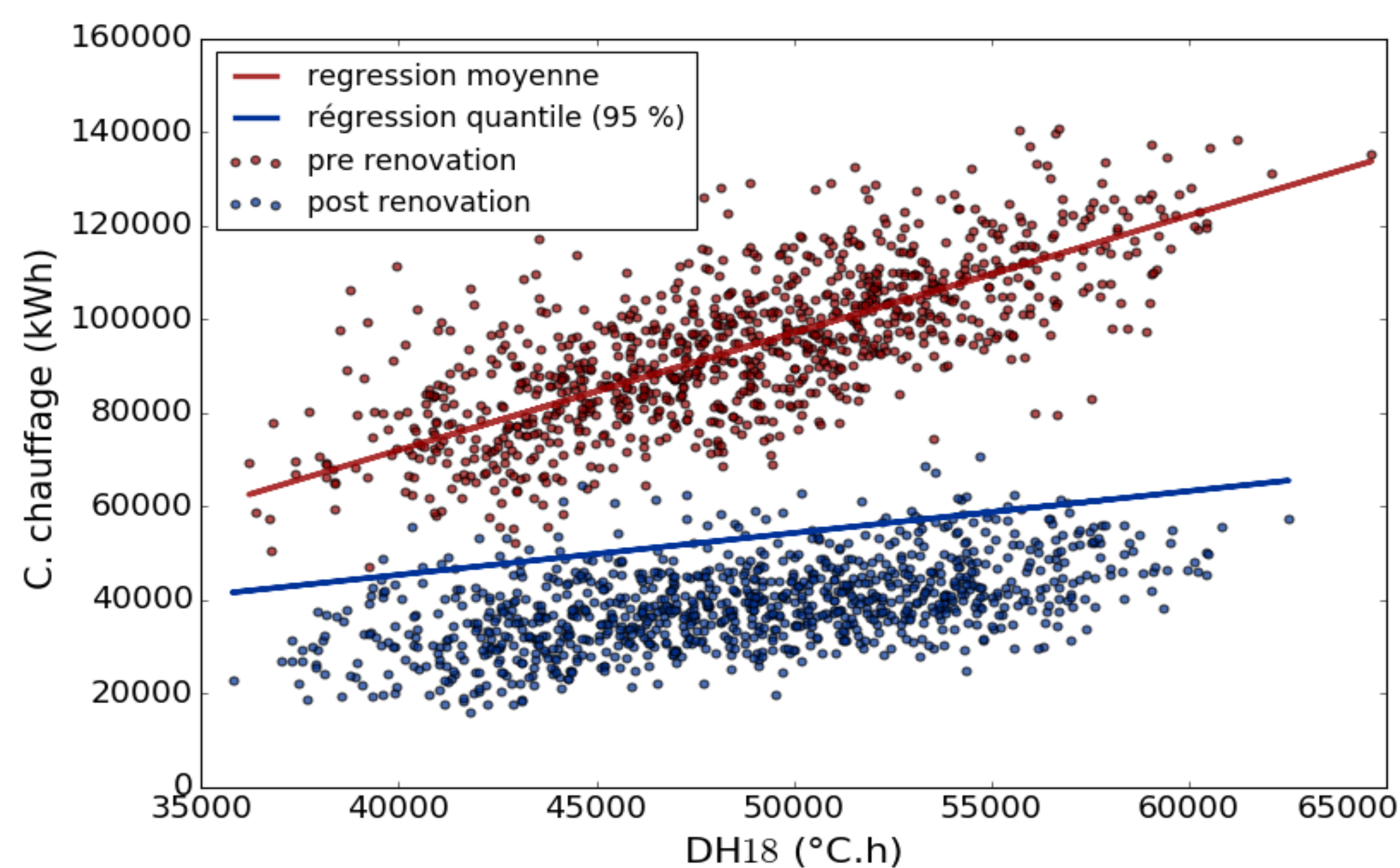


Figure 1 : Distribution des consommations énergétiques de chauffage pré- et post-rénovation

3.4.2. Engagement relatif

On s'intéresse au gain relatif attendu par rapport à la consommation de référence avant travaux. À partir du modèle de référence et de la LGC_α on définit le gain relatif minimal pour un risque α , GR_α :

$$GR_\alpha(FA) = [C_{pre}(FA) - LGC_\alpha(FA)] / C_{pre}(FA) \quad (8)$$

On souhaite comparer cette grandeur au gain global $GR_{\alpha, glob}$ qui désigne le quantile de la distribution des gains relatifs associés à chaque résultat de simulation $C_{post,s}$.

$$GR_{\alpha, glob} = q_\tau([C_{pre}(FA_s) - C_{post,s}] / C_{pre}(FA_s)) \quad (9)$$

Ces deux informations sont des variables pertinentes pour définir un engagement sur l'amélioration de performance énergétique suite à une rénovation. GR_α permet de prendre en compte la variabilité du gain attendu, avec un risque donné de défaut, en fonction des conditions d'exploitation décrites par les facteurs d'ajustement. La méthodologie complète permettant l'expression d'un gain relatif garanti suite à des rénovations va maintenant être appliquée à un cas d'étude.

4. RESULTATS

4.1. CAS D'ETUDE

Le projet étudié concerne la rénovation d'un bâtiment R+3 de 1048 m², composé de 16 appartements. La réhabilitation porte sur l'amélioration de l'isolation et de l'étanchéité de l'enveloppe et un changement des systèmes de chauffage, de ventilation et de production d'ECS. Le bâtiment est modélisé dans le logiciel de SED *Pléiades*+COMFIE et divisé en 17 zones thermiques correspondant à chaque appartement et aux parties communes, comme décrit à la Figure 2. On souhaite s'engager sur une diminution de la consommation énergétique de chauffage avec un risque α de 5 %. Deux modèles sont réalisés correspondant aux situations avant rénovation et à la configuration prévue après travaux.

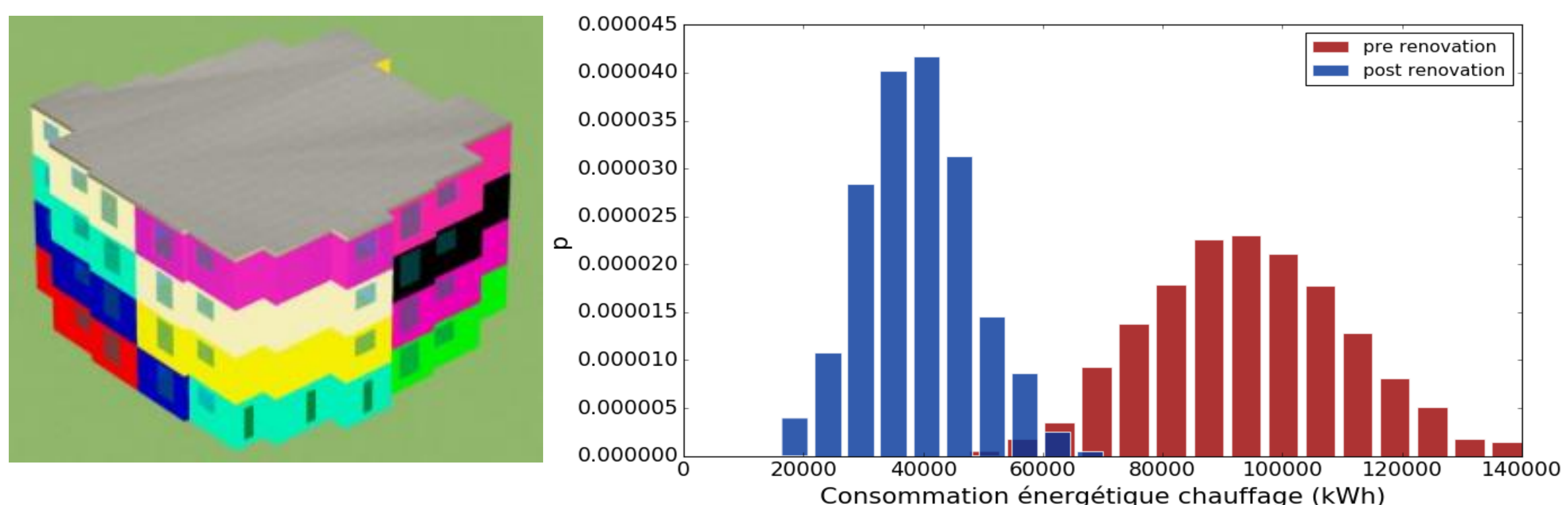


Figure 2 : Modèle 3D *Pléiades* du bâtiment et des zones thermiques (gauche) et distribution des consommations énergétiques de chauffage pré- et post-rénovation (droite)

4.2. MODELISATION DES INCERTITUDES ET VARIABILITES

Des fonctions de densité de probabilités associées aux paramètres statiques incertains des modèles sont considérées. Elles concernent les caractéristiques des parois, des menuiseries, les ponts thermiques et infiltrations, les débits de ventilation. Du fait du manque d'informations, des lois uniformes sont considérées. Les bornes choisies sont décrites dans le tableau 1. Le nombre d'éléments concernés est inscrit entre parenthèses pour les modèles pré- et post-rénovation quand ils diffèrent, donnant une idée de la dimensionnalité de la propagation d'incertitude. Une variabilité météorologique fournie par le modèle de génération stochastique présenté ci-dessus est considérée à partir du fichier météo type de Mâcon.

Paramètres communs	Borne inf.	Borne sup.
conductivité matériaux (4-8)	- 5 %	+ 5%
masse volumique matériaux (4-8)	- 1 %	+ 1 %
chaleur spécifique matériaux (4-8)	- 5 %	+ 5%
épaisseur matériaux dans parois (10-12)	+ 1 cm	- 1 cm
hauteur-largeur parois (4-5)	- 1 %	+ 1 %
facteur solaire vitrages (3)	- 5 %	+ 5%
conductivité vitrages (3)	- 5 %	+ 5%
hauteur-largeur vitrages (3)	- 1 %	+ 1 %
ponts thermiques linéiques (6-5)	- 10 %	+ 10 %
ponts thermiques menuiseries (2)	- 10 %	+ 10 %
infiltrations (17)	- 10 %	+ 10 %
scénario de ventilation (1)	- 5 %	+ 5%
rendement chauffage (1)	90 %	100 %

Tableau 1 : Bornes des lois de distribution uniformes considérées pour les paramètres incertains des modèles SED pré- et post-rénovation

Le modèle de variabilité stochastique des comportements des occupants est utilisé, renseigné des données disponibles : nombre de personnes par appartement et statut de locataire. Les propagations des incertitudes et variabilité (PIV) pré- et post-travaux (deux fois 1000 simulations) fournissent une distribution des consommations de chauffage représentée sur la Figure 2.

4.3. FACTEURS D'AJUSTEMENT ET PLAN DE MESURES

Des facteurs d'ajustement permettant une contextualisation de l'engagement de GPE sont définis. L'impact de la température extérieure, des températures de consigne et des consommations d'électricité spécifique est considéré à travers trois facteurs d'ajustement : les degrés-heures à base 18 sur la saison de chauffe (DH_{18}), la température intérieure moyenne dans les appartements sur la saison de chauffe (\bar{T}_{int}) et la consommation électrique sur la saison de chauffe (E_{elec}). Ces éléments ont été mesurés sur ce bâtiment durant la première année d'exploitation (Enertech, 2013). Les incertitudes de mesure sont définies dans le tableau 2.

Facteur d'ajustement	Incertitude
Consommation chauffage (kWh)	+/- 5 %
DH_{18} (°C.h)	+/- 5 %
E_{elec} (kWh)	+/- 2 %
\bar{T}_{int} (°C)	+/- 0,125 °C

Tableau 2 : Incertitudes sur la mesure des grandeurs d'intérêt

Pour les valeurs de FA et de consommations associées à chaque simulation post-rénovation, des tirages aléatoires d'erreurs de mesure sont réalisés dans des lois normales tronquées. Ces erreurs, correspondant à la mesure virtuelle des situations simulées, modifient les résultats de simulation.

4.4. MODELES POUR LA GPE

L'exploitation des résultats de simulation avant travaux permet d'obtenir par régression linéaire multiple l'espérance conditionnelle de la consommation de chauffage (C_{pre}) en fonction des FA. Ce modèle, qui n'a pas été calibré dans ce cas d'étude, constitue la référence du calcul des gains relatifs :

$$C_{pre} = 9,43.10^4 + \left[1,44.10^5 * \left(\frac{DH_{18}}{DH_{18-ref}} - 1 \right) + 1,99.10^4 * (\bar{T}_{int} - \bar{T}_{int-ref}) - 3,26.10^4 * \left(\frac{E_{elec}}{E_{elec-ref}} - 1 \right) \right] (10)$$

avec $DH_{18-ref} = 48700 \text{ } ^\circ\text{C.h}$, $\bar{T}_{int-ref} = 18,3^\circ\text{C}$ et $E_{elec-ref} = 38600 \text{ kWh}$

Le quantile global $GR_{5\%-glob}$ des écarts relatifs correspondant aux résultats de simulation (9) est de 55,4 % (la moyenne est de 64,2 %). Il constitue une valeur moyennée du quantile des gains relatifs, sur l'ensemble du domaine des FA, dont la distribution est présentée à la Figure 3.

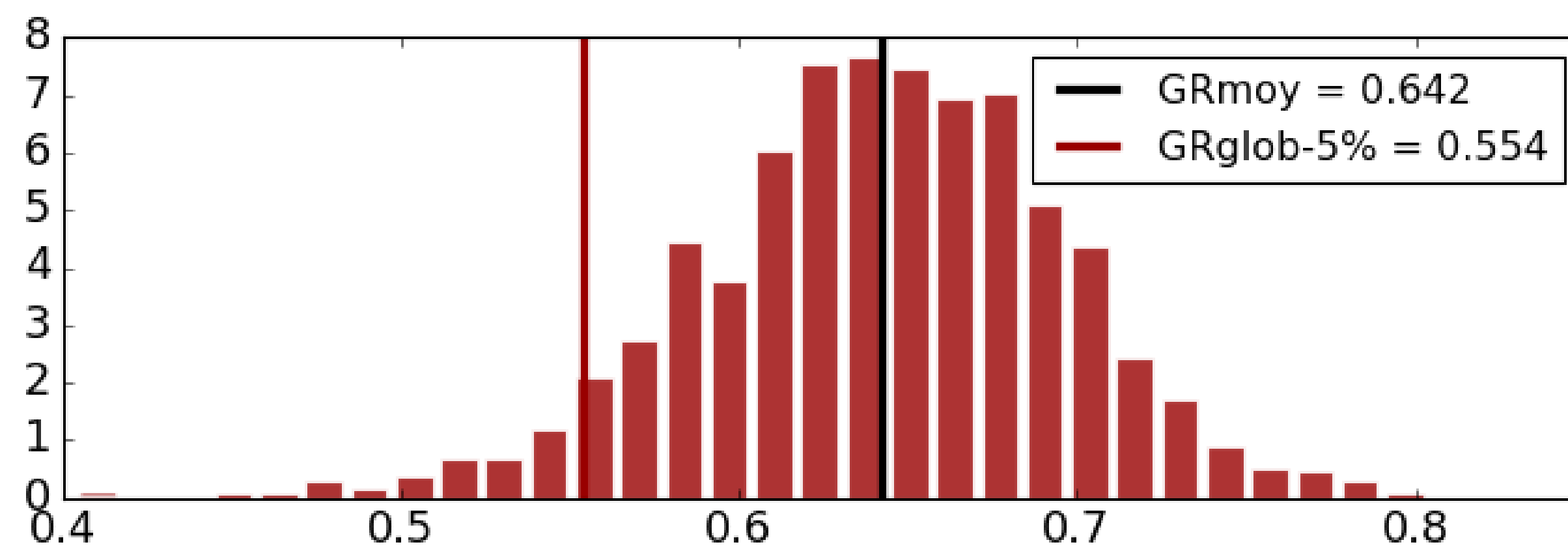


Figure 3 : Distribution des écarts relatifs entre les simulations post-travaux et les consommations de référence avant travaux associées

À partir des résultats de la PIV post-rénovation, la régression quantile fournit le modèle du quantile conditionnel de la consommation énergétique de chauffage à 5 % de risques de défaut ($LGC_{5\%}$) :

$$LGC_{5\%} = 3,61 \cdot 10^4 + \left[6,75 \cdot 10^4 * \left(\frac{DH_{18}}{DH_{18-ref}} - 1 \right) + 1,56 \cdot 10^4 * (\bar{T}_{int} - \bar{T}_{int-ref}) - 3,42 \cdot 10^4 * \left(\frac{E_{elec}}{E_{elec-ref}} - 1 \right) \right] \quad (11)$$

On constate que les coefficients sont différents par rapport au modèle de référence, la dépendance à DH_{18} et à \bar{T}_{int} étant plus faible et celle à E_{elec} plus forte. Le gain relatif $GR_{5\%}$ ajustable est défini selon l'équation (8), sa valeur de référence étant de 61,7 %. La Figure 4 présente l'évolution de $GR_{5\%}$ en fonction de chaque FA, les autres étant considérés à leurs valeurs de référence. Le gain relatif garanti pour un risque de 5 % varie de manière importante en fonction des valeurs de FA, de 40 à 80 %, avec une forte dépendance à la température intérieure moyenne en particulier.

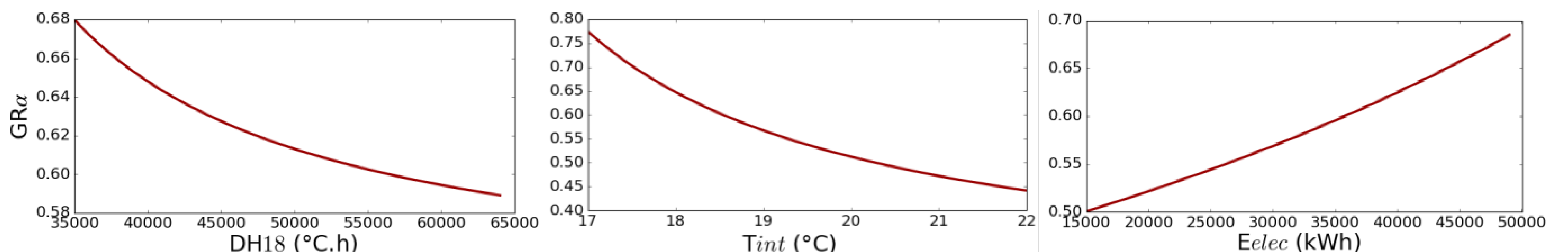


Figure 4 : Variation du gain relatif garanti en fonction des facteurs d'ajustement ($\alpha = 5\%$)

4.5. MESURE ET VERIFICATION

Les mesures effectuées dans le bâtiment durant la première année d'exploitation suivant la rénovation permettent de mener à son terme le processus de M&V et de tester l'engagement de GPE. Le tableau 3 présente les valeurs de consommation de chauffage et des FA relevées durant la saison de chauffe.

DH_{18} (°C.h)	55 368
E_{elec} (kWh)	19681
\bar{T}_{int} (°C)	22,9
Consommation chauffage (kWh)	64700

Tableau 3 : Résultats de mesure durant la première année d'exploitation

De faibles consommations d'électricité spécifiques sont constatées ainsi que des températures hivernales plutôt froides et des températures intérieures en saison de chauffe très élevées. Principalement à cause de ce dernier facteur, le gain relatif garanti est ajusté et limité à 39,6 %. Le gain réel mesuré est de 70,7 %, et satisfait donc largement à l'engagement.

5. CONCLUSION

La méthodologie présentée repose sur la simulation d'un modèle physico-probabiliste décrivant le bâtiment étudié, l'incertitude de ses paramètres et la variabilité de ses sollicitations. L'expression d'une valeur limite garantie de consommation énergétique post-travaux, associée à un risque de non-respect de cet engagement, est rendue possible par l'application d'une méthode de régression quantile appliquée à un ensemble de données : la grandeur d'intérêt (consommations de chauffage) et des variables explicatives (facteurs d'ajustement). Ces données intègrent l'impact des incertitudes de mesure par le moyen du tirage aléatoire d'erreurs de mesure virtuelles obtenues grâce à la définition préalable du plan de mesure. La variation du gain relatif attendu, pour un risque donné, en fonction des facteurs d'ajustement a été mise en évidence, et sa prise en compte dans les contrats de GPE doit être envisagée.

6. PERSPECTIVES

Afin de caractériser de manière plus précise le risque de défaut des performances garanties, la robustesse du modèle linéaire fourni par la régression quantile peut être étudié, et notamment la variance des coefficients estimés. Une méthode de *bootstrap* peut ainsi permettre de calculer l'écart-type de la limite garantie de consommations de référence et donc du gain relatif garanti

Remerciements :

Ce travail a été supporté par la chaire Paristech-VINCI *Eco-conception des ensembles bâtis et des infrastructures*.

7. BIBLIOGRAPHIE

- Enertech, 2013. Immeuble d'habitation, rue Vignettes, FEYZIN (69)
Campagne de mesures des performances énergétiques avant/après rénovation. 2013. S.l. : s.n.
- EVO, 2012. International Performance Measurement and Verification Protocol. Vol. 1. 2012. S.l. : s.n.
- Haldi, F. et D. Robinson, 2011. The impact of occupants' behaviour on building energy demand. In :
Journal of Building Performance Simulation. 2011. Vol. 4, n° 4, p. 323-338.
- Hong, T., W.-K. Chang et H.-W. Lin, 2013. A fresh look at weather impact on peak electricity demand
and energy use of buildings using 30-year actual weather data. In : Applied Energy. novembre
2013. Vol. 111, p. 333-350. DOI 10.1016/j.apenergy.2013.05.019.
- Koenker, R., 2005. Quantile Regression. S.l. : Cambridge University Press. Econometric Society
Monographs Series.
- Ligier, S., M. Robillart, P. Schalbart et B. Peuportier, 2017. Energy Performance Contracting
Methodology Based upon Simulation and Measurement. In : Building Simulation 2017
[en ligne]. San Francisco : s.n. 2017. p. 10.
- van Dronkelaar, C., M. Dowson, C. Spataru et D. Mumovic, 2016. A Review of the Regulatory
Energy Performance Gap and Its Underlying Causes in Non-domestic Buildings. In : Frontiers
in Mechanical Engineering
- Vorger, E., P. Schalbart et B. Peuportier, 2014. Integration of a comprehensive stochastic model of
occupancy in building simulation to study how inhabitants influence energy performance. In :
Proceedings PLEA 2014. Ahmedabad (India) : s.n. décembre 2014. p. 8.

Optimisation multi-acteurs appliquée à la valorisation de chaleur fatale d'un acteur industriel flexible

Lou Morriet^{*1}, Camille Pajot¹, Benoit Delinchant¹, Yves Marechal¹, Frédéric Wurtz¹, François Debray², Benjamin Vincent²

¹ Univ. Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP**, G2Elab, 38000 Grenoble, France
Bâtiment GreEn-ER, 21 Avenue des Martyrs, CS 90624, 38031 GRENOBLE CEDEX 1

² LNCMI-EMFL CNRS, UGA, INSA, UPS 25, avenue des martyrs BP 166, 38042 Grenoble CEDEX 9, FRANCE

*lou.morriet@g2elab.grenoble-inp.fr

RESUME. Cet article présente un outil de modélisation et d'optimisation d'échanges d'énergie à l'échelle d'un quartier permettant de valoriser la flexibilité des acteurs appliqué à un cas d'étude. Cet outil permet de modéliser des échanges à l'échelle macroscopique pour des projets multi-acteurs. Ecrit en langage Python, il utilise une optimisation MILP (Mixed-Integer Linear Programming). Le cas d'étude présenté dans cet article est situé sur la Presqu'île de Grenoble. Il s'agit du projet Valocal. Ce projet a pour but de valoriser la chaleur fatale du Laboratoire National de Champs Magnétiques Intenses (LNCMI) en la réinjectant dans le réseau de chauffage urbain de la ville. Cet article présente la modélisation des acteurs du projet – principalement l'opérateur du réseau de chaleur – dans le but de jouer sur les flexibilités des deux acteurs en fonction du taux de valorisation de la chaleur fatale, du prix de la calorie, ou encore des émissions CO2.

MOTS-CLÉS : optimisation MILP, acteurs flexibles, valorisation de chaleur fatale

ABSTRACT. This article presents a modelling and optimization tool for district energy exchanges aiming to add value to actors' flexibility in a multi-stakeholder project thanks to a case study. This tool uses MILP (Mixed-Integer Linear Programming) optimization solved by Gurobi in mono-server and Python language. The case study proposes to optimize recovery of inevitable heat, produced by the French National High Magnetic Fields Laboratory (LNCMI), by transferring it into the heat network of the city. The project untitled Valocal is located on the district Presqu'île in Grenoble. This article presents the modelling of the actors – mainly the heat network operator- in order to be able to play with both actors' flexibility considering heat recovery rate, heat prices or CO2 emissions.

KEYWORDS : MILP optimization, flexible actors, heat recuperation

1. INTRODUCTION

La récupération de chaleur fatale a été identifiée comme un des leviers pour atteindre les objectifs de la Loi de Transition pour La Croissance Vert concernant la part des énergies renouvelables dans le mix énergétique. Néanmoins, la temporalité dans l'accès à la ressource peut être un frein dans les projets de valorisation de chaleur industrielle (ADEME 2017). Cependant, certains acteurs industriels disposent de flexibilité dans leur production de chaleur fatale. Notre approche de modélisation et notre méthodologie, incluant le développement d'un outil logiciel, ont ici pour but de permettre la valorisation de cette flexibilité.

Le cas d'étude Valocal, sur lequel nous travaillons, est situé sur la Presqu'île de Grenoble. Le projet Valocal étudie la valorisation de la chaleur fatale émise par le Laboratoire National de Champs Magnétiques Intenses (LNCMI) lors de leurs expériences en la réinjectant dans le réseau de chaleur urbain de la ville de Grenoble. Le LNCMI, possède des installations électriques d'une puissance maximale de 24 MW avec une évolution prévue vers 30 MW en 2021. Sa consommation annuelle, de l'ordre de 14 à 18 GWh, permet de réaliser 2500 à 3000 h d'expériences sous champs magnétiques intenses. Cette énergie électrique est transformée en chaleur dans l'aimant pour champs intenses et les calories - environ 12 GWh - sont rejetées dans la rivière Isère par le biais d'un circuit d'eau de refroidissement. Le LNCMI dispose de flexibilité car le planning d'expériences peut être modifié afin d'adapter sa production à la consommation des clients du réseau de chaleur. Ainsi, le LNCMI peut être considéré comme un acteur industriel flexible, représentatif d'acteurs électro-intensifs de plus en plus intégrés dans les tissus urbains (les sites industriels classiques ou émergents comme les data-centres). La ville de Grenoble dispose par ailleurs d'un réseau de chaleur, ce qui représente une opportunité pour la valorisation de la chaleur fatale du LNCMI. La chaleur est pour le moment produite à partir de cinq centrales utilisant un ou plusieurs combustibles parmi les déchets ménagers, le bois, les farines animales, le gaz, le charbon ou le fioul.

Afin d'optimiser la planification des consommations du LNCMI, un premier travail, décrit dans l'article *Valorisation optimale de chaleur fatale d'un site à très forte consommation électrique* (Pajot et al. 2017), a permis de modéliser le problème à partir de données fournies par le LNCMI sur ses activités d'une part et des consommations de chaleur du quartier mesurées d'autre part. Ce travail propose un outil d'aide à la décision pour une planification optimale d'expériences adaptée à la valorisation de chaleur fatale. Cependant, cette modélisation ne permet pas de comparer la calorie émise par le LNCMI avec celle produite par les centrales de production du réseau de chaleur urbain dont les coûts de production et les émissions de CO₂ varient en fonction des combustibles utilisés. Il nous semble donc intéressant d'affiner le modèle en modélisant ce réseau et les centrales associées. Ceci afin d'optimiser l'injection de chaleur dans le réseau urbain et ainsi de disposer d'un outil permettant d'améliorer la performance énergétique, économique ou environnementale du projet. Dans cet article nous nous concentrerons sur une optimisation des coûts de production mais le même travail peut être réalisé pour optimiser les émissions carbonées.

La première partie de cet article présente les choix d'optimisation opérés. Dans une seconde partie, nous présentons la modélisation du problème et principalement la modélisation de l'opérateur du réseau de chaleur. La troisième partie présente des résultats obtenus à partir de notre outil dans le but d'initier une discussion entre les acteurs. En conclusion nous proposons des pistes d'amélioration pour l'outil.

2. OPTIMISATION MILP MULTI-ACTEURS : ELEMENTS DE CADRAGE

La modélisation des acteurs lors de la définition du problème d'optimisation nous amène à considérer de nombreuses variables et contraintes. C'est pourquoi nous avons retenu des approches d'optimisation linéaires. De plus, le recours à des variables binaires et continues, afin de modéliser au mieux le problème, nous a amené à choisir des approches d'optimisation MILP (Mixed-Integer Linear Programming). Les approches MILP ont aussi été retenues dans d'autres travaux cherchant à optimiser des systèmes énergétiques pour l'échelle quartier (Bollinger 2017).

Le problème modélisé est écrit en programmation orientée objet via le langage Python. Ce choix nous a permis de réutiliser les briques technologiques développées dans une bibliothèque Python accessibles en open source¹ (Reinbold et al. 2018). Cette bibliothèque propose des modèles d'objets énergétiques tels que des modèles de production d'énergie, de consommation d'énergie, etc. appelés « unité » dans la suite de l'article. Ce travail a aussi pour but d'alimenter cette bibliothèque. L'optimisation est résolue en mono-solveur par l'optimiseur Gurobi.

3. FORMULATION DU PROBLEME D'OPTIMISATION : APPROCHE METHODOLOGIQUE

Le cas d'étude Valocal amène à modéliser deux acteurs producteurs de chaleur : le LNCMI, fournissant de la chaleur de récupération ; l'opérateur du réseau de chauffage urbain, fournissant de la chaleur à partir de centrales de production. La modélisation globale du problème nécessite d'ajouter les courbes de charges des consommateurs ainsi que les nœuds d'équilibre du réseau de chaleur (*Figure 1*).

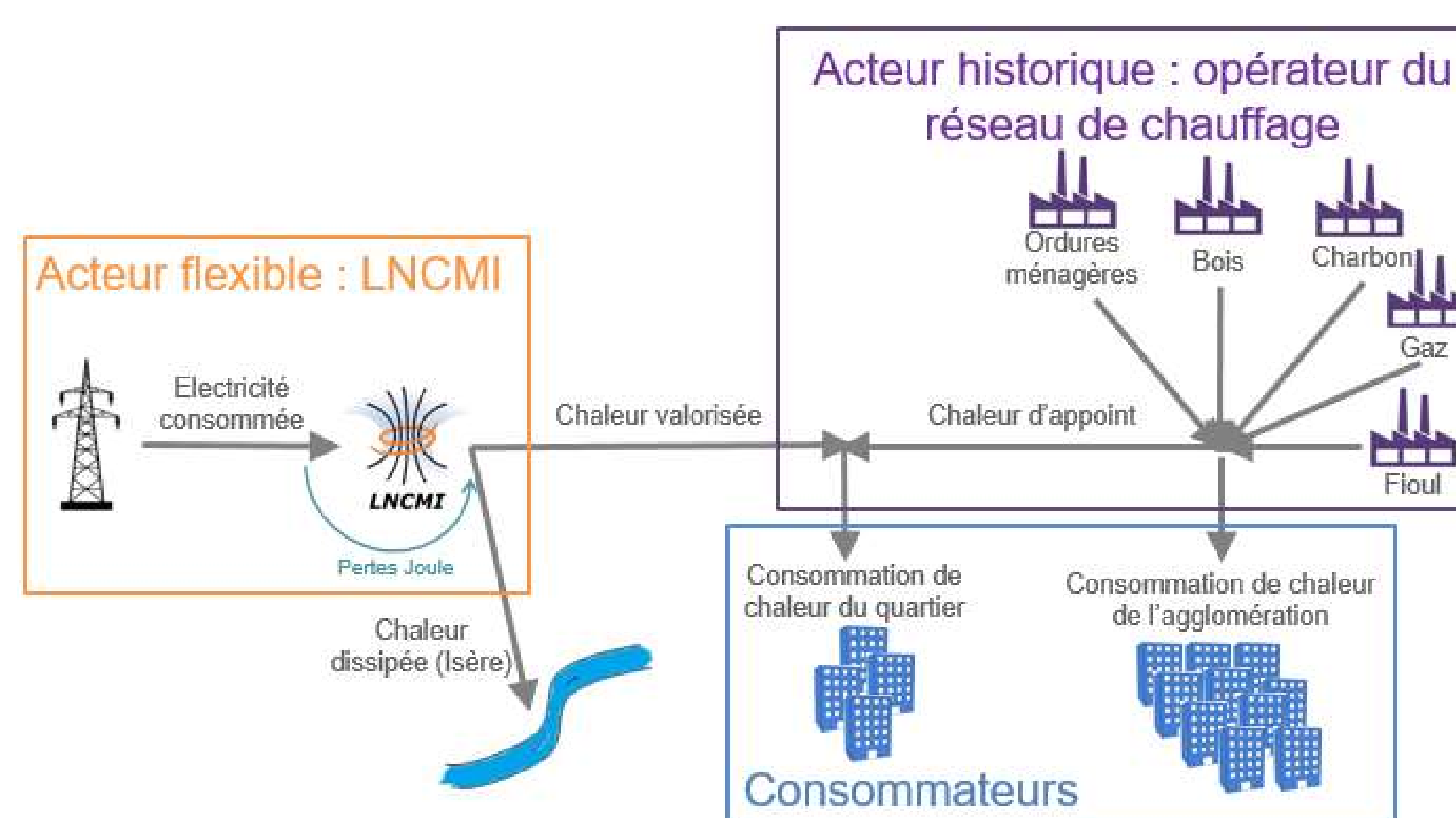


Figure 1: Présentation du projet Valocal

Afin de décrire au mieux les acteurs, nous avons cherché à les modéliser à partir de leurs données d'entrée, de leurs contraintes et de leurs objectifs. Les contraintes sont modélisées sous forme d'équations. Les objectifs sont modélisés par des fonction-objectif qui sont des fonctions linéaires que l'on cherche à maximiser ou à minimiser dans un problème d'optimisation linéaire.

3.1. MODELE DU LNCMI

La modélisation du LNCMI est détaillée dans l'article *Valorisation optimale de chaleur fatale d'un site à très forte consommation électrique* (Pajot et al. 2017). Le LNCMI est modélisé par une unité de production convertissant l'électricité en chaleur, une unité de dissipation de chaleur dans la rivière Isère et une unité de valorisation de la chaleur alors injectée dans le réseau de chauffage urbain.

Afin de rendre viable le projet, il faut éviter que la valorisation de la chaleur entraîne des coûts supplémentaires pour les deux acteurs. Pour cela, nous avons associé un coût à la chaleur valorisée C_{LNCMI_valo} . Il faut donc que le budget final du LNCMI constitué des coûts de fonctionnement du LNCMI C_{LNCMI_prod} - comprenant des surcoûts de fonctionnement aux périodes où l'électricité est plus chère et dus au fonctionnement des pompes à chaleur - auquel on soustrait le revenu associé à la valorisation de chaleur C_{LNCMI_valo} soient inférieurs au budget du LNCMI avant le projet de valorisation B_{LNCMI_t0} , donnée fournie par le LNCMI. La contrainte (1) est ajoutée sous forme d'inéquation.

$$C_{LNCMI_prod} - C_{LNCMI_valo} \leq B_{LNCMI_t0} \quad (1)$$

¹ Library For Linear Modeling of Energetic Systems : <https://github.com/ReinboldV>

3.2. MODELE DE L'OPERATEUR DU RESEAU DE CHAUFFAGE URBAIN

L'Opérateur de Réseau de Chauffage Urbain (ORCU) gère cinq centrales réparties sur l'agglomération. Ces cinq centrales utilisent un ou plusieurs combustibles - déchets ménagers, bois, farines animales, gaz, charbon ou fioul- pour produire de la chaleur. Pour alléger la modélisation, nous avons choisi de modéliser cinq unités de production associées chacune à un seul combustible (*Figure 1*). Les farines animales ont été modélisées avec le bois car elles sont brûlées avec celui-ci. Chaque centrale est définie à partir de puissances minimale et maximale de production de chaleur pour chaque combustible. Nous avons fait l'hypothèse d'un ordre de priorité dans la mise en route des centrales crédible d'un point de vue industriel. Cet ordre de priorité est défini sous forme de contraintes, i.e. d'inéquations (2). La variable $u_{centrale}$ est une variable binaire, en fonctionnement $u_{centrale} = 1$.

$$u_{2\text{ème_centrale}} [t] \geq u_{1\text{ère_centrale}} [t] \quad (2)$$

Cherchant à optimiser la valorisation de chaleur d'un point de vue économique et environnemental nous avons représenté le prix unitaire de la calorie en fonction des combustibles à partir des informations disponibles dans les archives de la ville de Grenoble (2013) ainsi que le coefficient des émissions de CO₂ (SVDU 2012; Ministère de l'économie, des finances et de l'industrie 2018) présentés dans le tableau ci-dessous.

Nom des centrales	Prix unitaire de la calorie selon le combustible : été / hiver (€/MWh)	Coefficient d'émissions de CO ₂ (kgeCO ₂ /MWh)
Ordures Ménagères	15,4 / 34,8	149
Bois	32,7	13
Charbon	33,1	343
Gaz	85,5 / 94,5	206
Fioul	100	282

Tableau 1: Récapitulatif des données de modélisation des centrales

Les variables définies lors de l'optimisation sont les suivantes : le fonctionnement binaire de la centrale $u_{centrale}$ (t) et la puissance des centrales $P_{centrale}$ (t) à chaque instant ; ainsi que l'énergie produite $E_{centrale}$, le coût total $C_{centrale}$ et les émissions de CO₂ $CO_{2_centrale}$ sur la durée de l'optimisation.

De même que pour le LNCMI, il est nécessaire que l'ORCU ne perde pas d'argent dans la vente de chaleur par rapport à la situation initiale sans valorisation de chaleur. Cette condition est modélisée par l'équation (3) dans notre modèle. Ainsi, le budget final de l'ORCU constitué de la somme des coûts de production des centrales $\sum_{Centrale} C_{Centrale}$ et du coût associé à la valorisation de la chaleur C_{LNCMI_valo} doit rester inférieur au budget initial de l'ORCU avant le projet de valorisation B_{ORCU_t0} . Le calcul du budget initial de l'opérateur réseau est détaillé dans la partie 3.4.3.

$$\sum_{Centrale} C_{Centrale} + C_{LNCMI_valo} \leq B_{ORCU_t0} \quad (3)$$

3.3. MODELISATION DES AUTRES OBJETS ENERGETIQUES DU MODELES

Pour compléter la modélisation du problème, il est aussi nécessaire de modéliser les charges ainsi que les nœuds d'équilibre du réseau.

3.3.1. Modèle des charges

Notre problème nécessite de modéliser deux charges : les consommations de la Presqu'île $P_{L_PI}(t)$ et celle de l'agglomération grenobloise hors Presqu'île $P_{L_aggl0}(t)$ (*Figure 1*). Les charges sont définies par

des données d'entrée, basées sur des données de consommation de 2015. Il est nécessaire de modéliser les consommations de l'ensemble de l'agglomération grenobloise, en plus de celle de la Presqu'île, à cause de la modélisation des centrales de l'ORCU. En effet, les bornes de fonctionnement des puissances de mise en route des centrales correspondent à la demande de l'agglomération et de la Presqu'île.

3.3.2. Modèle du réseau de chaleur

Afin d'assurer l'équilibre production - consommation aux différents nœuds du réseau de chaleur (*Figure 1*), les équations (4) et (5) sont ajoutées au modèle. Dans notre cas d'étude, seuls les consommateurs de la Presqu'île peuvent bénéficier de la chaleur produite par le LNCMI.

$$P_{L\text{ agglo}}(t) + P_{L\text{ appoint}}(t) = \sum_{\text{centrale}} P_{\text{centrale}}(t) \quad (4)$$

$$P_{L\text{ PI}}(t) = P_{\text{LNCMI valorisee}}(t) + P_{L\text{ appoint}}(t) \quad (5)$$

3.4. OPTIMISATION DU PROBLEME VALocal

3.4.1. Optimisation Principale

L'optimisation a pour but de définir des plannings d'expériences pour le LNCMI et de production en fonction des combustibles pour l'ORCU optimaux vis-à-vis des objectifs des acteurs. Ci-dessous, la fonction-objectif économique (6) qui cherche à minimiser les coûts des deux acteurs, i.e. les budgets finaux des deux acteurs. Afin de prendre en compte le caractère multi-acteurs du projet, un coefficient de pondération α , compris entre 0 et 1, permet de faire varier le poids des acteurs dans l'optimisation. Cette approche permet de calculer des combinaisons de solutions optimales en fonction des coûts des acteurs. Cet ensemble de solutions constituent un front de Pareto. Les deux acteurs pourront ensuite trouver un compromis parmi cet ensemble.

Le budget final de l'ORCU est bien supérieur au budget final du LNCMI car il correspond à la production de chaleur pour l'agglomération en plus de la Presqu'île. Dans le but de donner le même poids aux deux acteurs dans la décision, nous avons soustrait le coût de la production de chaleur pour l'agglomération C_{agglo} au coût total de production de l'ORCU $\sum_{\text{Centrale}} C_{\text{Centrale}}$. Le budget final de l'ORCU correspond alors aux coûts de production des centrales de l'ORCU pour la Presqu'île auquel s'ajoutent le coût pour la chaleur valorisée s'il y en a un (7). Le budget final du LNCMI correspond quant à lui aux coûts de consommation d'électricité $C_{\text{LNCMI prod}}$ auxquels on peut soustraire le revenu de la chaleur valorisée (8).

$$\text{Min} [(1-\alpha) * B_{\text{LNCMI_tf}} + \alpha * B_{\text{ORCU_tf}}] \quad (6)$$

$$\text{avec : } B_{\text{ORCU_tf}} = \sum_{\text{Centrale}} C_{\text{Centrale}} - C_{\text{agglo}} + C_{\text{LNCMI valo}} \quad (7)$$

$$B_{\text{LNCMI_tf}} = C_{\text{LNCMI prod}} - C_{\text{LNCMI valo}} \quad (8)$$

3.4.2. Calcul du coût de production de chaleur par l'ORCU pour l'agglomération hors Presqu'île

Pour calculer le coût de la production de chaleur pour l'agglomération, il faut réaliser en amont de l'optimisation principale une optimisation de la production de chaleur de l'ORCU tout en répondant aux consommations de l'agglomération hors Presqu'île (*Figure 2*). La fonction-objectif alors la suivante :

$$\text{Min} \sum_{\text{centrale}} C_{\text{Centrale}} \quad (9)$$

3.4.3. Calcul du coût de production de chaleur par l'ORCU avant le projet de valorisation

Pour calculer le coût de production de l'ORCU avant le projet de valorisation de chaleur, il suffit d'optimiser la production de chaleur de l'ORCU tout en répondant aux consommations de l'agglomération et de la Presqu'île (*Figure 3*). Cette optimisation sera appelée « optimisation t0 ORCU ». La fonction-objectif est alors la suivante :

$$\text{Min} \sum_{\text{centrale}} C_{\text{Centrale}} \quad (10)$$



Figure 2: optimisation t0 ORCU hors Presqu'île - Figure 3 : Optimisation t0 ORCU

4. RESULTATS & DISCUSSION

Une fois le cas d'étude défini nous avons cherché à valider la modélisation de l'opérateur du réseau de chaleur. Pour cela, nous avons comparé le mix énergétique de l'agglomération grenobloise au mix énergétique calculé. Ensuite, nous avons cherché à produire des résultats qui pourraient servir de supports de discussion entre les acteurs.

4.1. COHERENCE DES RESULTATS D'OPTIMISATION

Pour valider la cohérence de la modélisation de l'ORCU nous avons choisi de comparer (Tableau 2) le mix énergétique de la métropole Grenobloise de l'année 2015/2016 (Grenoble Alpes Métropole 2018) avec le mix énergétique calculé lors de l'optimisation t0 ORCU (cf. 3.4.3).

Combustibles	Mix énergétique 2015/2016	Mix énergétique de la modélisation
Ordures Ménagères	35,7%	37,5%
Bois & farines animales	28,1%	32%
Charbon	22,9%	29%
Gaz	10%	1,5%
Fioul	3,3%	0%

Tableau 2 : Comparaison des mix énergétiques 2015/2016 et modélisé

On peut observer que l'ordre en proportion des combustibles consommés est respecté. De plus, on observe une cohérence dans les proportions même si elles ne sont pas identiques. Les différences peuvent s'expliquer par la modélisation simplifiée des centrales –associées à un seul combustible – et par des contraintes des centrales et du réseau de chaleur urbain qui n'ont pas été modélisées en détails. Par exemple, certaines centrales auraient besoin d'ajouter du charbon ou du fioul en plus du bois à partir d'une certaine puissance. Ces contraintes manquantes peuvent expliquer le manque de fioul et de charbon dans les résultats du modèle par rapport au mix énergétique mesuré. S'agissant d'un outil d'aide à la décision et non de gestion temps réel et n'ayant pas plus d'informations sur les contraintes de fonctionnement nous avons considéré que le niveau de finesse était suffisant dans le cas de cette première étude.

4.2. RESULTATS ET PROBLEMATIQUES MULTI-ACTEURS

Afin de montrer l'impact du tarif de valorisation de la chaleur sur le fonctionnement des centrales au niveau de la Presqu'île, nous avons choisi de représenter le mix énergétique de la Presqu'île pour deux tarifs de valorisation différents :

- 33€/MWh (Figure 4) le prix est alors entre celui du bois et celui du charbon,
- 95€/MWh (Figure 5) le prix est alors entre celui du gaz et du fioul.

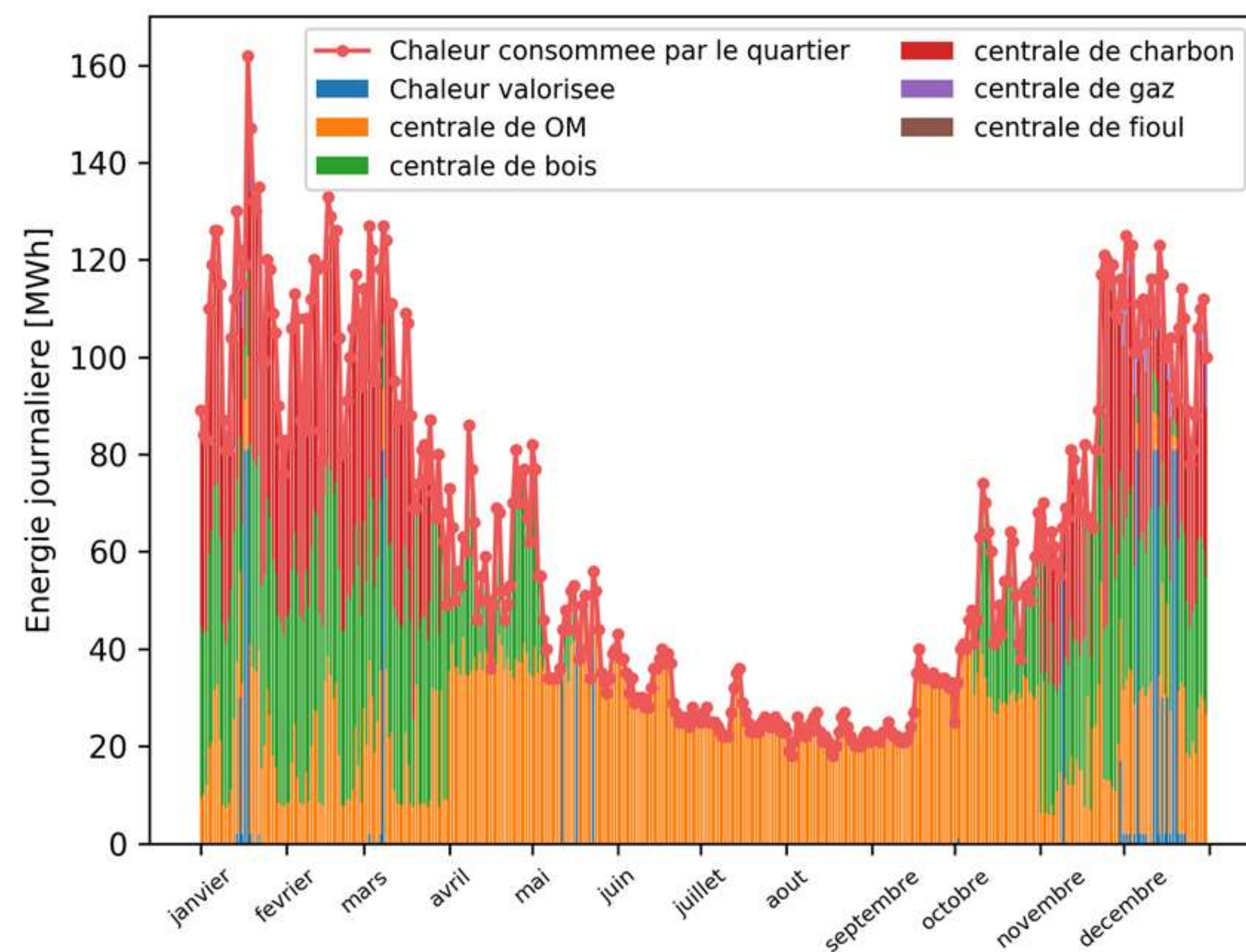
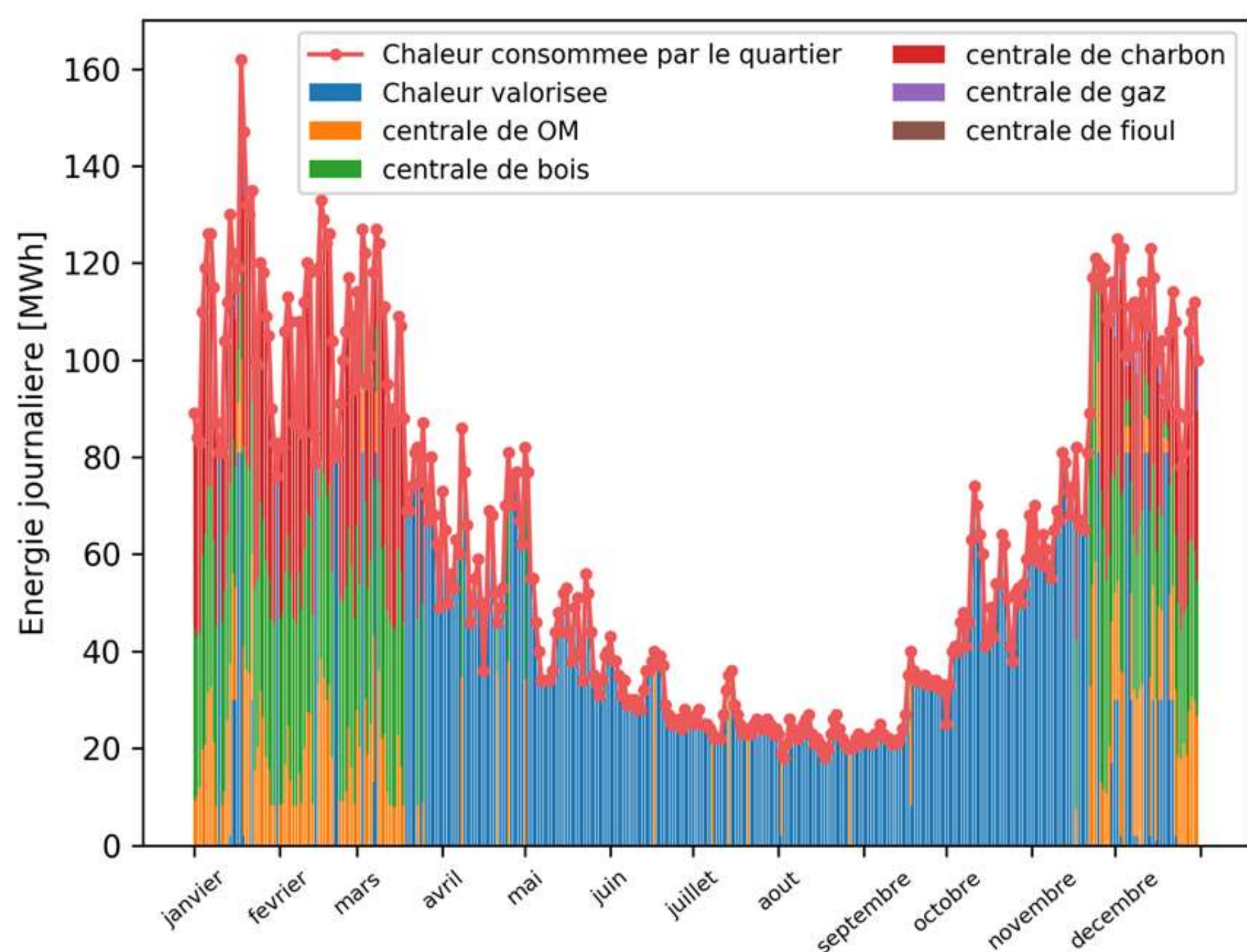


Figure 4: Mix Presqu'île valorisation 33€/MWh Figure 5: Mix Presqu'île valorisation 95€/MWh

Ces graphiques mettent en évidence que la proportion des combustibles utilisés pour produire la chaleur aux consommateurs de la Presqu'île dépend du prix de la calorie à valoriser. Ceci implique que le taux de valorisation de la chaleur est fortement dépendant du prix fixé. Le prix de la calorie valorisée doit être un compromis permettant au LNCMI de produire de la chaleur au moment où la Presqu'île consomme tout en maximisant le taux de valorisation. Ces deux cas présentent un intervalle de prix pour la valorisation qui permettrait de répondre à ces critères.

L'utilisation d'une courbe de Pareto peut aussi servir de base de discussion entre les acteurs pour trouver un compromis et permettre la mise en place du projet. C'est pourquoi nous avons cherché à tracer la frontière de Pareto ci-dessous, correspondant à un coût de valorisation de 33€/MWh.

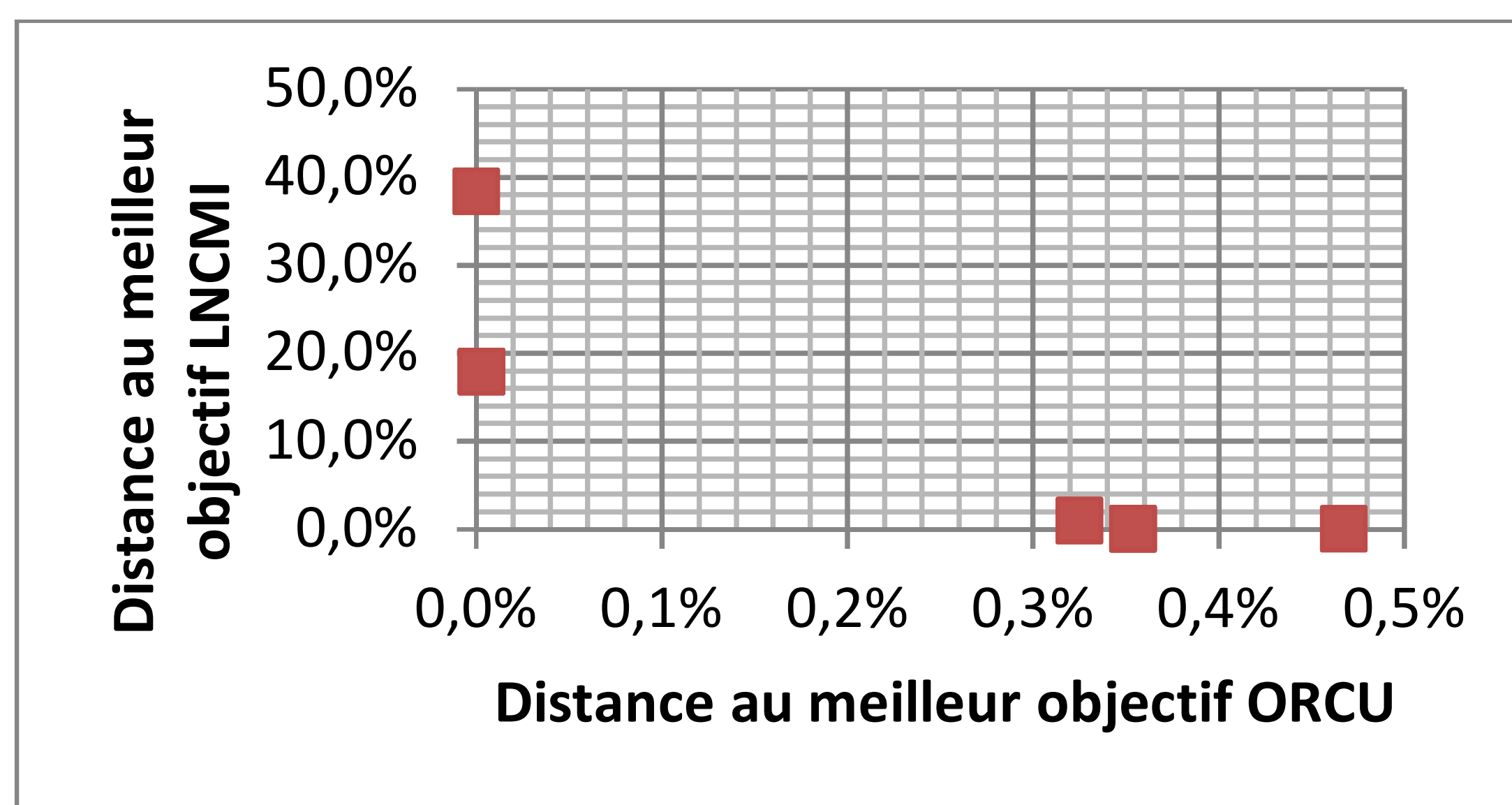


Figure 6: Frontière de Pareto pour un coût de valorisation de 33€/MWh

Ce graphique met en évidence les coûts pour chaque acteur selon que l'on souhaite minimiser les coûts de l'ORCU, ceux du LNCMI ou choisir un entre-deux. On observe plusieurs solutions avec des coûts différents pour le LNCMI et l'ORCU, même si les variations sont assez faibles. La discontinuité du front de Pareto pourrait s'expliquer par le fait que les puissances minimales de mise en route des centrales sont non nulles et donc que la mise en route des centrales se fait par échelon.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES POUR L'OUTIL

Cet article a permis de présenter un outil d'optimisation MILP pour les échanges d'énergies urbains développé dans une perspective de projet multi-acteurs. Cet article s'appuie sur le cas d'étude Valocal sur lequel l'outil a été développé. L'article a permis de mettre en évidence la modélisation des acteurs, ici principalement un opérateur de réseau de chauffage urbain, ainsi que le problème dans son ensemble. Le projet étant multi-acteurs, nous avons utilisé une fonction-objectif pondérée par un coefficient

permettant de tracer une courbe de Pareto. Une première optimisation a permis d'évaluer la cohérence de la modélisation vis-à-vis des données du problème. L'importance de l'hypothèse simplificatrice d'avoir un seul combustible par centrale reste à évaluer mais cela nécessiterait plus d'informations sur le fonctionnement du réseau de chaleur. Une seconde optimisation nous a permis de produire des graphiques, dont une courbe de Pareto, qui peuvent servir de supports de discussion entre les acteurs.

La résolution de l'optimisation a été faite en monosolveur pour ce travail. Ce type de résolution implique que les données, contraintes et fonction-objectif soient connues de tous. Dans le but d'obtenir des modélisations plus précises, une solution multi-solveurs pourrait permettre à chaque acteur d'ajouter des données et contraintes parfois confidentielles.

Il est aujourd'hui envisagé que cet outil, présenté dans le cas du projet Valocal, fasse partie d'un ensemble d'outils génériques pour les problèmes émergents d'énergie multi-acteurs et multi-physiques à l'échelle des quartiers. Partant, ce travail sera repris et adapté à des cas d'études plus prospectifs comme l'autoconsommation collective électrique.

REMERCIEMENTS

Ce travail a été réalisé avec le support de l>IDEX CDP ECO-SESA (voir <https://ecosesa.univ-grenoble-alpes.fr/>) lui-même supporté par le projet ANR-15-IDEX-02 et le projet VALOCAL (Mission Interdisciplinaire du CNRS et INSIS).

BIBLIOGRAPHIE

- ADEME. 2017. « Etude des potentiels de production et de valorisation de CHALEUR FATALE en Ile-de-France ». <http://www.ademe.fr/etude-potentiels-production-valorisation-chaleur-fatale-ile-france>.
- Bollinger, L. Andrew. 2017. « Impact of electricity price policies on optimal district energy system design ». San Francisco. <https://doi.org/10.26868/25222708.2017.498>.
- Grenoble Alpes Métropole. 2018. « Classement du réseau de chaleur ». <http://rcse.fr/wp-content/uploads/2018/03/Annexe-classement-reseau-de-chaleur.pdf>.
- Ministère de l'économie, des finances et de l'industrie. 2018. *Arrêté du 15 septembre 2006 relatif au diagnostic de performance énergétique pour les bâtiments existants proposés à la vente en France métropolitaine*. <https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000000788395&dateTexte=20180427>.
- Pajot, Camille, Benoit Delinchant, Yves Maréchal, François Debray, Benjamin Vincent, et Frédéric Wurtz. 2017. « Valorisation optimale de chaleur fatale d'un site à très forte consommation électrique ». In *Conférence des Jeunes Chercheurs en Génie Electrique (J CGE)*. Arras.
- Reinbold, Vincent, Van-Binh Dinh, Daniel Tenfen, Benoit Delinchant, et Dirk Saelens. 2018. « Optimal Operation of Building Microgrids - Comparison with Mixed-Integer Linear and Continuous Non-Linear Programming Approaches ». Édité par Jan Sykulski et Alessandro Salvini. *COMPEL - The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering*, janvier, 00-00. <https://doi.org/10.1108/COMPEL-11-2016-0489>.
- SVDU. 2012. « Le livre blanc de l'incinération ». https://www.sccu-colmar.fr/dynamic/pdf/le_livre_blanc_svdu_2012_vf_pdf.pdf.
- Ville de Grenoble. 2013. « Règlement de service; Annexe à la délibération 081-E009 ». Conseil Municipal de Grenoble. <http://archives.grenoble.fr/FrmLotDocFrame.asp?idlot=224969&idfic=0202331&resX=1366&resY=768&init=1>.

Méthodologie pour la comparaison des performances simulées et mesurées de maisons « à énergie positive »

Thomas Recht*¹, Jeanne Goffart², Laurent Mora¹, Monika Wolozyn², Catherine Buhé²

¹ Université de Bordeaux, I2M – Département TREFLE, UMR CNRS 5295
Esplanade des Arts et Métiers, F-33405 TALENCE Cedex

² Université Savoie Mont-Blanc, UMR USMB - CNRS 5271
Bâtiment HELIOS, 60 rue du Lac Léman, 73736 Le Bourget-du-Lac Cedex

*thomas.recht@u-bordeaux.fr

RÉSUMÉ. Comparer données simulées et mesurées en vérification de performance énergétique est un exercice délicat, notamment de par la présence de différentes sources d'incertitudes liées au bâtiment et à son environnement. L'article présente le développement d'une démarche globale visant à qualifier, à partir des mesures disponibles, la performance réelle versus celle attendue. Illustrée dans sa première phase sur un cas réel, cette démarche associe, au sein d'un processus itératif, analyse conjointe de sensibilité et d'incertitude avec un modèle de simulation thermique dynamique (COMFIE), afin de progressivement identifier puis réduire (si possible) les principales sources d'incertitude sur la performance étudiée. À ce titre, les mesures disponibles sur les conditions météorologiques et le comportement des occupants ont été intégrées dans les simulations. Enfin, l'analyse temporelle des interactions entre sollicitations et paramètres du modèle de bâtiment permet d'identifier des séquences de mesure adaptées à l'ajustement de chaque paramètre influent de ce modèle.

MOTS-CLÉS : vérification de performance énergétique, maisons à énergie positive, analyses de sensibilité et d'incertitude.

ABSTRACT. Compare simulations results with measurements in an energy performance verification protocol is a delicate exercise, mainly due to the existence of different sources of uncertainties about the building and its environment. This article presents the development of an approach aiming to qualify, based on available measurements, the real performance versus the predicted one. Illustrated in its first phase by a real case, this approach associate, in an iterative process, joint sensitivity and uncertainty analysis with a dynamic thermal simulation model (COMFIE), in order to gradually identify and then reduce (if possible) the main sources of uncertainties on the studied performance. For this purpose, available measurements concerning weather data and occupant's behaviour were integrated into simulations. Finally, temporal analysis on interactions between solicitations and building model parameters provides indications to adjust this model by identifying appropriated measurement periods for each significant factor.

KEYWORDS: energy performance verification, plus-energy houses, sensitivity and uncertainty analyses.

1. INTRODUCTION

Levier prioritaire dans la lutte contre le changement climatique, le secteur du bâtiment vise un nouveau standard en construction neuve en France pour 2020 : le bâtiment à « énergie positive ». Si une définition officielle est encore attendue, des expérimentations sont en cours en vue de mieux appréhender les seuils de performance qui pourront être atteints par ces bâtiments, dans une recherche de compromis entre coût d'investissement et économies d'énergie réalisées (comme suggéré par la

directive européenne sur la performance énergétique des bâtiments). Dans ce contexte, le projet national COMEPOS (www.comepos.fr) a pour objectif le retour d'expérience sur une vingtaine de maisons individuelles instrumentées et habitées dites « à énergie positive » tous usages. Leur conception résulte d'une collaboration entre académiques, industriels et constructeurs où ont été associées études d'optimisation (Recht 2016), innovations technologiques, et savoir-faire. Les mesures générées par les capteurs offrent la possibilité de comparer la performance réelle avec celle prédite en phase de conception, et d'identifier les éventuelles sources de divergence. Néanmoins, plusieurs verrous sont à lever pour comparer rigoureusement données simulées et mesurées. Parmi ces verrous figurent la gestion des incertitudes (sur les prévisions et les mesures), la cohérence et la disponibilité des données de mesure, et enfin la possibilité ou non d'ajuster des paramètres, *i.e.* de les calibrer après avoir analysé leur influence respective sur le modèle en fonction des différentes sollicitations. Pour cela, la décomposition de la performance (entre enveloppe et systèmes) sera visée. Ces travaux s'inscrivent dans ce contexte, et présente une démarche globale visant à répondre à ces besoins.

2. MÉTHODOLOGIE

2.1. OBJECTIFS

L'objectif poursuivi dans ces travaux est l'exploitation conjointe de données de mesure et d'un modèle physique de bâtiment pour fournir un retour d'expérience sur la phase de conception et des informations à l'utilisateur. En supposant possible l'ajustement d'un modèle de bâtiment à un niveau de prédiction jugé « satisfaisant », des indicateurs destinés à l'utilisateur pourraient être calculés. Ces indicateurs, en évaluant un écart relatif entre performance attendue en conditions ajustées et performance réelle, traduiraient l'origine des écarts rencontrés. Ceci permettrait d'estimer par exemple les effets élémentaires entre météo, occupation et bâtiment. La partie gauche de la figure 1 illustre ce type d'indicateurs, où l'utilisateur peut constater, sur l'exemple proposé, que les conditions climatiques réelles expliquent une détérioration d'environ 40 % de la performance réelle par rapport à celle attendue, alors que son comportement, plutôt vertueux, permet une amélioration de l'ordre de 10 %. Ces indicateurs pourraient être calculés à l'échelle mensuelle.



Figure 1 : Illustration du type d'indicateurs envisagés (à gauche) et de l'approche descendante retenue (à droite) avec le niveau visé (distinction enveloppe/systèmes)

L'ensemble des incertitudes existantes (caractéristiques du bâtiment, hypothèses de modélisation, erreur des modèles, biais des mesures, ...) conduit à une prudence dans le niveau de précision pouvant être obtenu. L'objectif visé n'est ainsi ni plus ni moins que la production d'ordres de grandeur et de tendances. Dans cet esprit, une approche descendante est retenue dans l'identification potentielle des sources de divergence entre performances réelle et attendue. Ces indicateurs peuvent en effet être tout

d'abord produits au niveau du bilan énergétique, puis à l'échelon inférieur (celui différenciant consommations et productions) et enfin, à nouveau à un échelon plus bas, comme par exemple celui distinguant performance de l'enveloppe et performance des systèmes (partie droite de la figure 1). L'ambition de ces travaux n'est ainsi pas l'identification détaillée de défauts.

2.2. DÉMARCHE GLOBALE

Pour répondre à ces objectifs, une démarche en deux étapes est proposée. La première met en œuvre une analyse conjointe de sensibilité et d'incertitude afin d'identifier et de réduire tant que possible les principales sources d'incertitude sur le projet. Cette étape est itérative, et à chaque mise à jour, l'incertitude en sortie se réduit et l'analyse de sensibilité met en lumière les potentielles nouvelles sources prioritaires d'incertitude sur lesquelles concentrer les efforts pour améliorer encore le niveau de connaissance sur le projet. Cette étape est illustrée dans l'article. La seconde étape (non illustrée ici) de la démarche globale est d'utiliser une méthode de calibrage de modèles (Robillart 2015) pour estimer, à l'aide des mesures, des valeurs ajustées sur les principaux paramètres du bâtiment, permettant *in fine* de disposer d'un modèle prédictif « satisfaisant » pour les objectifs précités. Tout l'enjeu ici est d'identifier et exploiter des séquences de mesure « bien choisies » pour l'ajustement des paramètres étudiés. Estimer par exemple le facteur solaire d'un vitrage sur une période de mesure sans rayonnement n'a en effet pas de chance d'aboutir. Pour ce faire, une analyse temporelle des influences des paramètres est réalisée. Ce prérequis de la seconde étape est également traité dans l'article.

2.3. MODÈLE DE SIMULATION THERMIQUE DYNAMIQUE : COMFIE

Par rapport à d'autres approches visant à exploiter les mesures à l'aide de modèles purement statistiques, de type « boîtes noires », l'approche retenue dans ces travaux est d'associer données de mesure avec un modèle physique, en l'occurrence ici le modèle de simulation thermique dynamique (STD) COMFIE. Conçu dans un compromis entre précision et rapidité des calculs, cet outil a fait l'objet de plusieurs campagnes de validation, en particulier dans le contexte de bâtiments à haute performance énergétique (Recht et al. 2014).

2.4. VARIABILITÉ MÉTÉOROLOGIQUE ET DIVERSITÉ DU COMPORTEMENT DES USAGERS

Pour comparer performances réelles et attendues, il convient de lever, dans la simulation, l'incertitude prépondérante liée aux conditions climatiques (incertitude de mesure, difficulté de données mesurées sur site, etc.) et à la diversité du comportement des usagers, sans quoi l'ajustement des paramètres du modèle de bâtiment sera impraticable. En effet, l'importance de ces deux aspects sur la performance énergétique des bâtiments n'est plus à démontrer, et des modèles récemment développés pour prendre en compte l'ampleur de la variabilité de ces aspects dans des approches de simulation probabilistes permettent de l'illustrer : Vorger (2014) pour les usages, et Goffart (2013) et Ligier et al. (2017) pour la météo. Partant de ce constat, il s'agit d'apporter le maximum d'informations sur ces aspects à partir des mesures tout en veillant à un compromis entre coût de l'instrumentation à mettre en œuvre et niveau d'intrusion dans l'intimité des occupants.

2.5. ANALYSES DE SENSIBILITÉ ET D'INCERTITUDE : LA MÉTHODE RBD-FAST

Une analyse d'incertitude est utilisée pour encadrer la variabilité des résultats de simulation induite par les incertitudes sur les entrées du modèle. En complément, l'analyse de sensibilité renseigne sur les contributions relatives de chaque entrée incertaine à l'incertitude globale observée en sortie (ici les

consommations de chauffage). La méthode d'analyse de sensibilité globale RBD-FAST (Tarantola, Gatelli, et Mara 2006) couple les deux analyses en un seul jeu d'échantillon de N simulations de l'ordre de quelques centaines d'évaluations quel que soit le nombre de facteurs considérés. Pour cela, la méthode se base sur une décomposition de la variance fréquentielle et une méthode de réorganisation des sorties en fonction de chaque entrée par un jeu de permutation. Les indices de sensibilité estimés sont ceux du premier ordre de Sobol. Compris entre 0 et 1, ils expriment l'effet propre de chaque paramètre sur l'incertitude de sortie. Un indicateur des interactions entre effets propres est une somme des indices significativement inférieure à 1. Pour plus d'informations sur l'utilisation de RBD-FAST en STD, voir Goffart, Rabouille, et Mendes (2015). La méthode est par ailleurs disponible sous *Python* dans la librairie *SALib* (<https://github.com/SALib/SALib>).

3. ÉTUDE DE CAS

3.1. PRÉSENTATION GÉNÉRALE

La méthodologie décrite a été appliquée, dans sa première phase, sur l'une des maisons « à énergie positive » du projet COMEPOS (Figure 2). Située à une trentaine de km de Bordeaux, cette maison de plain-pied d'une surface habitable d'environ 90 m² a été livrée début septembre 2017, et occupée par un ménage de trois personnes (1 adulte + 2 enfants) dès les semaines suivantes.



Figure 2 : vue Sud de la maison COMEPOS étudiée

3.2. FACTEURS INCERTAINS CONSIDÉRÉS

Dans le but final d'ajuster le modèle de bâtiment, les paramètres méconnus du projet ont été listés, et une loi uniforme sur un intervalle $[a, b]$ a été considéré (tableau 1), selon le niveau d'informations disponibles ou la précision de la modélisation associée. Par exemple, le débit de la ventilation mécanique insufflée (VMI) n'est pour l'heure pas connu, et une incertitude forte autour d'une valeur usuelle de renouvellement d'air a été supposée. Le fait que le bâtiment soit en légère surpression *via* la VMI explique que les infiltrations ont été négligées en première approche, même si cette hypothèse est questionnée par la mise en place d'une borne b à 0,1 vol/h. En effet, le constructeur ayant adopté une démarche qualité, la mesure de perméabilité à l'air de la maison n'est plus obligatoire, et le niveau d'étanchéité de l'enveloppe n'est pas connu précisément. Enfin, en dernier exemple, les valeurs des ponts thermiques sont forfaitaires (catalogues réglementaires), et peuvent être ainsi jugées peu précises (d'autant qu'une incertitude de mise en œuvre s'ajoute).

Paramètre	Unité	Valeur(s) nominale(s) x	a	b
$\lambda_{PE_plancher}$	W/m ² /K	0,048	$x - 5 \%$	$x + 5 \%$
λ_{LDV_murs}	W/m ² /K	0,030	$x - 5 \%$	$x + 5 \%$
$\lambda_{LDV_toiture}$	W/m ² /K	0,040	$x - 5 \%$	$x + 5 \%$
$U_{w_fenêtres}$	W/m ² /K	[2,0; 1,5; 1,8; 2,1]	$x - 20 \%$	$x + 20 \%$
$S_{w_fenêtres}$	[-]	0,50	$x - 20 \%$	$x + 20 \%$
$\psi_{linéiques}$	W/m/K	x	$x - 50 \%$	$x + 50 \%$
$\psi_{menuiseries}$	W/m ² /K	x	$x - 50 \%$	$x + 50 \%$
\dot{Q}_{v_VMI}	vol/h	0,5	$x - 50 \%$	$x + 50 \%$
Albédo	[-]	0,2	$x - 20 \%$	$x + 20 \%$
\dot{Q}_{v_inf}	vol/h	0,0	0,0	0,10
COP_{PAC}	[-]	2,6	$x - 40 \%$	$x + 40 \%$

Tableau 1 : Paramètres incertains considérés et plages d'incertitude associées

3.3. EXPLOITATION DES DONNÉES DE MESURE

En référence au § 2.4, nous proposons d'illustrer l'exploitation des données de mesure liées la météo et l'occupation. Concernant les conditions extérieures, une sonde de température est disposée en façade Nord et les données renvoyées sont très semblables à celles provenant d'une station météorologique professionnelle, située sur un site expérimental à moins de 10 km. À l'inverse, le capteur de rayonnement est peu précis et ne renvoie qu'un rayonnement global. Les données de la station météo de l'IUT de Bordeaux (mesurant le direct normal en plus du global horizontal) ont été dans ce but utilisées. Concernant les conditions intérieures, l'ensemble des températures d'air mesurées a été injecté (pièce par pièce) dans la simulation même si d'autres aspects restent à intégrer comme la puissance dissipée par les appareils (données disponibles), ou devraient l'être comme le débit de la VMI et les fermetures/ouvertures des volets/fenêtres (données encore indisponibles).

4. RÉSULTATS

4.1. ANALYSE DE SENSIBILITÉ ET D'INCERTITUDE

Suite à l'intégration des données de mesure pour une partie des sollicitations (conditions climatiques et températures intérieures de consigne), une analyse conjointe d'incertitude et de sensibilité est mise en œuvre sur les consommations électriques de chauffage (car alimenté par une PAC) avec 400 simulations (≈ 10 minutes). L'étude porte sur une période d'environ un mois en hiver (du 20/11/17 au 17/12/17), séquence retenue car l'ensemble des mesures était disponible (la maison ayant été livrée récemment, des trous dans les données peuvent encore survenir).

La figure 3 présente la dispersion, sous forme d'une distribution cumulée, des résultats de consommations de chauffage sur la période d'étude suite à la propagation des incertitudes réalisée. Plusieurs remarques peuvent être émises à l'analyse de ces résultats. Premièrement, la dispersion est élevée puisque 95 % des résultats sont compris entre 160 et 450 kWh. Deuxièmement, l'asymétrie observée sur la loi de probabilité (proche d'une loi exponentielle) montre une dispersion plus importante pour les consommations supérieures à la médiane que celles inférieures. En effet, la première moitié des consommations (dans l'ordre croissant) est comprise entre 150 et 250 kWh, alors que la seconde est comprise entre 250 et 500 kWh ! En rouge est représentée la valeur mesurée

(387 kWh), et peut être comparée à la valeur médiane simulée (250 kWh) ou au fait que 90 % des consommations sont en deçà de cette donnée mesurée. Néanmoins, différents aspects n'ont pas encore été intégrés et peuvent expliquer ces divergences. C'est notamment le cas de la puissance dissipée par les appareils (peut être actuellement surestimée dans les scénarios *a priori* renseignés) ou des scénarios d'ouvertures/fermetures des fenêtres/volets, influant sur les déperditions et les apports.

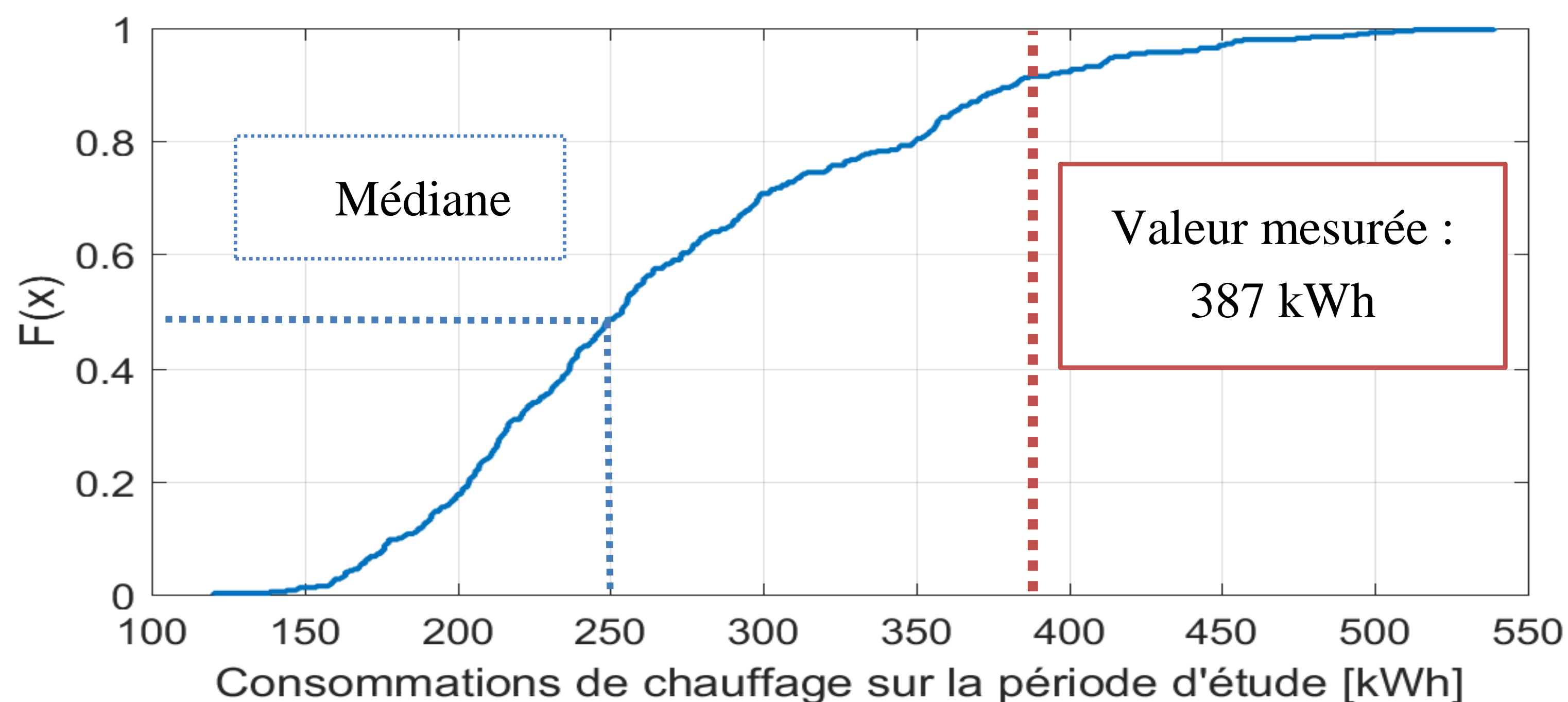


Figure 3 : Profil d'incertitude sur la consommation de chauffage sur la période d'étude : représentation en distribution cumulée

Les résultats de l'analyse de sensibilité (figure 4) permettent d'apprécier l'influence propre de chaque paramètre sur la consommation de chauffage. La précision de la méthode d'estimation est de 2 %, rendant plusieurs indices non significatifs voire négatifs (ceux à gauche de la barre verticale noire en pointillés). Les influences les plus élevées concernant la variabilité autour du COP (70 %) et du débit de la VMI (20 %). D'autre part, la somme des indices étant proche de 1, l'amplitude des interactions dans le modèle est faible. Les effets propres des paramètres permettent en effet d'expliquer quasiment l'ensemble de la dispersion. Pour réduire l'incertitude sur la distribution des consommations, une modélisation fine du fonctionnement de la PAC est nécessaire et l'estimation, par exemple via une mesure ponctuelle sur site, des débits de ventilation correspondrait également à une action intéressante à mener.

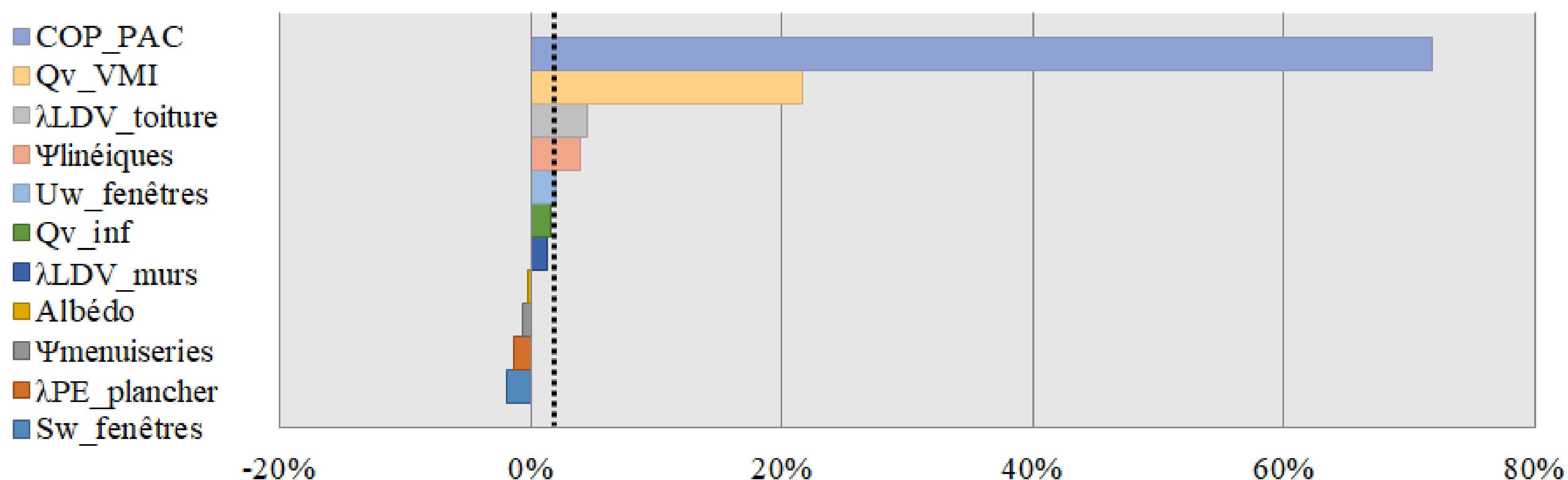


Figure 4 : Indices de sensibilité sur l'incertitude de la consommation de chauffage sur la période d'étude du 20 nov. au 17 déc.

4.2. VERS LE CALIBRAGE DES PARAMÈTRES DU MODÈLE DE BÂTIMENT : INTÉRÊT DE L'ANALYSE DE SENSIBILITÉ TEMPORELLE

En fonction des sollicitations internes et externes auxquelles est soumis le bâtiment, son comportement évolue, mais potentiellement aussi l'influence des paramètres du modèle le

représentant. La figure 5 permet de visualiser cette variation temporelle des indices de sensibilité sur la période d'étude. Ainsi l'indice de sensibilité lié au débit de la VMI peut atteindre près de 70 %, celui du COP 90 %, et bien que peu visible sur le graphique, le facteur solaire des menuiseries explique de l'ordre de 60 % de la dispersion à un moment donné sur la période d'étude.

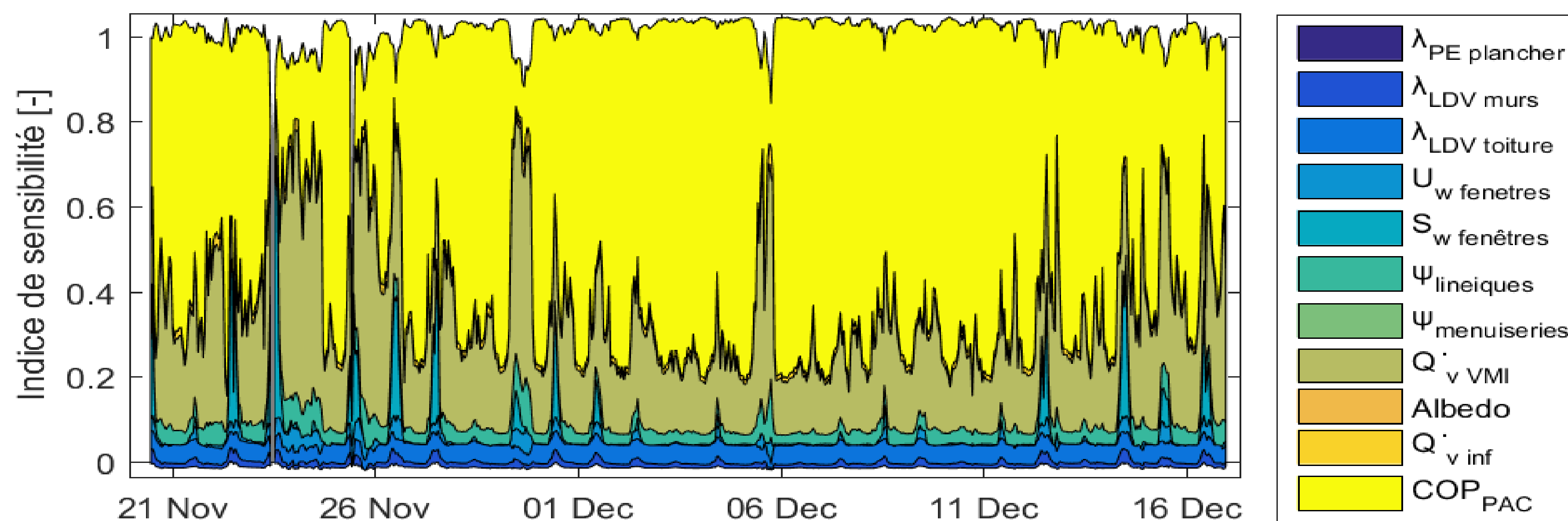


Figure 5 : Indices temporels de sensibilité

Cependant ces indices de sensibilité peuvent être vus comme « relatifs » car normés par la variance totale de chaque pas de temps. Or l'amplitude de la variance évolue également dans le temps, et l'étude doit être complétée par l'analyse des variances partielles (*i.e.* des indices de sensibilité non normés) fournissant une information sur l'influence « absolue » de chaque paramètre, et permettant de mieux apprécier si la séquence de mesure est adaptée ou non à l'estimation d'un paramètre. Dans ce but, la figure 6 est tracée, et correspond à la variance partielle de chaque paramètre (la somme donne la variance totale de la dispersion de la consommation à chaque pas horaire). Les résultats montrent ainsi que c'est l'incertitude sur le COP qui explique la grande majorité de la dispersion, et que les contributions relatives (*i.e.* indices de sensibilité normés) du débit de la VMI et *a fortiori* du facteur solaire des menuiseries ne sont importantes que lorsque la variance totale est faible (exemple des 23 et 24 novembre), ce qui est peu pertinent. À l'inverse, la variance partielle du COP est dominante et particulièrement élevée la première semaine de décembre. Il s'agit donc d'une séquence de mesure judicieuse pour l'estimation de ce paramètre. Au préalable, une modélisation plus fine du système permettra de réduire l'incertitude sur la valeur COP. Une fois, estimée, la mise à jour de l'analyse de sensibilité permettra d'identifier de nouveaux paramètres influents à calibrer.

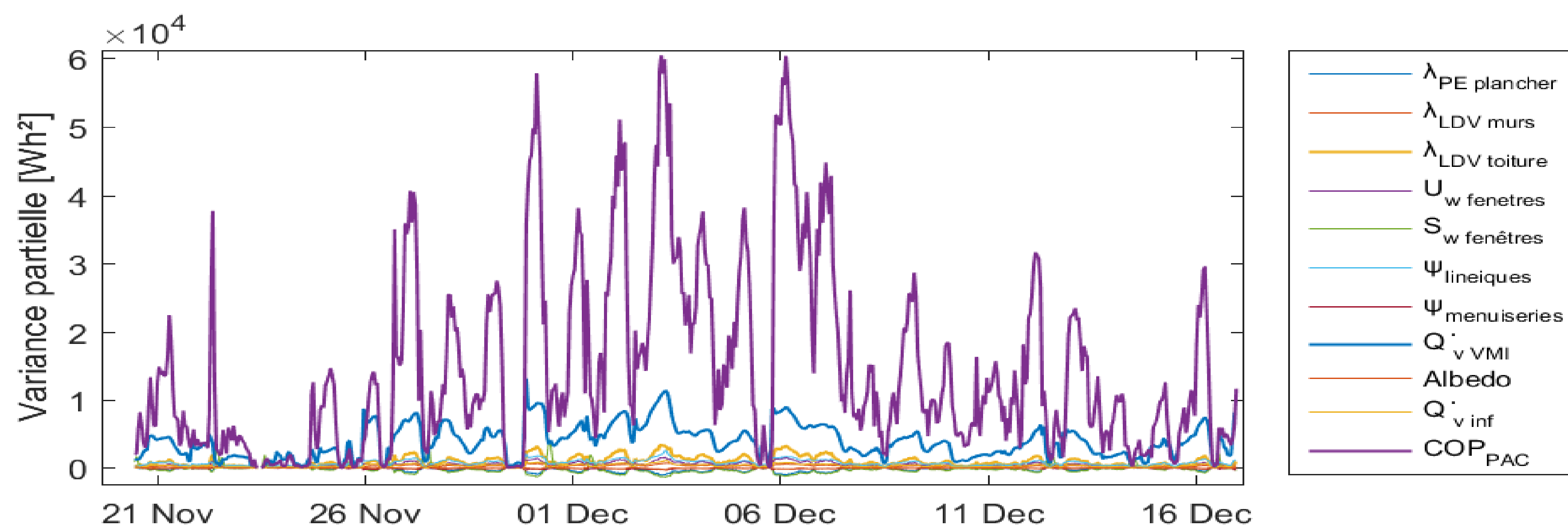


Figure 6 : Variances partielles de chaque paramètre incertain

5. CONCLUSION

Cette communication a présenté le développement d'une démarche visant à qualifier, à partir de mesures disponibles, la performance réelle *versus* celle attendue. L'objectif est de produire un retour d'expérience sur la phase de conception de maisons « à énergie positive » mais aussi de fournir des informations à l'utilisateur, sous la forme d'indicateurs de performance et/ou de confort. Dans ce but, une méthodologie globale a été proposée, et divisée en deux phases. Elle associe tout d'abord une analyse conjointe de sensibilité et d'incertitude (RBD-FAST) à un modèle de simulation thermique dynamique (COMFIE) afin d'identifier et de réduire tant que possible les principales sources d'incertitude sur le projet. Cette phase, illustrée sur un cas réel, est résolument itérative : l'analyse de sensibilité actualisée permettant en effet de mettre en évidence d'éventuelles nouvelles sources prioritaires d'incertitude sur lesquelles concentrer les efforts. L'enjeu futur de la seconde phase est d'obtenir, par inférence bayésienne, un modèle de bâtiment *a posteriori* ou dit « ajusté » qui serait jugé « satisfaisant » pour répondre aux objectifs souhaités. Pour réussir le calibrage, il convient d'identifier et d'exploiter des séquences de mesures « bien choisies », c'est-à-dire où l'influence des paramètres à estimer est la plus significative. L'analyse d'indices temporels de sensibilité, illustrée dans cette communication, peut être avantageusement utilisée à cet effet, et constitue la prochaine étape de ces travaux.

Remerciements

Ces travaux ont été menés dans le cadre du projet COMEPOS accompagné par l'ADEME (programme Énergies Décarbonées des Investissements d'Avenir) et ont utilisé la bibliothèque *Amapola* (outil de calcul des incertitudes et de la sensibilité pour la simulation énergétique dynamique) développée par © KOCLIKO.

6. BIBLIOGRAPHIE

- Goffart, Jeanne. 2013. « Impact de la variabilité des données météorologiques sur une maison basse consommation. Application des analyses de sensibilité pour les entrées temporelles. » Thèse de doctorat, Université de Grenoble. <http://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00982150>.
- Goffart, Jeanne, Mickael Rabouille, et Nathan Mendes. 2015. « Uncertainty and sensitivity analysis applied to hygrothermal simulation of a brick building in a hot and humid climate ». *Journal of Building Performance Simulation* 10 (1) 2017. Taylor & Francis: 37-57. <https://doi.org/10.1080/19401493.2015.1112430>.
- Ligier, S., M. Robillart, P. Schalbart, et B. Peuportier. 2017. « Energy Performance Contracting Methodology Based upon Simulation and Measurement ». In *Building Simulation 2017*, 10. San Francisco.
- Recht, T. 2016. « Étude de l'écoconception de maisons à énergie positive ». Thèse de doctorat, Paris: École nationale supérieure des mines de Paris. <https://www.theses.fr/2016PSLEM024>.
- Recht, T., F. Munaretto, P. Schalbart, et B. Peuportier. 2014. « Analyse de la fiabilité de COMFIE par comparaison à des mesures. Application à un bâtiment passif. » In *Proceedings IBPSA France*, 8. Arras.
- Robillart, M. 2015. « Étude de stratégies de gestion en temps réel pour des bâtiments énergétiquement performants ». Thèse de doctorat, École nationale supérieure des mines de Paris.
- Tarantola, S., D. Gatelli, et Thierry Alex 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>.
- Vorger, E. 2014. « Étude de l'influence du comportement des occupants sur la performance énergétique des bâtiments ». Thèse de doctorat, École nationale supérieure des mines de Paris.

Comparaison des modélisations déterministe et stochastique pour le calibrage de modèles thermiques simplifiés

Simon Rouchier^{*1}, Mickaël Rabouille², Pierre Oberlé²

¹ Univ. Grenoble Alpes, Univ. Savoie Mont Blanc, CNRS, LOCIE
73000 Chambéry, France

² INES Plateforme Formation & Evaluation

*simon.rouchier@univ-smb.fr

RESUME. La caractérisation de la performance des bâtiments par mesures *in situ* est aujourd'hui une procédure courante, mais souvent réalisée sur la base d'hypothèses trop simplificatrices. En particulier, on néglige souvent l'erreur de modélisation, ce qui conduit à des estimations de paramètres trop confiantes et non reproductibles. Une solution possible à ce problème est l'utilisation de modèles stochastiques qui tiennent compte de cette erreur. Le travail présenté ici compare des résultats de calibration obtenus par des modèles déterministes à ceux de modèles stochastiques. On utilise plusieurs séquences expérimentales de mesure pour vérifier la variabilité des paramètres identifiés : les résultats montrent que l'utilisation d'un modèle stochastique augmente considérablement les intervalles d'incertitude de ces paramètres, mais également leur robustesse.

MOTS-CLÉS. calibration, MCMC, filtre de Kalman

ABSTRACT. This paper investigates how accounting for modelling errors affects the results of model calibration. Several simplified models are defined to simulate the indoor temperature of an experimental test cell. Some models include process noise and others do not. The parameters of each model are then learned repeatedly by using several training datasets from the test cell. The MCMC algorithm is used for training. The robustness of parameter estimates between independent trainings is evaluated. Results show that stochastic modelling considerably increases the uncertainty of parameter estimates, but ensures their consistency between separate trainings, whereas deterministic models are less robust.

KEYWORDS. calibration, MCMC, Kalman filter

1 INTRODUCTION

La calibration de modèles thermiques simplifiés des bâtiments (de type RC) sur la base de mesures *in situ* est aujourd'hui une procédure courante dans la littérature (Rouchier, 2018). C'est un type de problème d'optimisation dont l'objectif est la minimisation de l'écart entre les mesures et la prédiction d'un modèle, dont on déduit des valeurs optimales des paramètres (Janssens, 2016). L'objectif en est soit l'estimation de paramètres physiques, comme le coefficient de déperdition *HLC* (Heo et al., 2012; Mangematin et al., 2012; Bauwens et Roels, 2014), soit

l'identification d'un modèle à des fins purement prédictives.

Dans la plupart des cas, ce problème inverse de caractérisation est réalisé sous l'hypothèse d'un modèle non biaisé (Maillet et al., 2011), c'est-à-dire qu'on suppose capable de reproduire fidèlement la réalité. Cette hypothèse est toujours fautive, particulièrement pour les modèles RC très simples utilisés par les inverseurs. La prise en compte des (nombreuses) erreurs et approximations de modélisation est indispensable à la légitimité des modèles calibrés et à l'interprétabilité de leurs paramètres.

La littérature propose de nombreux exemples de caractérisation de modèles stochastiques des bâtiments (Madsen et Holst, 1995; Kristensen et al., 2004; Bacher et Madsen, 2011). Ceux-ci permettent d'inclure un terme d'erreur de système (Madsen et Holst, 1995) représentant les approximations du modèle par rapport à la réalité : on a alors affaire à des équations différentielles stochastiques (SDE). La question que pose cet article est d'estimer les effets de la prise en compte de l'erreur de modélisation dans les résultats de calibration. D'après (Kristensen et al., 2004) et (Brynjarsdóttir et O'Hagan, 2014) les modèles stochastiques permettent des résultats plus reproductibles, plus prudents et plus réalistes vis-à-vis de l'information réellement contenue dans la mesure. Ces auteurs n'ont cependant pas quantifié cet effet en comparant modèles déterministes et stochastiques directement, ce que cet article propose de faire.

La méthodologie adoptée ici est de calibrer un même modèle plusieurs fois en utilisant des séquences de mesures différentes, recueillies sur le même bâtiment test et dans des conditions d'exploitation similaires. Sur chaque série de mesures, le modèle est calibré dans sa version déterministe et dans sa version stochastique. On peut alors juger de la répétabilité de l'estimation des paramètres, ainsi que de leurs intervalles d'incertitude, d'une série de mesures à l'autre. Le bâtiment étudié est présenté en Sec. 2, la méthode de modélisation et de caractérisation en Sec. 3 et les résultats en Sec. 4.

2 BÂTIMENT ÉTUDIÉ

L'étude se base sur des mesures réalisées dans le bâtiment expérimental *Armadillo Box* (Fig. 1). Il s'agit d'un bâtiment démonstrateur d'une surface utile de 42 m², réalisé par l'équipe ENSAG-GAIA-INES pour le concours Solar Decathlon Europe 2010. L'enveloppe est constituée d'une ossature bois avec isolation renforcée. Le bâtiment est initialement chauffé ou refroidi par un système compact de type 3 en 1 et dispose d'une ombrière photovoltaïque. La version présente sur le site de l'INES est une variation à prix maîtrisés afin de réaliser un pavillon de démonstration instrumenté pour obtenir des retours sur son comportement réel sur une longue durée.



FIGURE 1. Façade sud et plan de l'Armadillo Box

Pour cette étude, le bâtiment est chauffé par ventilo-convecteurs, et la température intérieure est mesurée en différents points pour s'assurer de son homogénéité. Une série de sept séquences expérimentales similaires à la méthode QUB (Mangematin et al., 2012) a été exploitée. Chacune de ces séquences de mesure dure entre trois et quatre jours, durant lesquels une consigne de chauffage de 2 kW est imposée pendant 24h ou 48h. La figure 2 montre les mesures réalisées lors de l'une de ces séquences : températures intérieure et extérieure, ensoleillement global vertical sud, et puissance de chauffage.

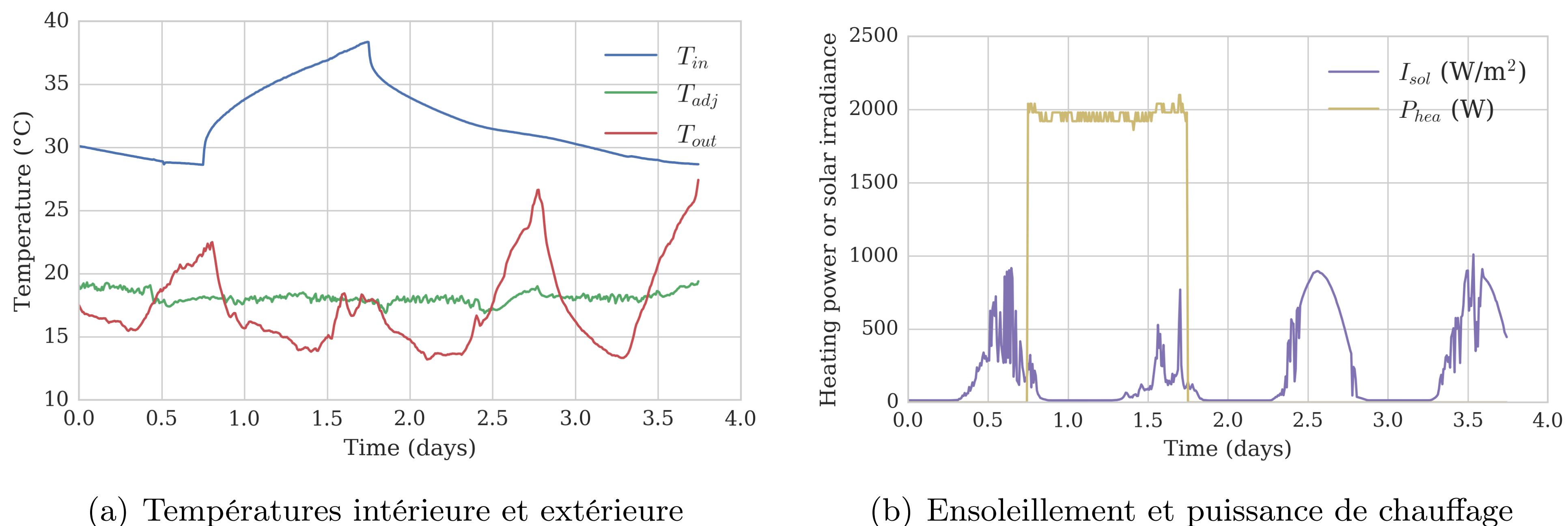


FIGURE 2. Une des séquences de mesures

Les sept séries de mesures sont réalisées dans des conditions très similaires (durée, météo, consigne intérieure) : plusieurs calibrations séparées d'un même modèle sur ces séquences *devraient* résulter en une même estimation du coefficient de déperditions *HLC* de l'enveloppe, par exemple. Un modèle calibré en utilisant une des mesures *devrait* en prédire une autre de manière précise.

3 MÉTHODOLOGIE

3.1 MODÈLES D'ÉTAT RC

Nous utilisons ici des modèles RC très simplifiés dont un exemple est montré par la figure 3 et l'équation 1 : les conditions aux limites sont la température extérieure T_a et la puissance imposée q . Dans un problème direct, le vecteur des paramètres θ est connu et on simule les états : température intérieure T_i et température d'enveloppe T_e . Dans un problème inverse, une partie des états est observée et on cherche θ .

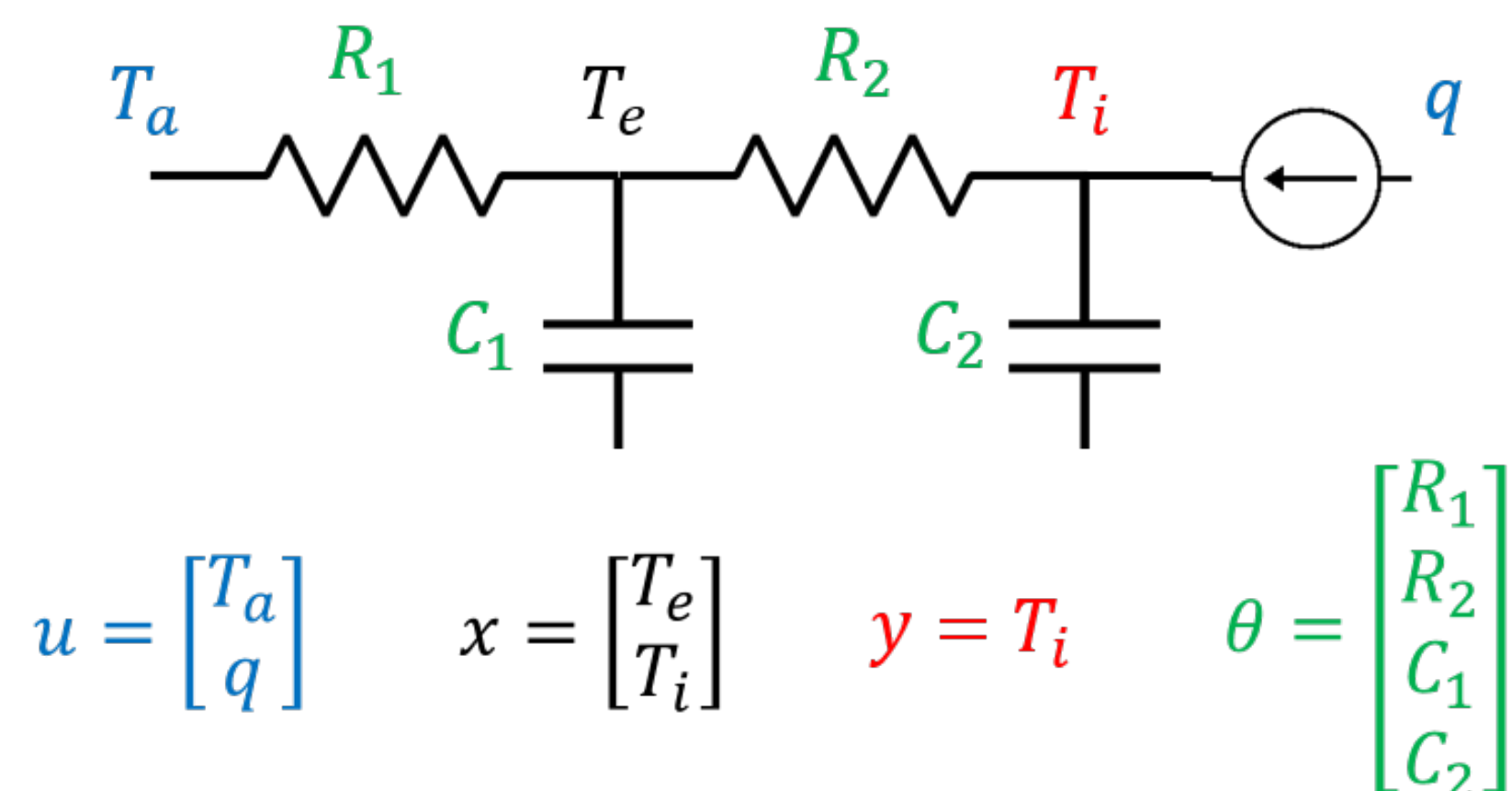


FIGURE 3. Modèle 2R2C

$$\begin{bmatrix} \dot{T}_e(t) \\ \dot{T}_i(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{R_1 C_1} - \frac{1}{R_2 C_1} & \frac{1}{R_2 C_1} \\ \frac{1}{R_2 C_2} & -\frac{1}{R_2 C_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_e(t) \\ T_i(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{R_1 C_1} & 0 \\ 0 & \frac{1}{C_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_a(t) \\ q(t) \end{bmatrix} \quad (1)$$

Ce modèle, ainsi que les autres modèles RC, peuvent s'exprimer sous la forme d'un modèle d'état linéaire :

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}(\theta)\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}(\theta)\mathbf{u}(t) + \mathbf{w}(t) \quad (2)$$

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{C}(\theta)\mathbf{x}(t) + \mathbf{v}(t) \quad (3)$$

Eq. 2 est la forme générique de l'Eq. 1, dans laquelle figure de plus le bruit de système $\mathbf{w}(t) \sim \mathcal{N}(0, \mathbf{Q}_c)$, qui représente l'erreur réalisée par le modèle par rapport à la valeur réelle des états $\mathbf{x}(t)$ (les températures) du fait de phénomènes non pris en compte par le modèle (comme les échanges avec le sol). Elle ne peut cependant pas compenser une structure de modèle insuffisante. Eq. 3 est l'équation d'observation : $\mathbf{y}(t)$ est la grandeur observée et $\mathbf{v}(t) \sim \mathcal{N}(0, \mathbf{R}_c)$ est l'erreur de mesure. Les matrices \mathbf{A} , \mathbf{B} et \mathbf{C} de ce système sont des fonctions des paramètres θ .

La simulation numérique de ce modèle nécessite sa discrétisation temporelle, car les mesures sont disponibles sous la forme d'une série finie d'observations réalisées aux coordonnées $\{t_k, k \in 1 \dots N\}$, séparées par un pas de temps Δt . Le système discrétisé s'écrit :

$$\mathbf{x}_t = \mathbf{F}_\theta \mathbf{x}_{t-1} + \mathbf{G}_\theta \mathbf{u}_t + \mathbf{w}_t \quad (4)$$

$$\mathbf{y}_t = \mathbf{H}_\theta \mathbf{x}_t + \mathbf{v}_t \quad (5)$$

où les matrices \mathbf{F} et \mathbf{G} sont calculées à partir des matrices \mathbf{A} et \mathbf{B} de l'équation continue. Le bruit système $\mathbf{w}_t \sim \mathcal{N}(0, \mathbf{Q}_d)$ a une matrice de covariance \mathbf{Q}_d , et l'erreur de mesure $\mathbf{v}_t \sim \mathcal{N}(0, \mathbf{R}_d)$ a une variance \mathbf{R}_d telles que :

$$\mathbf{F}_\theta = \exp(\mathbf{A} \Delta t) \quad (6)$$

$$\mathbf{G}_\theta = \mathbf{A}^{-1} (\mathbf{F}_\theta - \mathbf{I}) \mathbf{B} \quad (7)$$

$$\mathbf{Q}_d = \int_0^{\Delta t} \exp(\mathbf{A} \Delta t) \mathbf{Q}_c \exp(\mathbf{A}^T \Delta t) dt \quad (8)$$

$$\mathbf{R}_d = \frac{1}{\Delta t} \mathbf{R}_c \quad (9)$$

Dans un cadre stochastique, on considère que le modèle commet une erreur \mathbf{w}_t à chaque pas de temps, dont la covariance \mathbf{Q} est potentiellement inconnue. On estime alors à chaque pas de temps une fonction de probabilité $p(\mathbf{x}_t | \mathbf{y}_{1:N}, \theta)$ pour l'état \mathbf{x}_t . Si le modèle est linéaire et Gaussien, cette probabilité peut être estimée par un filtre de Kalman.

3.2 FILTRE DE KALMAN

Le filtre de Kalman estime $p(\mathbf{x}_t | \mathbf{y}_{1:N}, \theta)$, la probabilité de chaque état \mathbf{x}_t étant données les mesures $\mathbf{y}_{1:N}$ et les paramètres θ . Les notations de (Shumway et Stoffer, 2016) sont utilisées ici : $\mathbf{x}_{t|s}$ est l'espérance de l'état au temps t , étant données les observations jusqu'au temps s . $\mathbf{P}_{t|s}$ est sa variance.

$$\mathbf{x}_{t|s} = \mathbf{E}(\mathbf{x}_t | \mathbf{y}_{1:s}, \theta) \quad (10)$$

$$\mathbf{P}_{t|s} = \text{Var}(\mathbf{x}_t | \mathbf{y}_{1:s}, \theta) = \mathbf{E}[(\mathbf{x}_t - \mathbf{x}_{t|s})(\mathbf{x}_t - \mathbf{x}_{t|s})^T | \mathbf{y}_{1:s}, \theta] \quad (11)$$

L'algorithme du filtre de Kalman est :

- Choisir les conditions initiales $\mathbf{x}_{0|0}$ et leur covariance $\mathbf{P}_{0|0}$
- pour $t = 1 \dots N$:

1. **Prédiction** : étant donné l'état $\mathbf{x}_{t-1|t-1}$ et sa covariance $\mathbf{P}_{t-1|t-1}$, le modèle prédit le pas de temps suivant.

$$\mathbf{x}_{t|t-1} = \mathbf{F}_\theta \mathbf{x}_{t-1|t-1} + \mathbf{G}_\theta \mathbf{u}_t \quad (12)$$

$$\mathbf{P}_{t|t-1} = \mathbf{F}_\theta \mathbf{P}_{t-1|t-1} \mathbf{F}_\theta^T + \mathbf{Q} \quad (13)$$

2. **L'innovation** (erreur de prédiction) ε_t et sa covariance Σ_t est calculée, ainsi que le gain de Kalman \mathbf{K}_t :

$$\varepsilon_t = \mathbf{y}_t - \mathbf{H}_\theta \mathbf{x}_{t|t-1} \quad (14)$$

$$\Sigma_t = \mathbf{H}_\theta \mathbf{P}_{t|t-1} \mathbf{H}_\theta^T + \mathbf{R} \quad (15)$$

$$\mathbf{K}_t = \mathbf{P}_{t|t-1} \mathbf{H}_\theta^T \Sigma_t^{-1} \quad (16)$$

3. **Mise à jour** de la prédiction $\mathbf{x}_{t|t-1}$ à partir de l'observation à l'instant t :

$$\mathbf{x}_{t|t} = \mathbf{x}_{t|t-1} + \mathbf{K}_t \varepsilon_t \quad (17)$$

$$\mathbf{P}_{t|t} = (\mathbf{I} - \mathbf{K}_t \mathbf{H}_\theta) \mathbf{P}_{t|t-1} \quad (18)$$

— La log-vraisemblance totale est un résultat direct du filtre. Elle est exprimée ici à une constante près :

$$-\ln L_y(\theta) = \frac{1}{2} \sum_{t=1}^N \ln |\Sigma_t(\theta)| + \frac{1}{2} \sum_{t=1}^N \varepsilon_t(\theta)^T \Sigma_t(\theta)^{-1} \varepsilon_t(\theta) \quad (19)$$

De manière schématique, le filtre de Kalman applique la loi de Bayes à chaque pas de temps : les états mis à jour $p(\mathbf{x}_t|\mathbf{y}_{1:t}) = \mathcal{N}(\mathbf{x}_{t|t}, \mathbf{P}_{t|t})$ sont une distribution *a posteriori*, soit un compromis entre un *a priori* qui est la prévision brute du modèle $p(\mathbf{x}_t|\mathbf{y}_{1:t-1}) = \mathcal{N}(\mathbf{x}_{t|t-1}, \mathbf{P}_{t|t-1})$ et l'information apportée par la mesure \mathbf{y}_t . Leur poids respectif est donné par le gain de Kalman \mathbf{K}_t qui quantifie la confiance relative que l'on accorde au modèle et aux mesures.

Ce filtre de Kalman classique fonctionne pour les modèles linéaires uniquement. Un modèle non linéaire nécessite l'emploi d'un autre filtre : Extended Kalman Filter utilisé par (Kristensen et al., 2004), Unscented Kalman Filter, Particle Filter, etc.

3.3 ESTIMATION DE PARAMÈTRES

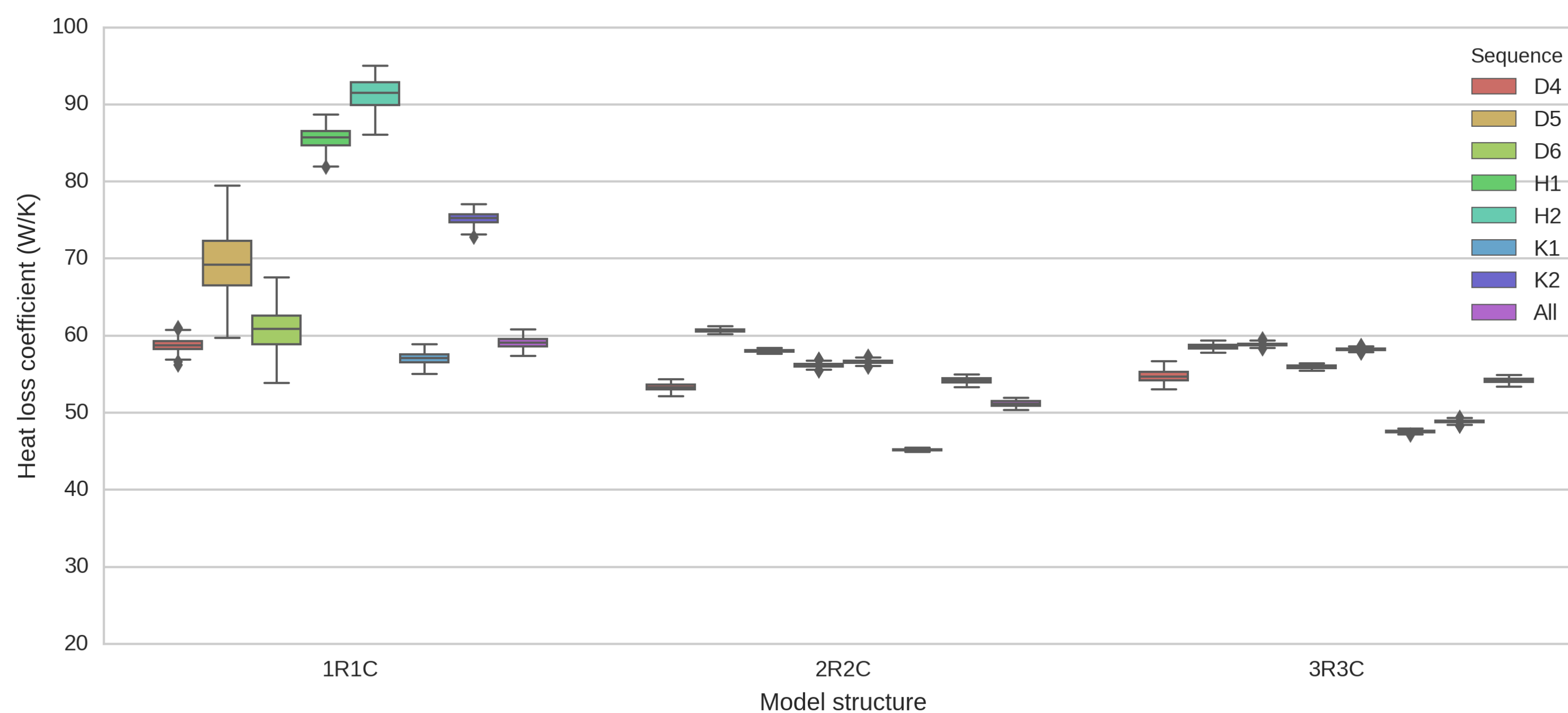
Lorsqu'un modèle déterministe est utilisé, où l'erreur système \mathbf{w}_t n'est pas prise en compte, on suppose que les température calculées sont exactes, et la seule disparité entre celles-ci et les observations est l'erreur de mesure. Tous les états $\mathbf{x}_{1:N}$ du système sont estimés en itérant simplement Eq. 4, sans utiliser le filtre de Kalman. Les paramètres θ sont alors estimés par un algorithme d'optimisation minimisant une fonction objectif, typiquement la somme des écarts quadratiques $\sum_{t=1}^N (\mathbf{y}_t - \mathbf{H}_\theta \mathbf{x}_t)^2$.

Dans un cadre stochastique, l'estimation des paramètres est typiquement réalisée par la méthode du maximum de vraisemblance (Kristensen et al., 2004) : un algorithme de type Newton-Raphson minimise la fonction $-\ln L_y(\theta)$ (Eq. 19). On peut également estimer l'incertitude sur les paramètres *via* l'inverse de la matrice Hessienne calculée au maximum de vraisemblance $\hat{\theta}_{\text{ML}}$ (Madsen et Holst, 1995).

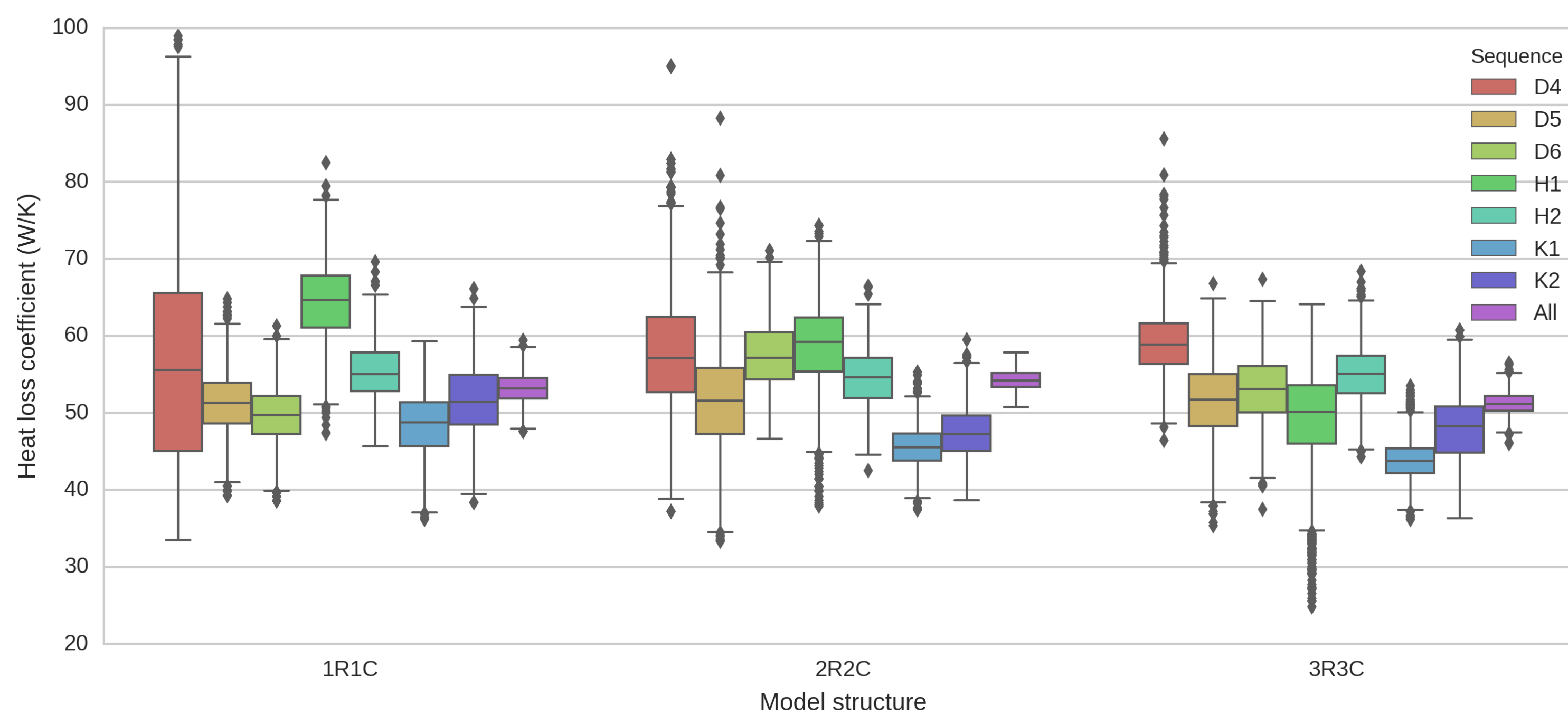
Dans le cas présent, c'est l'algorithme Metropolis-Hastings (Hastings, 1970) qui est utilisé pour résoudre le problème inverse, aussi bien dans le cas déterministe que stochastique. Il s'agit d'une méthode de type Monte-Carlo par Chaîne de Markov (MCMC) qui estime une distribution *a posteriori* $p(\theta|\mathbf{y}_{1:N})$ en partant d'une connaissance *a priori* $p(\theta)$ sur les paramètres. Il existe des exemples de son application pour la calibration de modèles de bâtiments (Zayane, 2011; Heo et al., 2012) ou la caractérisation de propriétés thermophysiques de matériaux et composants (Biddulph et al., 2014; Berger et al., 2016; Rouchier et al., 2017).

4 RÉSULTATS

Le premier indicateur de robustesse utilisé est le coefficient de déperdition HLC. Celui-ci peut être déduit de chaque type de modèle comme l'inverse de la somme des résistances.



(a) HLC estimé par modèles déterministes



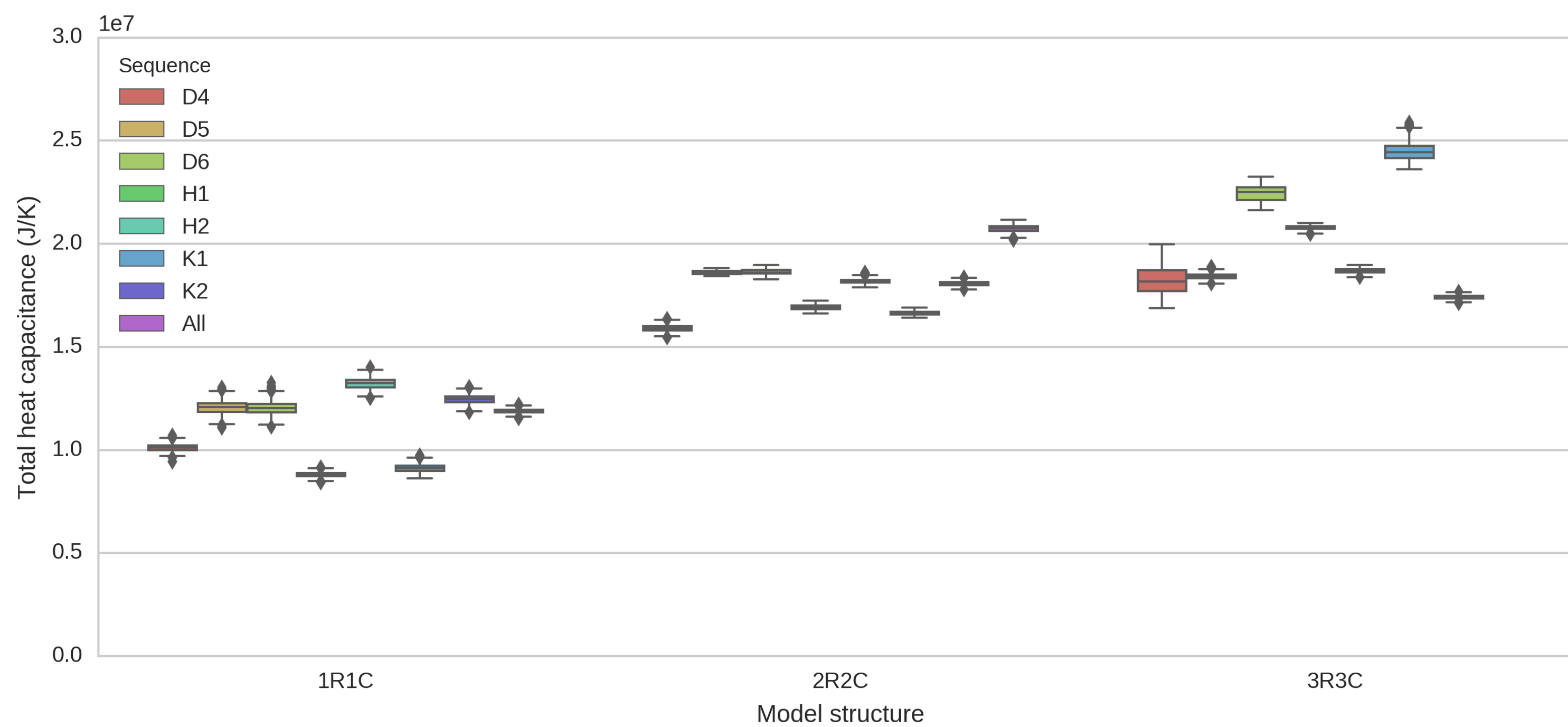
(b) HLC estimé par modèles stochastiques

FIGURE 4. Estimation du coefficient HLC

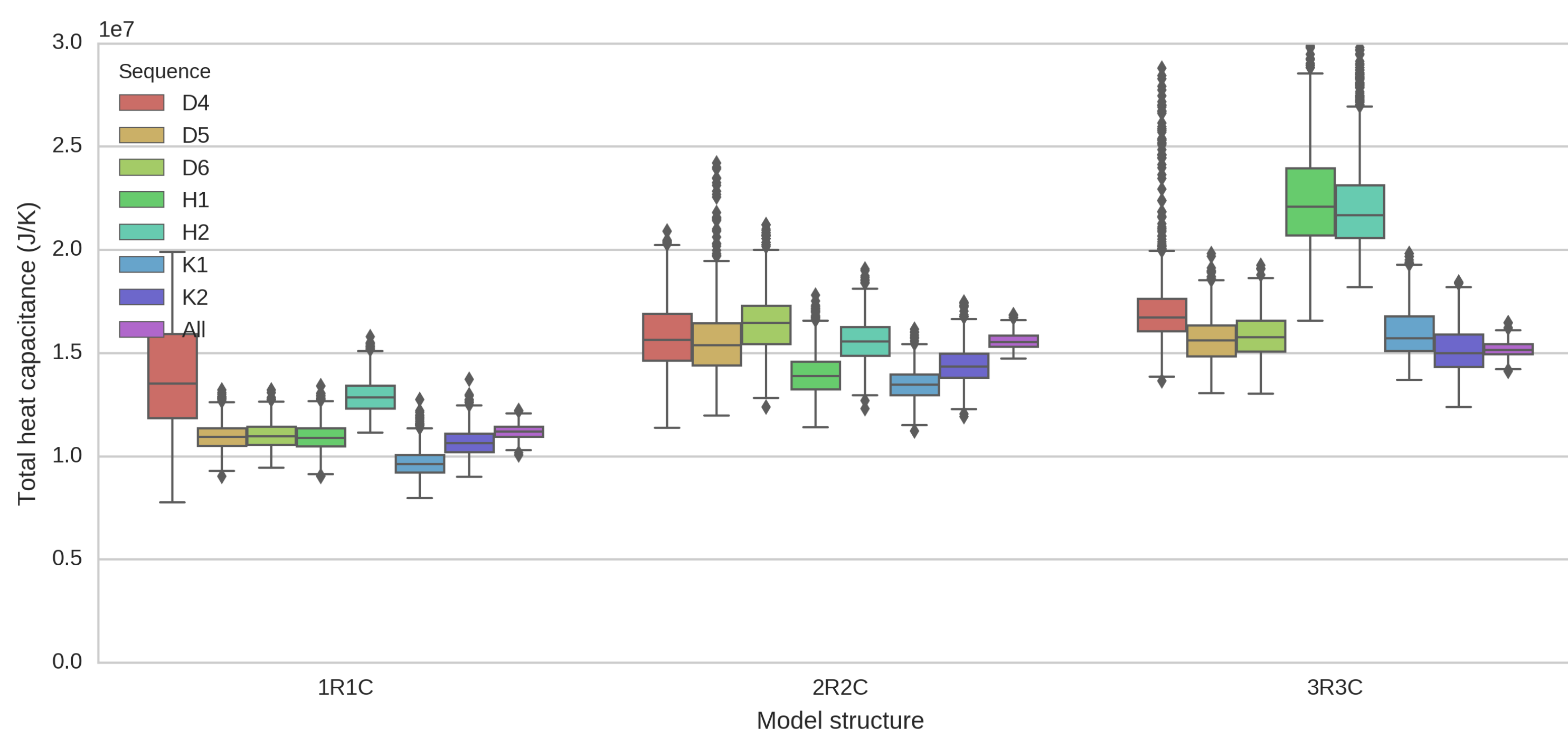
La Fig. 4(a) compare le HLC estimé par des modèles déterministes. La partie de gauche montre les sept estimations de HLC par un modèle 1R1C, ainsi que son estimation réalisée en utilisant toutes les séquences de mesure conjointement. Le centre de la figure montre les estimations par un modèle 2R2C, et la partie droite par un modèle 3R3C. Le constat principal est le manque de cohérence des estimations d'un même modèle entre elles. C'est particulièrement le cas du modèle 1R1C, qui renvoie des valeurs de HLC variant entre 57 et 92 W/K. Cela implique que l'utilisation d'une seule série de mesures ne garantit aucunement de trouver la valeur réelle de ce coefficient. Le constat est le même, bien que moins accentué, pour les modèles 2R2C et 3R3C. La seconde observation qu'on peut tirer est l'étroitesse des intervalles de confiance sur le paramètre HLC. Ceux-ci ne se recoupent pas d'un essai à l'autre : ils ont en effet été obtenus en ne tenant pas compte de toute l'incertitude du problème, mais seulement des erreurs de mesure.

La Fig. 4(b) montre les mêmes résultats dans le cas de modèles stochastiques. On peut observer des intervalles de confiance beaucoup plus larges et qui peuvent être superposés. L'estimation de HLC est bien plus incertaine, mais aussi plus robuste donc plus fiable : la vraie valeur de HLC est probablement comprise dans l'estimation issue de chaque calibration. On peut l'expliquer de manière schématique par l'utilisation de l'étape mise à jour du filtre de Kalman à chaque pas de temps : **puisque'on admet que le modèle commet une erreur, l'algorithme de calibration accepte plus de valeurs de HLC comme étant également vraisemblables.**

Certains point *outliers* sont à noter en dehors des intervalles de confiances des boîtes de la Fig. 4(b). Ils sont dûs au fait que celles-ci sont une représentation des chaînes de Markov qui sont un échantillon discret représentant les distributions a posteriori des paramètres : des outliers peuvent survenir dans ces chaînes lors de l'estimation de paramètres fortement corrélés.



(a) Capacité estimée par modèles déterministes



(b) Capacité estimée par modèles stochastiques

FIGURE 5. Estimation de la capacité thermique totale

La Fig. 5 montre les estimations de la capacité thermique totale des modèles utilisés, sous la même forme. Le constat est le même que précédemment : lorsque l'erreur de modélisation est négligée, les estimations ne sont pas cohérentes entre plusieurs calibrations séparées. Utiliser une seule série de mesure ne garantit pas que l'intervalle de confiance obtenu englobe la valeur réelle du paramètre. L'utilisation d'un modèle stochastique rend l'estimation plus représentative de l'information réellement contenue dans la mesure.

5 CONCLUSION

Le travail présenté ici vise à montrer l'importance de la prise en compte de l'erreur de modélisation dans les problèmes inverses, en comparant les résultats de calibration obtenus par des modèles déterministes à ceux de modèles stochastiques. On utilise plusieurs séquences expérimentales de mesure pour vérifier la variabilité des paramètres identifiés d'une séquence à l'autre : les résultats montrent que l'utilisation d'un modèle stochastique augmente considérablement les intervalles d'incertitude des paramètres, mais également leur robustesse.

6 REMERCIEMENTS

Ces travaux ont été réalisés dans le cadre du projet BAYREB : ANR-15-CE22-0003.

RÉFÉRENCES

- Bacher, P. et Madsen, H. (2011). Identifying suitable models for the heat dynamics of buildings. *Energy and Buildings*, 43(7) :1511–1522.
- Bauwens, G. et Roels, S. (2014). Co-heating test : A state-of-the-art. *Energy and Buildings*, 82 :163–172.
- Berger, J., Orlande, H. R. B., Mendes, N., et Guernouti, S. (2016). Bayesian inference for estimating thermal properties of a historic building wall. *Building and Environment*, 106 :327–339.
- Biddulph, P., Gori, V., Elwell, C. A., Scott, C., Rye, C., Lowe, R., et Oreszczyn, T. (2014). Inferring the thermal resistance and effective thermal mass of a wall using frequent temperature and heat flux measurements. *Energy and Buildings*, 78 :10–16.
- Brynjarsdóttir, J. et O’Hagan, A. (2014). Learning about physical parameters : the importance of model discrepancy. *Inverse Problems*, 30(11) :114007.
- Hastings, W. K. (1970). Monte Carlo sampling methods using Markov chains and their applications. *Biometrika*, 57(1) :97–109.
- Heo, Y., Choudhary, R., et Augenbroe, G. A. (2012). Calibration of building energy models for retrofit analysis under uncertainty. *Energy and Buildings*, 47 :550–560.
- Janssens, A. (2016). Report of Subtask 1b : Overview of methods to analyse dynamic data. In *IEA EBC Annex 58 - Reliable building energy performance characterisation based on full scale dynamic measurements*.
- Kristensen, N. R., Madsen, H., et Jorgensen, S. B. (2004). Parameter estimation in stochastic grey-box models. *Automatica*, 40(2) :225–237.
- Madsen, H. et Holst, J. (1995). Estimation of continuous-time models for the heat dynamics of a building. *Energy and Buildings*, 22(1) :67–79.
- Maillet, D., Jarny, Y., et Petit, D. (2011). Problèmes inverses en diffusion thermique - Outils spécifiques de conduction inverse et de régularisation. *Techniques de l’ingénieur*, Transferts thermiques :be8267.
- Mangematin, E., Pandraud, G., et Roux, D. (2012). Quick measurements of energy efficiency of buildings. *Comptes Rendus Physique*, 13(4) :383–390.
- Rouchier, S. (2018). Solving inverse problems in building physics : an overview of guidelines for a careful and optimal use of data. *Energy and Buildings*, 166 :178–195.
- Rouchier, S., Busser, T., Pailha, M., Piot, A., et Woloszyn, M. (2017). Hygric characterization of wood fiber insulation under uncertainty with dynamic measurements and Markov Chain Monte-Carlo algorithm. *Building and Environment*, 114 :129–139.
- Shumway, R. et Stoffer, D. (2016). *Time series analysis and its applications*. Springer.
- Zayane, C. (2011). *Identification d’un modèle de comportement thermique de bâtiment à partir de sa courbe de charge*. PhD thesis, École Nationale Supérieure des Mines de Paris.

Optimisation de la performance de l'enveloppe des bâtiments : couplage entre performance technico-énergétique et isolation acoustique

Jean-Christophe Vallée^{1,2}, Enrico Fabrizio^{2*}, Maria Ferrara², Arianna Astolfi²

¹ Ecole Normale Supérieure Paris-Saclay, 61 Avenue du Président Wilson, 94230 Cachan, France

² Politecnico di Torino, DENERG, TEBE Research Group, 24 c.so Duca degli Abruzzi, 10129, Torino, Italie

*enrico.fabrizio@polito.it

RESUME. La plupart des analyses qui sont actuellement effectuées sur un bâtiment à haute performance traitent d'un seul domaine - énergie, son, lumière - limitant ainsi une approche holistique qui serait beaucoup plus efficace dans la conception d'un bâtiment. Dans ce travail, une méthode basée sur le couplage entre simulation de la performance énergétique d'un bâtiment et de la performance d'isolation acoustique des parois pour retrouver le meilleur compromis entre les performances énergétiques et acoustiques des différentes façades d'un bâtiment a été mise en place et testée sur une étude de cas. Cette première étude peut donner lieu à plusieurs investigations concernant les fonctions objectives et la définition des indices de synthèse.

MOTS-CLÉS : Analyse du coût global, bâtiments zéro énergie; isolation acoustique des façades.

ABSTRACT. Most of the analysis that is currently done on a high-performance building deals with a single area - energy, sound, light - thus limiting a holistic approach that would be much more effective in building design. In this work, a method based on the coupling between simulation of the energy performance of a building and the acoustic insulation performance of the walls to find the best compromise between the energy and acoustic performance of the different facades of a building has been set up and tested on a case study. This first study can lead to several investigations concerning the objective functions and the definition of synthesis indexes.

KEYWORDS : cost optimal analysis; zero energy buildings; sound insulation of facades.

1. INTRODUCTION

Jusqu'à présent, l'étude des ZEB a focalisé l'attention des chercheurs et des professionnels sur la performance énergétique des bâtiments, en laissant de côté d'autres performances telles que l'insonorisation, l'éclairage naturel, la sécurité incendie, etc. En fait, la plupart des analyses qui sont actuellement effectuées sur un bâtiment à haute performance traitent d'un seul domaine - énergie, son, lumière - limitant ainsi une approche holistique qui serait beaucoup plus efficace dans la conception d'un bâtiment. Des méthodes et des outils capables de prendre en compte ensemble ces différentes exigences sont nécessaires et il convient de faire des recherches sur ce sujet. Des exemples de cette approche peuvent être retrouvés dans le couplage entre éclairage (naturelle et artificielle) et performance énergétique.

Deux directives européennes différentes prennent en compte les performances énergétiques et acoustiques. Il s'agit respectivement de la Directive 2010/31/UE pour la performance énergétique et de la Directive 2002/49/CE pour l'évaluation et la gestion du bruit dans l'environnement. La première a

introduit le principe de l'optimisation de la performance énergétique d'un bâtiment en fonction du coût global. En fait, le niveau de performance énergétique optimal est celui lié au coût global minimum. Mais la conception d'un ZEB est étroitement liée à son environnement. De nombreux critères sont pris en compte tels que le climat, les systèmes techniques disponibles, la typologie du bâtiment et les propriétés de la construction. Dans la littérature actuelle, la plupart des études traitent de l'optimisation des coûts, mais aucune n'a considéré l'influence des performances élevées d'isolation phonique des façades, qui est l'un des critères d'évaluation les plus importants de l'enveloppe d'un bâtiment.

Le but de ce travail est d'étudier comment retrouver le meilleur compromis entre les performances énergétiques et acoustiques des différentes façades d'un bâtiment, et comparer l'optimisation des coûts en terme d'énergie avec la performance d'isolation acoustique de l'enveloppe de manière à fournir la solution la plus efficace. Le cadre proposé est basé sur le couplage entre trois outils de simulation différents. Un modèle énergétique du bâtiment est créé et calibré sur un logiciel de simulation d'énergie dynamique. Des mesures d'efficacité énergétique concernant différentes technologies et systèmes d'enveloppe, caractérisées par différentes performances d'insonorisation, sont ensuite évaluées grâce un outil d'optimisation.

La méthodologie envisagée est appliquée à l'étude de cas d'une maison individuelle à haute performance où l'on peut apprécier l'optimisation de l'enveloppe du bâtiment et les différentes options de compromis entre efficacité énergétique, coût global et isolation acoustique.

2. METHODE

2.1. L'ANALYSE DES COÛTS OPTIMAUX

La refonte de la directive EPBD (European Parliament, 2010) a indiqué que les exigences de rendement énergétique minimales représentent le niveau de performance énergétique qui entraîne les coûts les plus bas au cours de la durée de vie économique estimée. Les entrées pour calculer ces niveaux sont les données climatiques, les caractéristiques du bâtiment de référence qui doivent être prédéfinis, les sources d'énergie et leurs coûts, les caractéristiques des usagers, les coûts des matériaux et des technologies, etc. Conformément à l'EPBD, les calculs de coûts globaux se traduisent par une valeur actualisée nette des coûts engagés au cours d'une période de calcul définie, en tenant compte des valeurs résiduelles des composants ayant des durées de vie plus courtes que celles du bâtiment et qui doivent donc être remplacés. Selon le mode opératoire décrit dans la norme européenne EN 15459, le coût global est directement lié à la durée du calcul qui est noté τ dans la relation suivante.

$$C_G(\tau) = C_I + \sum_j \left(\sum_{i=1}^n C_{a,i}(j) \cdot R_d(i) - V_{f,\tau}(j) \right) \quad (1)$$

où C_G représente le coût global visé à partir de l'année τ_0 , C_I est le coût de l'investissement initial, $C_{a,i}(j)$ est le coût annuel pour le composant j à l'année i , $R_d(i)$ est le taux d'actualisation pour l'année i , $V_{f,\tau}$ est la valeur finale du composant j à la fin de la période de calcul. Pour les besoins du présent travail, l'équation de coût global (1) a été choisie comme fonction objective pour le processus d'optimisation. La période de calcul est d'habitude fixée à 30 ans.

2.2. L'ANALYSE DE LA PERFORMANCE ACOUSTIQUE

Une fois l'optimisation des coûts effectuée, le calcul des indices acoustiques est effectué. Le processus s'exécute sur le logiciel Matlab®. Les données d'entrée, en particulier les indices de réduction

sonore, R , en dB, de chaque composant de la façade, sont donnés par l'utilisateur pendant la phase de pré-traitement. L'indice $D_{nT,A,tr}$ référant à la réglementation française sur les caractéristiques acoustiques des bâtiments (Arrêté du 30 juin 1999), a été retenu comme indice d'insonorisation dans cette étude. Il s'agit de la "différence de niveau sonore normalisée pondérée de la façade $D_{2m,nT,w}$, corrigée par le terme d'adaptation à un spectre C_{tr} ". Le terme d'adaptation C_{tr} est un facteur de correction utilisé uniquement lorsque la source de bruit est le trafic routier. Cet indice est calculé pour chaque portion de façade du bâtiment correspondent à chaque pièce d'un bâtiment.

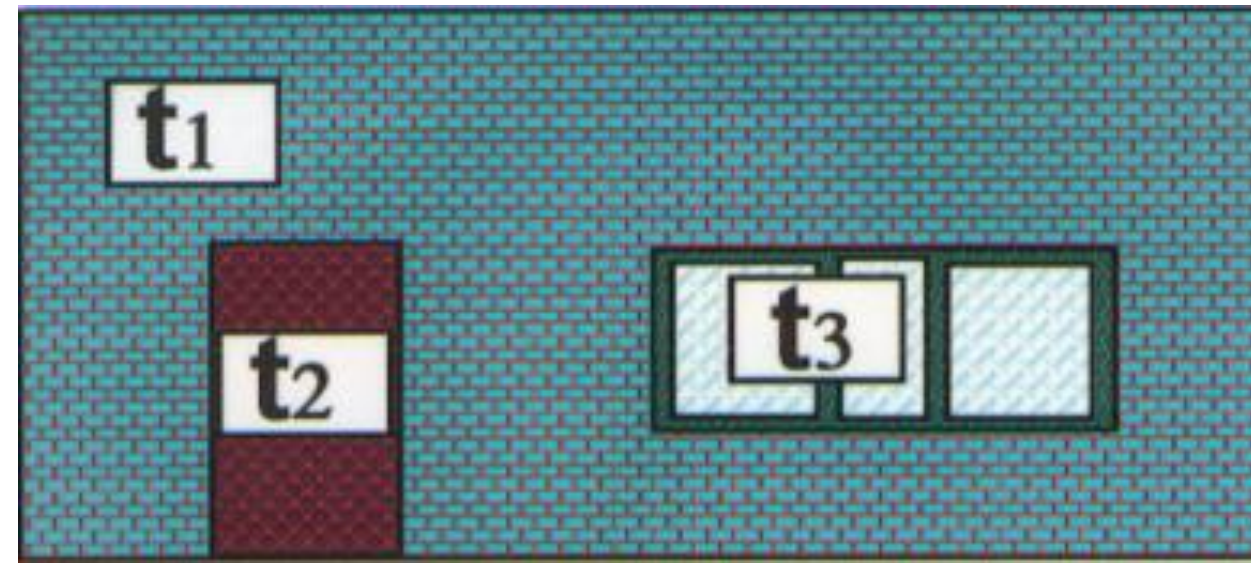


Figure 1. Composition d'une façade

Une façade est composée d'un mur, et éventuellement d'une fenêtre et d'une porte, comme le montre la figure 1. Chaque composante, indexée par i , a son propre indice de réduction du bruit R (en dB), donné en bandes de tiers d'octave. Conformément à la norme EN ISO 12354-3, la réduction moyenne de l'indice acoustique R_m , à chaque bande de tiers d'octave, est donnée par

$$R_m = 10 \cdot \log \left(\frac{\sum_{i=1}^n S_i}{\sum_{i=1}^n t_i \cdot S_i} \right) \quad (2)$$

où t_i est égal à $10^{-R_i/10}$ et S_i est la surface du composant i .

Ensuite, la différence de niveau sonore normalisée de la façade $D_{2m,nT}$ peut être calculée comme

$$D_{2m,nT} = R_m + \Delta L_{fs} + 10 \cdot \log \left(\frac{V}{6 \cdot T_0 \cdot S} \right) - 2 \quad (3)$$

où ΔL_{fs} est la différence de niveau due à la forme de la façade, V est le volume de la pièce intérieure, T_0 est le temps de réverbération de référence (0,5 s) et S est la surface totale de la partie de paroi.

A partir des valeurs de $D_{2m,nT}$ en tiers d'octave, on peut évaluer la différence de niveau sonore normalisée pondérée de la façade $D_{2m,nT,w}$ et le terme d'adaptation de spectre C_{tr} , en utilisant des courbes de référence [UNIEN ISO 10140]. L'addition de ces deux valeurs donne la différence de niveau sonore normalisée pondérée corrigée, de la partie de la façade, $D_{nT,A,tr}$. Cet indice est une valeur unique, normalisée en temps de réverbération et en volume de la pièce, et exprime le comportement d'isolation acoustique d'une partie de la façade. En France, cette valeur doit être supérieure à 30 dB selon (Arrêté du 30 juin 1999). Afin d'évaluer les performances globales d'isolation acoustique de l'ensemble d'un bâtiment et de répondre aux exigences législatives françaises en matière d'isolation acoustique, il a été décidé de considérer et retenir la valeur minimale $D_{nT,A,tr}$ parmi les différentes façades d'un bâtiment.

2.3. LE PROCESSUS D'OPTIMISATION

Un cadre de simulation combinant à la fois la simulation énergétique et le calcul d'isolation acoustique a été développé. Il est basé sur le couplage entre un outil de simulation thermique dynamique (qui, dans l'étude de cas, est le logiciel TRNSYS) et un outil d'optimisation (GenOpt). Ensuite, un post-traitement est développé dans l'environnement Matlab®. Pendant la phase de pré-traitement, l'utilisateur

sélectionne le système d'enveloppe, les conditions aux limites, les scénarios d'occupation, tous les paramètres qui peuvent changer pendant l'optimisation et les indices de réduction sonore, donnée dans une bande de tiers d'octave, des murs qui constituent l'enveloppe du bâtiment. Dans cet exemple, deux murs différents ont été choisis pour être comparés. Premièrement, GenOpt définit un ensemble de paramètres, et donc un bâtiment qui est simulé dans TRNSYS. Le coût global et la demande d'énergie sont calculés. L'ensemble des paramètres à la sortie du logiciel TRNSYS est ensuite envoyé à MATLAB qui calcule l'indice de réduction acoustique du bâtiment et enregistre également les valeurs des variables, le coût global et la demande d'énergie primaire du bâtiment simulé. A partir de la valeur de la fonction objective, GenOpt génère un nouvel ensemble de paramètres qui sera envoyé à TRNSYS pour simuler le prochain bâtiment. L'algorithme utilisé est le Particle Swarm Optimisation (PSO), dont les détails peuvent être trouvés dans (Ferrara et al., 2016)

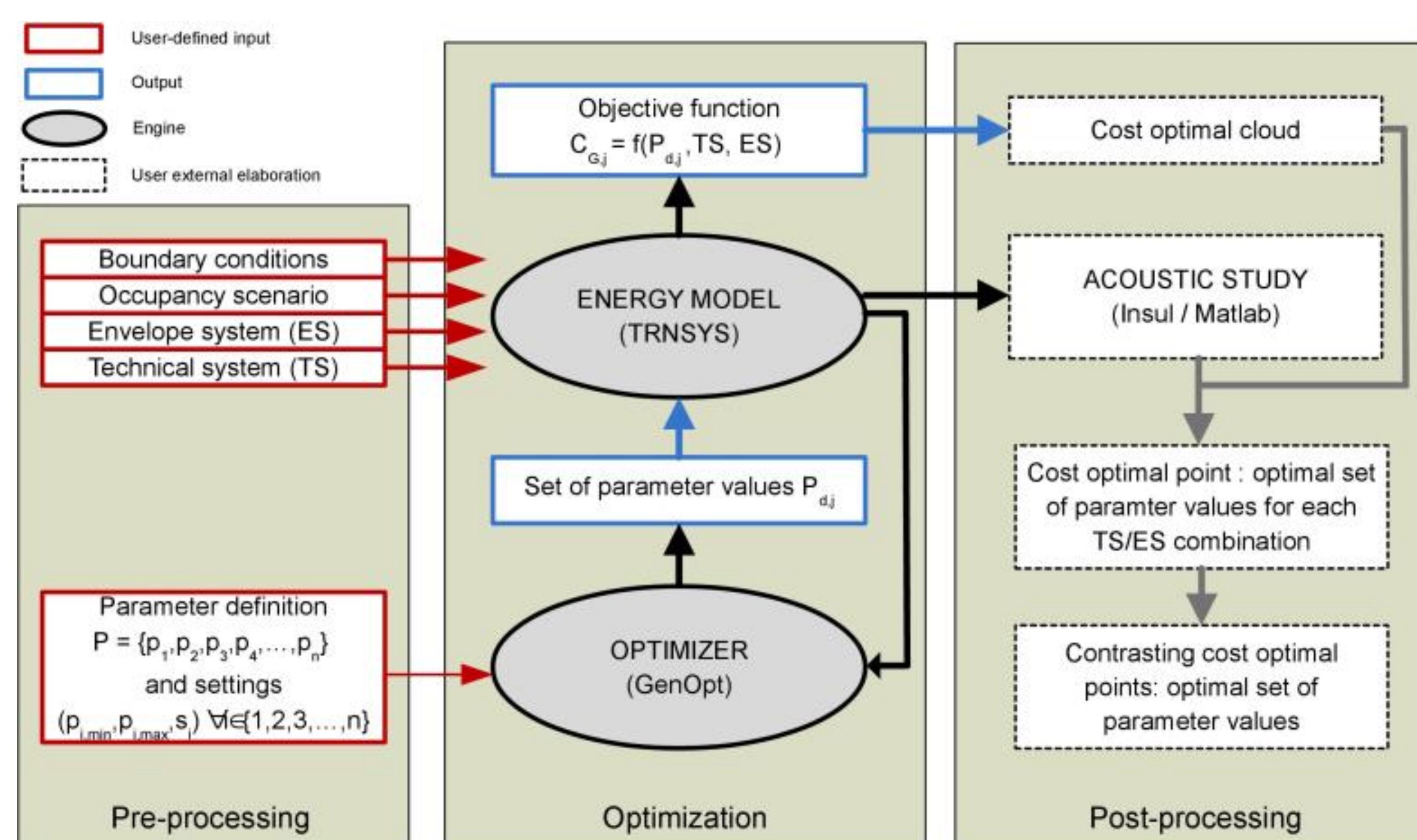


Figure 2. Schéma du processus de simulation et optimisation

3. L'ETUDE DE CAS

Le bâtiment de l'étude de cas est un véritable bâtiment nZEB pouvant accueillir une famille, composé de deux étages dans une forme compacte située à Ambérieu-en-Bugey, dans la région Rhône-Alpes. La maison est représentative des nouvelles maisons unifamiliales hautes performances de cette région et peut être considérée comme une référence pour les calculs optimaux en termes de coûts. Dans le présent travail, les mesures d'efficacité énergétique liées au système d'enveloppe ont été évaluées, tandis que le système technique a été fixé à celui existant. Il s'agit d'un système CVC efficace composé d'une pompe à chaleur air-air réversible associée à un échangeur de chaleur souterrain pour pré-traiter l'air et d'un système de ventilation mécanique à double flux avec récupération de chaleur (Ferrara et al., 2014). Afin de calculer la performance énergétique des différentes mesures d'efficacité énergétique, un modèle de simulation dynamique créé sous le logiciel TRNSYS a été mis en place, calibré et utilisé.

3.1. LES VARIABLES DE L'ENVELOPPE DU BATIMENT

Afin de mettre en œuvre la méthodologie des coûts optimaux dans une méthode d'optimisation basée sur la simulation, les mesures d'efficacité énergétique ont été définies comme des variables d'optimisation. Deux types de murs différents ont été implémentés dans les simulations dynamiques :

- un mur léger nommé INTESA (Astolfi et al., 2015) composé de deux cavités asymétriques et de différentes couches de plaques de plâtre. Les densités des plaques de plâtre et les entrefers des cavités assurent une isolation acoustique élevée tandis que les flocons de

cellulose qui remplissent les cavités assurent l'isolation thermique. Son indice de réduction acoustique pondéré R_w (C, C_{tr}) est égal à 69 (-1, -4) et son coefficient de transfert thermique U est égal à $0.21 \text{ W / m}^2\text{K}$;

- un mur de béton composé de deux couches de béton léger avec des densités différentes. Son indice de réduction acoustique pondéré R_w (C, C_{tr}) est égal à 49 (-2, -5) et son coefficient de transfert thermique U est égal à $0.41 \text{ W / m}^2\text{K}$.

Les indices de réduction acoustique de ces deux murs ont été tirés des certificats de laboratoire, suivant la norme EN ISO 717-1. Dans le bâtiment de l'étude de cas, les quatre façades ont été divisées en 19 parties. Par conséquent, 19 valeurs de $D_{nT,A,tr}$ ont été évaluées dans l'étape de post-traitement.

Parameter name and description	Unit	Min	Max	Step
WallType – Wall construction type		Light – L or Concrete - C		
ResR- Thermal resistance of roof insulation layer	[m ² K/W]	0.9	18	0.25
ResS - Thermal resistance of slab insulation layer	[m ² K/W]	0.9	18	0.25
WT - Window Type of North - East -West walls	[-]	1	4	1
WTS - Window Type of South wall	[-]	1	4	1
WTR - Window Type of Roof	[-]	1	4	1
Blr - Ground floor south window width (h= 2.15 m)	[m]	2.20	7.80	0.20
Bm - First floor south window width (h= 0.80 m)	[m]	0.20	7.80	0.20
Hr - Roof window height (w= 2.28 m)	[m]	0.00	4.7	0.58
Window type specification		U-value (W/m ² K)		g-value
1 - Double glazing	4/16/4	2.00	0.70	
2 - Double glazing, low emissivity with Argon	4/16/4	1.43	0.58	
3 - Triple glazing	4/16/4/16/4	0.70	0.50	
4 - Triple glazing, with Argon	4/16/4/16/4	0.40	0.40	

Tableau 1. Définition des variables d'optimisation (en anglais)

Les deux murs représentent deux options affectées à la variable de conception "WallType". Comme le montre le tableau 1, le mur léger INTESA est noté L, tandis que la lettre C indique le mur en béton. Les autres variables sont liées aux résistances thermiques de l'isolation du toit et de la dalle (ResR et ResS, respectivement), au type de fenêtre en fonction de leurs orientations (WT, WTS, WTR) et à la dimension des fenêtres (Blr, Bm, Hr). La plage et l'étape pour les valeurs à attribuer à chaque variable sont indiquées dans le tableau 1, avec la spécification des caractéristiques des fenêtres. Un ensemble de mesures d'efficacité énergétique est défini comme la combinaison de valeurs attribuées à chaque variable qui définissent une configuration de conception de bâtiment.

3.2. FONCTION DE COÛTS

Afin de calculer la fonction d'objectif de coût global défini dans le paragraphe 2.1, des fonctions de coût ont été associées à chaque variable, en référence au marché français. Les coûts attribués aux murs et des fenêtres ont été fournis par les fabricants. Les fonctions de coût liées au toit et à la dalle ont été tirées de la liste de prix française Batiprix. Le tableau II donne un résumé de toutes les fonctions de coût d'installation (CI) utilisées dans le présent document. Des détails sur les fonctions peuvent être trouvés dans (Ferrara et al., 2016).

Wall cost function = $f(\text{WallType}, \text{Bm}, \text{Blr})$	$CI_{wall} = 125.36 \cdot A_{outwall}$ for the light wall $CI_{wall} = 157.40 \cdot A_{outwall}$ for the concrete wall
Roof cost function = $f(\text{ResR}, \text{Hv})$	$CI_{roof} = (43.478 \cdot \text{ResR}^{0.309} + 105.30) \cdot A_{roof}$
Slab cost function = $f(\text{ResS})$	$CI_{slab} = (38.115 \cdot \text{ResR}^{0.186}) \cdot A_{slab}$
Window 1 = $f(\text{Bm}, \text{Blr}, \text{Hv})$	$CI_{w1} = 349 \cdot A_{w1} + 28$
Window 2 = $f(\text{Bm}, \text{Blr}, \text{Hv})$	$CI_{w2} = 390 \cdot A_{w2} + 29$
Window 3 = $f(\text{Bm}, \text{Blr}, \text{Hv})$	$CI_{w3} = 454 \cdot A_{w3} + 36$
Window 4 = $f(\text{Bm}, \text{Blr}, \text{Hv})$	$CI_{w4} = 470 \cdot A_{w4} + 36$
Energy cost (electricity)	0.0795 €/kWh _{night} + 1.224 €/kWh _{day}

Tableau 2. Définition des fonctions de coût

4. RESULTATS

Les résultats des optimisations sont présentés dans un diagramme de coût optimal (Figure 3) où le coût global (la fonction objectif) est rapporté en fonction de la consommation d'énergie primaire (kWh/m²y). Le facteur de conversion entre l'électricité et l'énergie primaire est le facteur français, qui est de 2,58. Les deux valeurs sont normalisées par rapport à la surface du volume chauffé (155 m²).

Les configurations de bâtiment évaluées peuvent être représentées dans un nuage de points où chaque point fait référence à une conception spécifique du bâtiment de l'étude de cas et correspond à un ensemble de valeurs de paramètres. Les points bleus se réfèrent aux bâtiments avec le mur opaque léger tandis que les points rouges-jaunes se réfèrent aux bâtiments avec le mur de béton. Les nuances de couleurs représentent les valeurs des facteurs d'isolation acoustique normalisés pondérés $D_{nT,A,tr}$.

Comme le montre la figure 3, tous les points des nuages se situent dans une fourchette de performance énergétique variant de 24,9 kWh / m² à 72,6 kWh / m², tandis que la gamme de coûts globale varie de 431,7 €/m² à 567,0 €/m². Des points tels que les valeurs extrêmes de coût et de performance énergétique ont été mis en évidence dans le diagramme de la figure 3. Ces valeurs extrêmes ne sont liées qu'à l'ensemble des simulations. Elles peuvent par conséquent ne pas correspondre aux valeurs les plus élevées/les plus basses possibles dans l'espace total des paramètres.

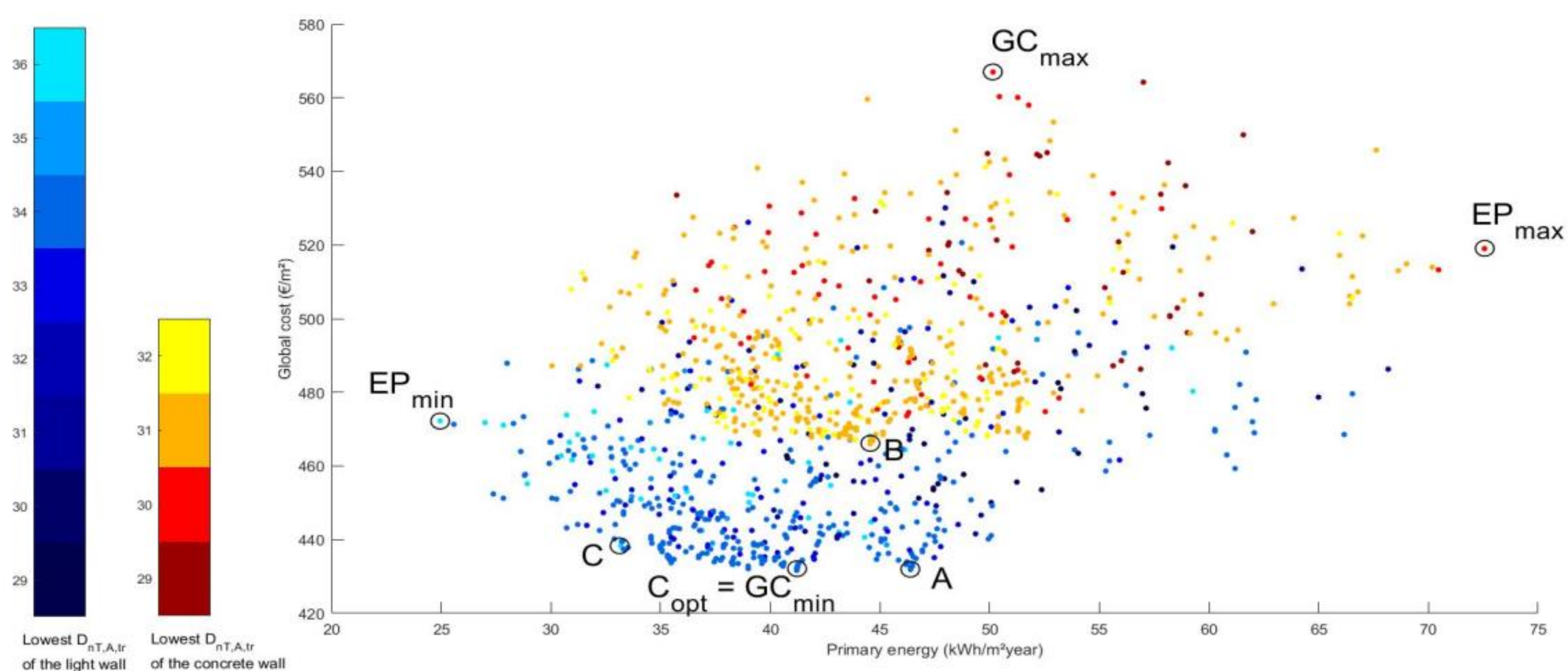


Figure 3. Représentation des résultats

Les valeurs des paramètres de ces points sont reportées dans le tableau 3. Le niveau de performance énergétique optimal en fonction des coûts peut être retrouvé dans la fourchette 40 – 47 kWh / m².an. Dans cette gamme, deux valeurs minimales peuvent être trouvées pour deux bâtiments caractérisés dans le tableau 3.

Le coût global optimal est donné par GC_{min} . Sa performance énergétique est égale à 41,22 kWh/m².an pour un coût global de 431,65 €/m². Le point A est le deuxième coût global minimum dans le cas de la façade opaque légère. Le niveau de performance énergétique optimal est compris entre 40 et 47 kWh / m².an. Dans cette gamme, deux valeurs minimales peuvent être trouvées pour deux bâtiments caractérisés dans le tableau 3. Le coût global optimal est donné par GC_{min} . Sa performance énergétique est égale à 41,22 kWh/m².an pour un coût global de 431,65 €/m². Le point A est le deuxième coût global minimum dans le cas de la façade opaque légère.

Variable	Unit	EP _{min}	GC _{max}	GC _{min}	EP _{max}	A	B	C
Walltype	[-]	L	C	L	C	L	C	L
ResR	[m ² K/W]	16.2	16.2	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8
ResS	[m ² K/W]	10.8	10.8	1.8	0.9	0.9	0.9	7.2
WT	[-]	5	5	1	1	1	1	3
WTS	[-]	5	5	1	1	1	1	4
WTR	[-]	5	3	1	1	1	1	3
Blr	[m]	2.2	7.8	2.2	4.6	2.2	2.2	2.2
Bm	[m]	2.5	6.3	0.2	7.8	0.2	0.2	0.2
Hr	[m]	0	4.7	0	4.7	0	0	0

Tableau 3. Valeurs des paramètres et de la fonction objective aux points remarquables ($EP_{min/max}$, $GC_{min/max}$ représentent les paramètres conduisant respectivement à une performance énergétique et un coût global minimaux et maximaux)

Du point de vue énergétique, le mur en béton est moins performant que le mur léger car un décalage d'environ 5 kWh/m² peut être observé. Cela est dû à la différence des valeurs U entre les deux parois. Néanmoins, l'ensemble de paramètres qui définit le point B, qui représente le coût global minimum dans le cas du mur de béton, est le même que le minimum de coût global rapporté au mur léger. La différence de performance énergétique est uniquement due au type de mur adopté. Cet ensemble de paramètres peut être considéré comme le meilleur, quel que soit le type de façade opaque.

En ce qui concerne les performances d'isolation acoustique de façade (nuances de bleu et de rouge sur la figure 3), on peut noter que la paroi en béton donne en général des valeurs de $D_{nT,A,tr}$ inférieures à celles de la paroi légère. Cette différence s'explique par le processus d'optimisation dans lequel varient à la fois la dimension et le type des fenêtres, ce qui entraîne des valeurs de réduction du son moyennes différentes. En effet, la plupart des points du mur en béton peuvent ne pas être acceptables selon la loi française (Arrêté du 30 juin 1999) en matière d'isolation phonique des bâtiments. Au contraire, la paroi légère garantit le minimum requis pour la plupart des points analysés. Pour les deux murs, il n'y a pas de corrélation claire entre l'isolation acoustique de la façade et le coût global, ni l'utilisation d'énergie primaire.

Au voisinage du coût minimum global (+2 €/m²), certains ensembles de paramètres présentent une faible différence de niveau sonore normalisée pondérée de la façade. D'autres ensembles de paramètres

pour lesquels l'indice $D_{nT,A,tr}$ est égal à 36 peuvent être retrouvées dans la gamme 25-33 kWh/m². Pour ces bâtiments, des fenêtres à triple vitrage donnent de meilleurs résultats en énergie mais un coût global plus élevé. Comme indiqué par le point C, dont les paramètres sont décrits dans le tableau 3, une augmentation négligeable du coût global (environ 1,5%) peut conduire à une meilleure isolation acoustique et à des améliorations significatives de la performance énergétique (-19,5%). Cet ensemble de paramètres peut être choisi comme le meilleur compromis entre les trois objectifs différents.

5. CONCLUSIONS

Ce travail a établi une méthodologie pour coupler la performance d'isolation acoustique, l'optimisation des coûts et la performance énergétique d'un bâtiment à haute performance. Néanmoins, il convient de noter que l'aspect moteur de la fonction d'optimisation est un compromis entre la meilleure performance thermique du bâtiment et le coût d'installation le plus bas. D'autres études pourront donc être développées afin d'inclure dans la fonction objective l'exigence d'isolation acoustique. Pour ce faire, des fonctions appropriées d'évaluation de l'indice de réduction acoustique des murs et des fenêtres devraient être mises en place dans le processus d'optimisation. D'autres investigations pourront également être menées concernant l'indice de réduction acoustique des parois opaques. Contrairement à la performance énergétique donnée par un seul indice, l'isolation acoustique est représentée par autant d'indices que le nombre de portions de façades ; il serait donc important de définir un indice de prestation globale de l'isolation acoustique d'un bâtiment dans un tel étude d'optimisation.

6. REMERCIEMENTS

Ce travail a été mené sous le financement de la Compagnia di San Paolo dans le projet « Starting Grant » 2016-2018.

7. BIBLIOGRAPHIE

- Arrêté du 30 juin 1999 relatif aux caractéristiques acoustiques des bâtiments d'habitation.
- Astolfi A., Carpinello S., Pietrafesa C., Serra V., Valsesia E., Griginis A., Prato A., Schiavi A., De Astis V., Zito D., Cavaleri A. INTESA system: A new high-performance and highly integrated drywall; *Energy Procedia* 2015; 78:261-266.
- EN 15459; Energy performance of buildings. Economic evaluation procedure for energy systems in buildings; 2007.
- EN ISO 717-1 Standard. Acoustics. Rating of sound insulation in buildings and of buildings elements - Part 1: Airbone sound insulation; 2013.
- EN ISO 10140 Standard. Acoustics - Laboratory measurement of sound insulation of building elements; 2010.
- EN ISO 12354-3 Building acoustics – Estimation of acoustic performance of buildings from the performance of elements - Part 3: Airborne sound insulation against outdoor noise; 2000.
- European Parliament. 2010. Directive 2010/31/EU of The European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings (recast). *Official Journal of the European Union*, 2010; pp. 13-25.
- Ferrara Maria, Fabrizio Enrico, Virgone Joseph, Filippi Marco. 2014. A simulation-based optimization method for cost-optimal analysis of nearly Zero Energy Buildings. *Energy and Buildings* 84: 442-457.
- Ferrara Maria, Virgone Joseph, Kuznik Frédéric. 2014. All-in-one high-performing systems for ZEB houses. *REHVA European HVAC Journal* 6.
- Ferrara Maria, Fabrizio Enrico, Virgone Joseph, Filippi Marco. 2016. Energy systems in cost-optimized design of nearly zero-energy buildings. *Automation in Construction* 70:109-127.

Outils d'optimisation de la conception multi-objectifs utilisant la programmation visuelle : tests utilisateurs d'acceptabilité

Abdulaziz AFANDI*^{1,2}, Aline BARLET¹, Patrick SEBASTIAN², Denis BRUNEAU¹,
Xavier MARSAULT³

¹ GRECCAU (EA MCC 7482), 33405 TALENCE, France

² I2M (UMR CNRS 5295), 33400 TALENCE, France

³ MAP-ARIA (UMR CNRS-MCC 3495), 69512 VAULX-EN-VELIN, France

*abdulaziz.afandi@u-bordeaux.fr

RESUME. Le document mesure l'acceptabilité par les utilisateurs d'outils d'optimisation de conception multi-objectifs dans la programmation visuelle. Il compare deux outils d'optimisation de design différents sous environnement Grasshopper®, Biomorpher © et Octopus ©. Les résultats montrent que les utilisateurs préfèrent travailler avec l'outil qui a une représentation plus graphique du design et qui leur permet de s'engager davantage dans le processus d'optimisation qu'est Biomorpher ©. D'autre part, les utilisateurs font plus confiance aux résultats de l'outil qui propose le plus de diagrammes d'analyse comparant les résultats obtenus qu'est Octopus ©. Par conséquent, il semble opportun d'envisager à l'avenir le développement d'un nouvel outil ou d'une nouvelle plateforme qui fusionne l'approche de ces deux outils Biomorpher © et Octopus ©.

MOTS-CLÉS : acceptabilité, optimisation de la conception, programmation visuelle.

ABSTRACT. The paper measures users' acceptability of multi-objective design optimization tools in visual programming. It compares two different design optimization tools inside Grasshopper®, Biomorpher© and Octopus©. The results show that the users prefer to work with the tool that has more graphical representation of the design and the tool that allows them to engage more in the process of optimization which is Biomorpher©. On the other hand, the users trust the results of the tool that has more analysis diagrams that compare the results, which is Octopus©. Hence, it is recommended to develop new tools or simulation platforms that merge the approach of both Biomorpher © and Octopus © tools.

KEYWORDS: acceptability, design optimization, visual programming.

1. OUTILS D'OPTIMISATION DE CONCEPTION

Les architectes peuvent facilement adopter un outil qui améliore leur productivité. De même, ils utilisent largement les outils d'analyse existants. Par contre, les outils d'aide à la décision en phase de conception initiale sont rarement acceptés par les architectes. Howarth affirme "il y a un risque que les concepteurs se sentent menacés en retirant une grande partie du processus de création de leur travail - il leur reste simplement à choisir entre un ensemble d'options à chaque fois." (Howarth, 2017).

Développer des outils acceptables en matière d'aide à la décision pour l'optimisation de la conception en phase esquisse est une tâche complexe. Un outil accepté par un architecte peut ne pas l'être par un autre. Même pour le même architecte, le niveau d'acceptabilité variera selon les types de difficultés rencontrées lors de ce processus de conception initiale. Par conséquent, les architectes doivent être en mesure de personnaliser leurs propres outils et ainsi d'augmenter leurs propres

capacités de conception assistée. Ces personnalisations permettraient également aux développeurs de logiciels de mieux comprendre les besoins effectifs de l'architecte.

Actuellement la plupart des architectes ne sont pas formés ni préparés à l'analyse informatique ou à la programmation. Lewis et Olson ont affirmé "il est bien connu que les langages de programmation conventionnels sont difficiles à apprendre et à utiliser ; ils nécessitent des compétences que beaucoup de gens n'ont pas » (Lewis et Olson, 1987). Myers a souligné que "il semble clair qu'un style de programmation plus visuel pourrait être plus facile à comprendre et à générer pour les humains, en particulier pour les non-programmeurs ou les programmeurs novices" (Myers, 1990). Par conséquent, la programmation visuelle peut être un bon environnement pour développer des outils personnalisables qui s'adaptent facilement aux besoins spécifiques de chaque architecte.

Cet article vise à étudier l'acceptabilité, par les utilisateurs (architectes et urbanistes), d'outils d'optimisation de conception multi-objectifs utilisant la programmation visuelle. L'étude a pour objectif d'aider les développeurs à proposer des outils informatiques de programmation visuelle adaptés, incitant davantage d'architectes à les exploiter. L'utilisation de ces outils conduirait à des décisions de conception plus optimisées en regard de ces besoins spécifiques des architectes.

2. METHODOLOGIE

L'étude se concentre sur "Octopus©" et "Biomorpher©", deux outils d'optimisation de conception multi-objectifs sous environnement Grasshopper®, un outil de programmation visuelle connecté avec Rhinoceros®.

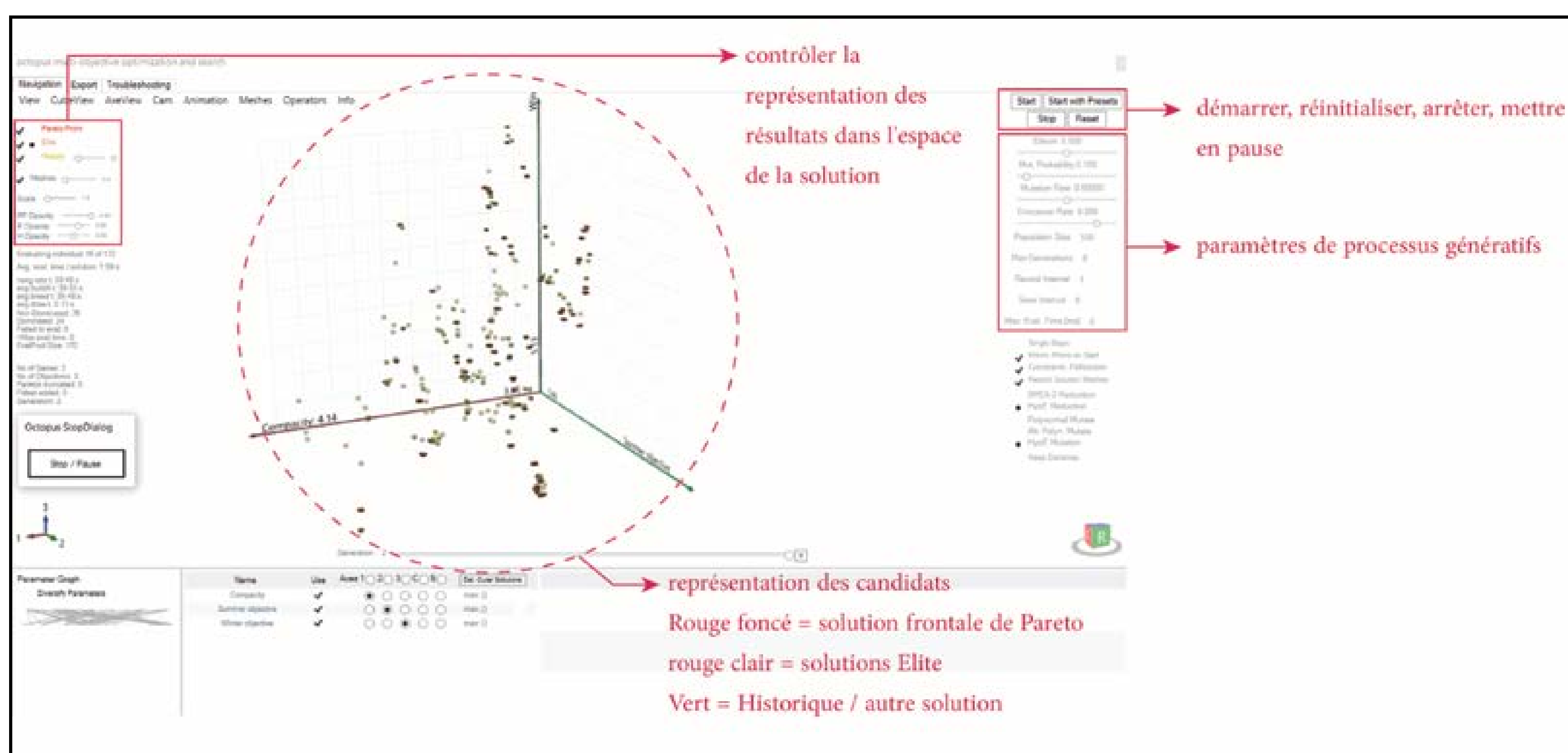


Figure 1 : Interface d'Octopus©

Octopus© est un plugin d'optimisation de conception multi-objectifs sous Grasshopper® qui utilise l'optimisation selon la loi de Pareto (Figure 1). Biomorpher© utilise des algorithmes évolutifs interactifs dans l'environnement de Grasshopper®, qui aident à générer des formes et à les évaluer. Ainsi, Biomorpher© n'utilise pas l'optimisation selon la méthode de Pareto comme Octopus© mais combine simplement tous les objectifs en un seul objectif. Dans Biomorpher©, l'utilisateur peut sélectionner de nombreuses solutions à partir desquelles le plugin peut faire évoluer de nouvelles générations de solutions en fonction des objectifs et des solutions retenues (Figure 2).

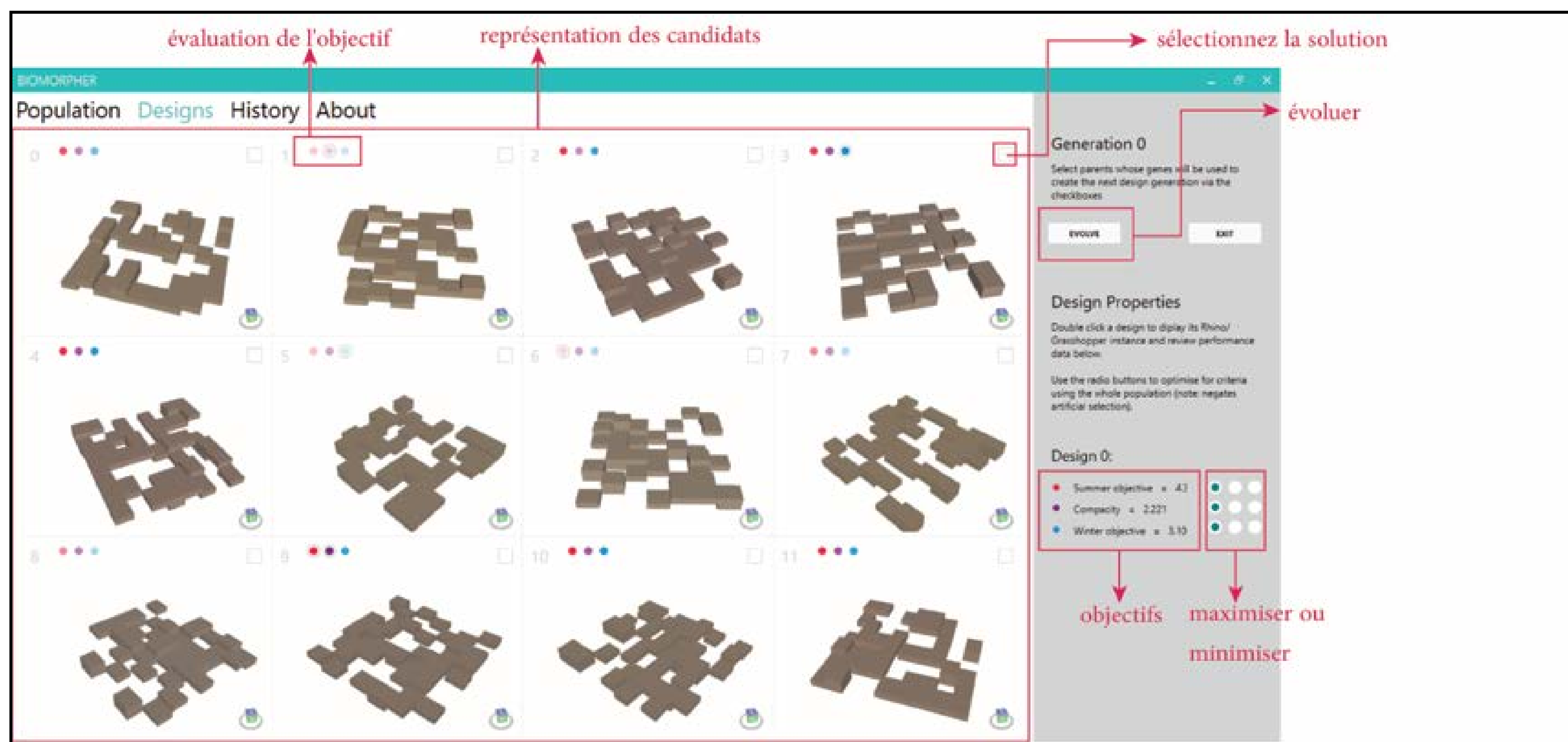


Figure 2 : Interface de Biomorpher©

L'expérience menée ici consiste à comparer l'acceptabilité de ces deux outils et non leurs performances. Les deux plugins sont donc présentés comme des outils d'optimisation multi-objectifs qui utilisent un mode calcul d'optimisation similaire, ce qui permet d'orienter l'expérience vers une évaluation précise, ciblée vers une mesure de cette acceptabilité.

Pour évaluer cette acceptabilité, des échantillons, regroupant des architectes et des ingénieurs, ont été invités à utiliser et explorer les deux outils. Les séances de test étaient divisées en quatre étapes : une présentation des outils, un temps de manipulation guidée, un temps de manipulation autonome et un questionnaire individuel et standardisé pour le recueil des perceptions et des représentations des testeurs. A partir de l'analyse des données, les résultats sont utilisés pour éclairer les développeurs sur les voies à suivre afin d'améliorer leurs outils d'aide à la conception.

2.1. LA PRESENTATION

L'introduction, faite par l'animateur en début de séance de test, a permis de démontrer, à l'aide d'exemples, l'importance de l'optimisation de la conception en architecture. Ensuite, le processus de conception a été défini de façon générale puis plus particulièrement la phase initiale de ce processus (Figure 3). Dans un troisième temps, l'importance de l'optimisation de la conception multi-objectifs a été présentée et illustrée à travers la méthode de Pareto (Wang et al., 2011), méthode mathématique utilisée par la plupart des outils d'optimisation de conception multi-objectifs.

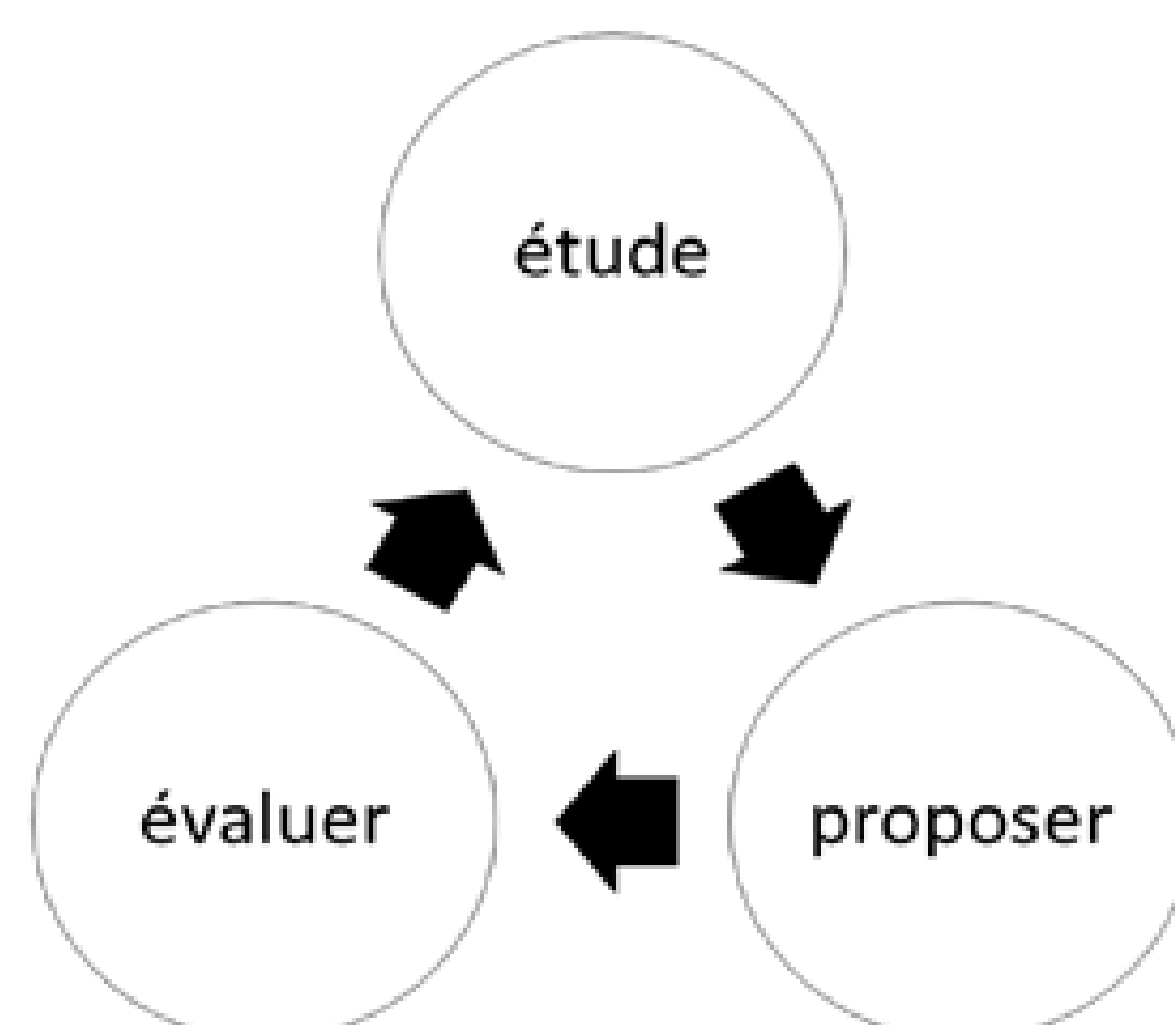


Figure 3 : Début de la boucle du processus de conception

Enfin, différents logiciels conçus pour l'optimisation ont été présentés et catégorisés, parmi lesquels Biomorpher© et Octopus©, qui fonctionnent à l'intérieur de l'environnement Grasshopper®, qui font l'objet du test.

2.2. TESTER LES OUTILS

L'interface Grasshopper® a tout d'abord été expliquée et un tutoriel de base a été présenté aux participants. Puis une manipulation guidée a été proposée afin de leur permettre de réaliser un projet simple d'optimisation. Pour ce premier exercice, les testeurs ont ainsi construit une grille de points et un point "A" isolé de cette grille. Puis ils ont dû mesurer les distances entre le point "A" et chacun des points de la grille afin d'utiliser ces distances comme dimensions des rayons des sphères construites à partir de ces points. De ce fait, plus la sphère était proche du point "A", plus elle était petite. Par la suite, ils ont dû optimiser la position du point "A" afin de maximiser le volume total des sphères et de minimiser les distances totales entre les centres des sphères et le point "A" (Figure 4).

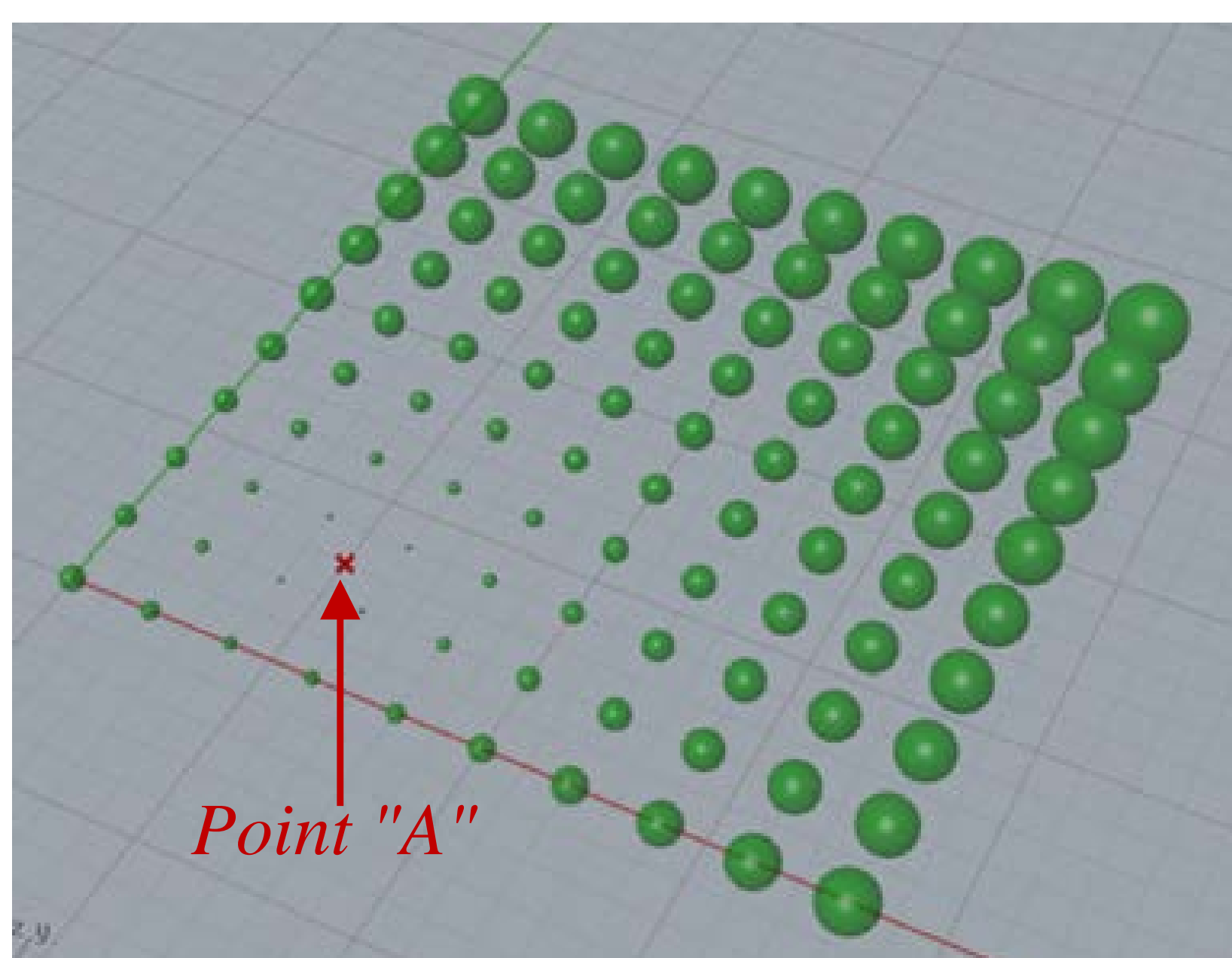


Figure 4 : Résultat de la manipulation guidée

Après la présentation des tutoriels de Biomorpher© et d'Octopus©, les participants ont mené ce premier exercice avec les deux outils.

Pour le temps de manipulation autonome, un autre algorithme développé avec Grasshopper® a été présenté et expliqué aux participants. Ce code crée une grille 3D modulaire constituée de boîtes. Cet algorithme permet à l'utilisateur de définir les dimensions de la zone de construction, la taille de l'unité (une boîte), le nombre de niveaux et la densité de construction. Il effectue trois analyses différentes : (1) il calcule la compacité, qui correspond au rapport entre la surface de l'enveloppe de la forme et la surface totale de plancher, (2) il calcule le gain solaire pendant l'été, et (3) il calcule le gain solaire pendant l'hiver. Les participants ont été invités à optimiser l'orientation et la distribution des boîtes en utilisant à la fois Octopus© (Figure 1) et Biomorpher© (Figure 2), avec pour objectif de minimiser les apports solaires d'été et tout en maximisant les apports solaires d'hiver et la compacité.

2.3. LE QUESTIONNAIRE

Enfin, chaque participant a rempli un questionnaire construit en trois parties. La première partie se concentre sur la comparaison entre Biomorpher© et Octopus©. La deuxième partie permet des commentaires généraux sur la programmation visuelle. La troisième partie vise à recueillir des données sur les participants eux-mêmes, (âge, profession, ...) et sur leurs compétences en termes de programmation, visuelle ou non, et de méthodes d'optimisation.

3. ANALYSE DES RESULTATS

3.1. PARTICIPANTS

Le nombre total de participants est de 13 personnes, 46,15% étant ingénieurs spécialisés dans la conception de bâtiments, 46,15% architectes et 7,69% architectes/ingénieurs. Les étudiants représentent 69,23% des participants. Le groupe des 18 et 34 ans représente 84,61% du panel et seulement 15,38% ont 35 ans ou plus.

La majorité des participants ont précisé qu'ils n'avaient aucune expérience en programmation ou en programmation visuelle (Tableau 1), et la plupart d'entre eux ne sont pas utilisateurs de méthodes d'optimisation de conception multi-objectif (Figure 5).

Niveau de compétence	Compétences en programmation	Compétences en programmation visuelle
1/10	38,46%	61,54%
2/10	0,00%	0,00%
3/10	7,69%	15,38%
4/10	7,69%	15,38%
5/10	23,08%	0,00%
6/10	7,69%	7,69%
7/10	0,00%	0,00%
8/10	7,69%	0,00%
9/10	0,00%	0,00%
10/10	7,69%	0,00%

Tableau 1 : les compétences des participants en programmation et en programmation visuelle

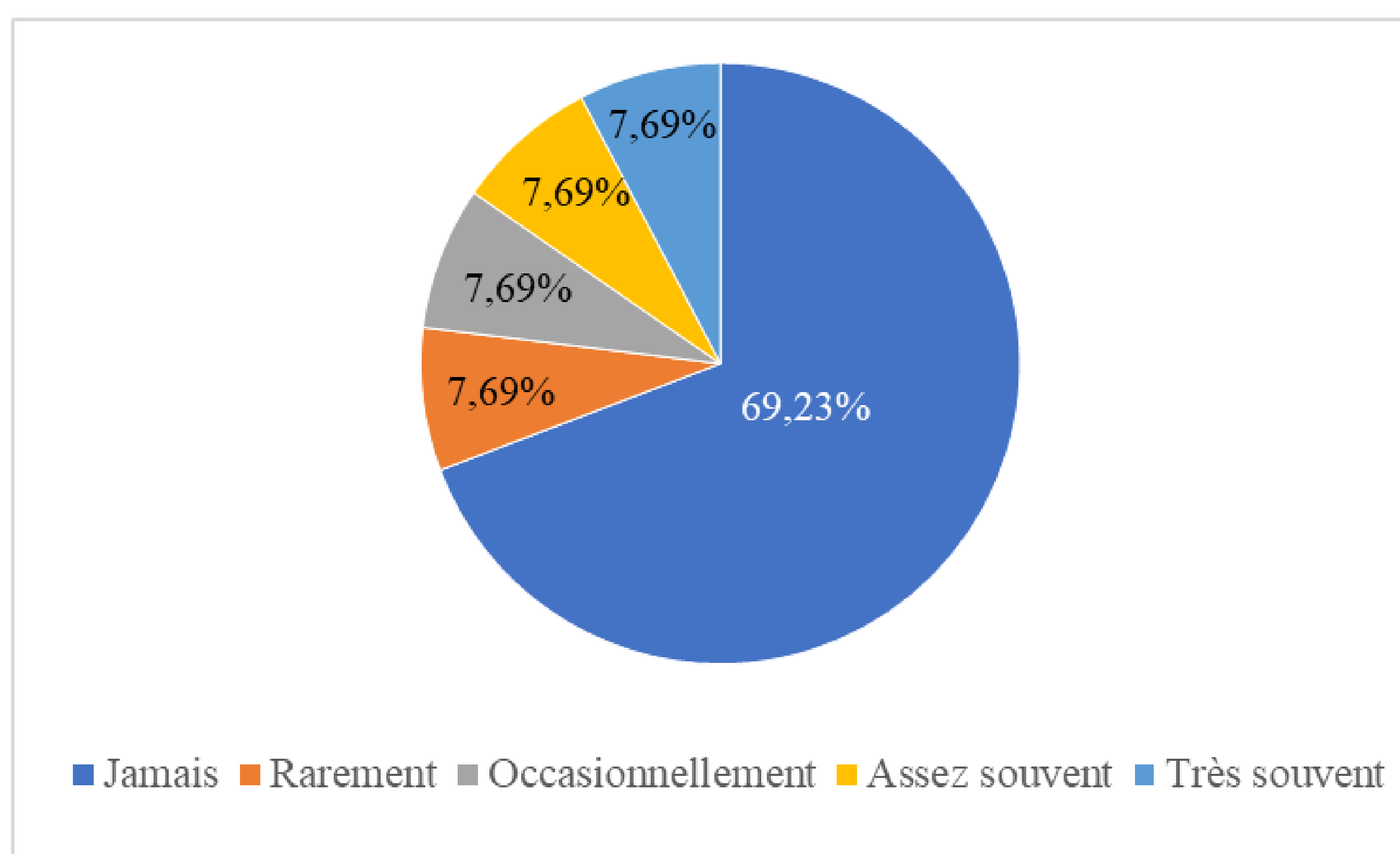


Figure 5 : Fréquence d'utilisation de l'optimisation de conception multi-objectif

3.2. COMPARAISON DE BIOMORPHER© & OCTOPUS©

Concernant le processus de conception, les résultats (cf. Tableau 2) montrent que Biomorpher© a un niveau d'acceptabilité supérieur à celui d'Octopus©. Effectivement, 61,54% des réponses étaient favorables à l'utilisation de Biomorpher© et seulement 38,46% d'Octopus©.

Biomorpher© apparaît également comme permettant davantage l'implication de l'utilisateur dans la conception ou encore l'augmentation du niveau de créativité qu'Octopus©. Ainsi, sur ces thématiques,

84,62% des participants préfèrent Biomorpher© alors que seulement 15,38% d'entre eux préfèrent Octopus©.

A l'inverse, en ce qui concerne l'optimisation et la performance, Octopus© a un niveau d'acceptabilité supérieur à celui de Biomorpher©, avec respectivement 73,08% et 26,92% de réponses favorables.

Enfin, les résultats montrent que les participants évaluent plus positivement Biomorpher© à propos de l'interface, et de manière générale. Ainsi, 65,38% des réponses sont favorables à Biomorpher© contre 34,62% pour Octopus©.

Question	Biomorpher©	Octopus©
Quel outil selon vous peut vous aider à trouver des solutions de design dans différentes situations ?	53,85%	46,15%
Quel est l'outil le plus adapté à votre mode de conception ?	69,23%	30,77%
Avec quel outil pensez-vous être davantage maître de la conception ?	84,62%	15,38%
Quel outil stimule le plus votre créativité ?	84,62%	15,38%
Quelle méthode préférez-vous pour filtrer les résultats ?	23,08%	76,92%
À votre avis, quel outil aide à générer de meilleurs résultats ?	30,77%	69,23%
Quel est l'outil le plus facile à comprendre ?	84,62%	15,38%
Quel est l'outil le plus intéressant pour vous ?	46,15%	53,85%
Quelle interface préférez-vous ?	69,23%	30,77%
Quel outil préférez-vous ?	61,54%	38,46%

Tableau 2 : Comparaison Biomorpher© et Octopus©

3.3. COMMENTAIRES GENERAUX

Cette partie du retour d'expérience permet de mesurer l'acceptabilité, de façon générale, pour ce type d'outils. Les deux premières questions se concentrent sur Biomorpher© et Octopus© tandis que les quatre dernières questions abordent la question de la programmation visuelle (cf. Tableau 3).

Question	Oui	Non	Peut être
Si vous êtes étudiant, pensez-vous utiliser ces outils dans votre travail scolaire ?	55,56%	0,00%	44,44%
Pensez-vous utiliser ces outils dans votre travail professionnel ?	53,85%	7,69%	38,46%
Pensez-vous que la programmation visuelle convient aux architectes ?	84,62%	7,69%	7,69%
Pensez-vous utiliser la programmation visuelle dans votre futur travail scolaire ?	60,00%	10,00%	30,00%
Pensez-vous utiliser la programmation visuelle dans votre futur travail professionnel ?	61,54%	7,69%	30,77%
Voulez-vous en savoir plus sur la programmation visuelle ?	84,62%	7,69%	7,69%

Tableau 3 : Opinions sur la pertinence des outils et la programmation visuelle

4. CONCLUSION

L'article compare l'acceptabilité de différents outils d'optimisation de conception multi-objectifs dans l'environnement de programmation visuelle de Grasshopper® connecté avec Rhinoceros®. L'étude se concentre sur deux outils : "Octopus©" et "Biomorpher©".

Les tests montrent une certaine homogénéité des réponses quelles que soient les caractéristiques des participants et leurs compétences en matière de programmation, visuelle ou non et d'optimisation.

Ainsi, les utilisateurs préfèrent utiliser Biomorpher© plutôt que Octopus©. D'un autre côté, ils font davantage confiance à Octopus© qu'à Biomorpher© en termes de performance et d'optimisation. L'un de ces deux outils s'inscrit dans une démarche très visuelle (Biomorpher©) mais est pauvre du point de vue optimisation. L'autre s'inscrit dans la démarche inverse (Octopus©).

Il est clair que le niveau d'acceptabilité de la programmation visuelle en général est très élevé. Les outils de programmation visuelle sont très prometteurs et de nouveaux plugins pour la programmation visuelle ont un fort potentiel d'acceptabilité parmi les architectes. Nous envisageons donc de développer un outil qui serait une "voie moyenne" entre l'approche de Biomorpher© et Octopus©.

5. BIBLIOGRAPHIE

- Howarth, Dan. 2017. *Generative design software will give designers "superpowers"*. février 6. Accessed décembre 1, 2017. <https://www.dezeen.com>.
- Lewis, Clayton, and Gary M Olson. 1987. *Can Principles of Cognition Lower the*. Technical Report, Norwood, NJ: Ablex.
- Myers, Brad A. 1990. "Taxonomies of Visual Programming and Program Visualization." *Journal of Visual Languages and Computing* 97-123.
- Wang, Lihui, Kalyanmoy Deb, and Amos H. C. Ng. 2011. *Multi-objective Evolutionary Optimisation for Product Design and Manufacturing*. London: Springer.

Etude du comportement hygrothermique d'anas de lin utilisés comme isolant en vrac de combles perdus

Emmanuel Antczak*¹, Mounir Asli¹, Franck Brachelet¹, Flore Brue², Didier Defer¹

¹ Univ. Artois, EA 4515, Laboratoire de Génie Civil et géo-Environnement, F-62400 Béthune, France

² UC Lille, Yncréa HdF - HEI, Laboratoire de Génie Civil et géo-Environnement, 13 rue de Toul, F-59046 Lille, France

*emmanuel.antczak@univ-artois.fr

RESUME. Ce travail porte sur l'étude d'un matériau isolant pour les combles perdus, issu d'une production agricole locale et ne nécessitant qu'un minimum de transformation pour son utilisation. Positionné géographiquement dans les Flandres, le projet s'est naturellement orienté vers la production de lin, qui a la particularité de générer un co-produit sous forme de paille, les anas. Ces derniers sont ici étudiés sous leur forme la plus basique, en vrac, pour une dispersion sur un plan horizontal. Le matériau a été caractérisé en laboratoire sur les aspects thermophysiques et hygrothermiques, il a été préalablement ignifugé par un complément principalement constitué de bicarbonate de sodium. L'isolant ainsi constitué a été mis en place, sur une épaisseur de 25cm à 30 cm, dans les combles d'un habitat paysan dont l'isolation, dégradée, a été préalablement déposée. Le matériau a été instrumenté dans la masse pour suivre les évolutions de température et d'humidité relative sur toute son épaisseur. Le suivi des grandeurs a été réalisé en fonction des contraintes climatiques saisonnières.

MOTS-CLÉS anas de lin, isolant, transferts hygrothermiques.

ABSTRACT. This work involves the study of an insulation material derived from local resource and not having undergone transformations. Positioned in French Flanders, the project was naturally oriented towards the production of flax, which has the particularity of generating a co-product, flax shives. These are studied in their most basic form, bulk, for dispersion on a horizontal plane. The material was characterized in the laboratory on the thermophysical and hygrothermal aspects, it was previously fireproofed by a complement consisting mainly of sodium bicarbonate. The insulation constituted was put in place, on a thickness of 25 cm to 30 cm, in the attic of a peasant habitat whose insulation, degraded, was previously deposited. The material has been instrumented to monitor changes in temperature and relative humidity throughout its thickness. The monitoring of the quantities was carried out according to the seasonal climatic constraints.

KEYWORDS : flax shives, insulation, hygrothermal transfer.

1. INTRODUCTION

La démarche d'économie circulaire est une solution alternative qui prend son essor actuellement au regard du contexte énergétique mondial (Biswas et al. 2016). Le principe est de valoriser les ressources naturelles locales et de les utiliser dans le cadre de circuits courts de distribution (Lasvaux et al. 2016). Si on prend l'exemple de l'isolation thermique des bâtiments, traditionnellement la France s'appuie sur les produits industriels à base de fibres minérales et de mousses plastiques énergivores en termes de fabrication. Par leur nature fibreuse et leur densité faible, les pailles provenant de la production agricole présentent des caractéristiques intéressantes pour une application au domaine du bâtiment. Elles sont utilisées depuis de nombreux siècles pour la fabrication de matériaux de

construction comme les torchis notamment, ou plus récemment sous la forme de bloc manufacturés de type béton de chanvre. Nous proposons ici d'utiliser un produit bio-sourcé, issu de l'agriculture locale, dans sa forme brute. Le coût énergétique à la transformation de ce type de produit est faible, le problème du recyclage ne se pose pas. L'utilisation de ressources locales (filères courtes) limite les transports et l'origine naturelle des produits réduit l'impact sur la santé. L'objectif du projet P2AR (Paille Anas pour la Réhabilitation), soutenu financièrement par la région Hauts de France, est de développer une solution d'isolation abordable des combles perdus de l'habitat existant dans un secteur où la matière première, bio-sourcée, se trouve à proximité, la zone géographique ciblée est celle de la Flandre française. Le matériau étudié, les anas, est issu du lin qui demeure une culture régionale dont le marché s'appuie principalement sur le textile. Un bâtiment témoin est identifié sur le territoire et fait l'objet d'une réhabilitation de l'isolation de son plancher haut qui est instrumenté pour pouvoir suivre ses performances thermiques. Les matériaux fibreux naturels sont sensibles à la présence d'eau sous forme liquide ou vapeur, que ce soit sous l'angle de la stabilité des performances thermiques ou de la durabilité dans le temps. Ils sont associés à des parois anciennes et à des volumes habités ou non, plus ou moins humides. Il est important de pouvoir connaître leur tenue en conditions de mise en œuvre réelles et leurs performances thermiques par rapport à ce que l'on trouve couramment sur le marché des matériaux isolants pour le bâtiment (Vololonirina et al. 2014 ; Lelievre et al. 2014).

2. ELABORATION DU MATERIAU

2.1. MATERIAU DE BASE

La France est le principal producteur de lin et représente les 2/3 de la production mondiale, les régions concernées sont la Normandie et les Hauts de France. La partie destinée aux textile concerne les étoupes qui sont obtenues après teillage et rouissage. Le rouissage correspond à une période de dessiccation de la tige de lin après fauchage. Le teillage sépare les fibres, les graines et l'écorce qui est broyée et permet d'obtenir les anas de lin (Kozakowski et al. 2012). Ils présentent une structure alvéolaire favorisant l'adsorption de l'humidité, leur pouvoir calorifique est équivalent à celui du bois, c'est pour cette raison qu'ils sont également utilisés comme combustibles. Ce produit n'étant pas noble, il a été très peu étudié en tant que tel mais plutôt en complément de matrice solides d'origine cimentaire. Ceci est dû à la composition hétérogène du produit, qui dépend de son niveau de tri, contenant principalement des brins de paille allant jusqu'à 20 mm de longueur et de un à quelques mm de diamètre, des coquilles de graines, de la poussière... (Figure 1).



Figure 1 : Anas de lin.

2.2. TRANSFORMATION DES ANAS DE LIN

L'objectif ici est de modifier à minima la constitution du matériau tout en garantissant une résistance et une réaction au feu satisfaisantes pour les règles constructives. Solvay s'est associé à ce projet en proposant d'améliorer la durabilité de l'isolant avec une poudre minérale principalement composée de bicarbonate de sodium (plus de 60% de la composition). Ce produit est classé non dangereux par la réglementation CLP 1272/2008 et est utilisé dans l'alimentation, ce qui permet de conserver les caractéristiques naturelles des anas de lin. Pour que la poudre s'intègre le mieux possible au matériau, un protocole de mélange a été établi, la fixation de la poudre aux anas est assurée par un apport d'eau. Les proportions sont les suivantes : 10 kg d'anas, 2.2 kg de poudre minérale et 3 litres d'eau. Le mélange peut être effectué dans un malaxeur à béton pendant dix minutes.

2.3. CARACTERISATION THERMOPHYSIQUE

Afin de bien appréhender le comportement du produit obtenu par le mélange, les caractéristiques thermophysiques sont tout d'abord étudiées en laboratoire. L'hétérogénéité naturelle du produit nécessite de connaître l'influence du tassement et de l'humidité sur ses performances, sachant qu'il sera soumis aux évolutions microclimatiques et à d'éventuelles contraintes mécaniques réduites. Le matériau a été préalablement stocké à la température ambiante de 20°C et à une humidité relative de 50%. Quatre densités sont testées, la plus faible est obtenue par remplissage gravitaire, ensuite le compactage est progressif. Les masses volumiques obtenues sont bien supérieures à celles habituellement observées pour les isolants traditionnels, elles se situent entre 126 kg/m³ et 154 kg/m³, avec une valeur moyenne de 140 kg/m³. En comparaison des produits existants, les laines minérales en vrac ont une densité comprise entre 20 kg/m³ et 80 kg/m³, la ouate de cellulose est soufflée à une densité de 50 kg/m³. La densité élevée des anas de lin est liée à la présence de fines (poussière et adjuvant ignifuge), à la nature des fibres, leur faible taille (de 5 mm à 20 mm avec un diamètre de l'ordre du mm) et de leur forme qui permet un arrangement optimisé. L'avantage est lié à une variation de masse volumique modérée (+20%) sous fortes contraintes mécaniques ce qui laisse présager d'un tassement très limité dans le temps.

2.3.1. Conductivité thermique

Les caractéristiques thermiques sont obtenues à partir de mesures en régime permanent basées sur la méthode fluxmétrique de la norme NF EN 12664. Cette dernière permet d'accéder à la conductivité thermique et à la chaleur volumique équivalente en fonction des conditions limites imposées (Sassine et al. 2017). On constate logiquement que l'évolution de la conductivité thermique est corrélée à celle de la masse volumique du fait de la réduction du volume d'air dans le matériau lié au réarrangement et à la pression. Les valeurs mesurées évoluent entre 0.057 W.m⁻¹.K⁻¹ et 0.065 W.m⁻¹.K⁻¹, ce qui est relativement élevé pour un matériau isolant mais qui peut être compensé par une épaisseur de pose plus importante pour augmenter la résistance thermique. Les mesures ont également été réalisées en fonction de la teneur en eau, étant donné que le matériau mis en œuvre in situ sera soumis aux conditions micro-climatiques environnementales d'un local non chauffé. La teneur en eau massique du matériau varie entre 10% et 25%, ce qui correspond à des conditions d'humidité relative s'étalant de 50% à 95%, c'est-à-dire semblables aux conditions environnementales in situ. La masse volumique du matériau à Hr=50% est de 130 kg/m³. La résistance thermique varie de 0.057 W.m⁻¹.K⁻¹ à 0.075 W.m⁻¹.K⁻¹, ce qui correspond à une augmentation d'environ 30%.

2.3.2. Chaleur spécifique

La chaleur spécifique a été mesurée à partir du même banc de caractérisation, seules les conditions limites sont modifiées. Le principe est de créer un état de déséquilibre thermique entre deux états stables, pendant cette période le système stocke de la chaleur. L'échantillon part d'un état initial au temps t_{ini} (à la température T_{ini}) jusqu'à un état final au temps t_{fin} (à la température T_{fin}), entre ces deux instants, il stocke une quantité de chaleur Q ($J.m^{-2}$), dont on déduit la chaleur massique ou spécifique c ($J.kg^{-1}.K^{-1}$). Les valeurs habituellement observées pour les matériaux isolants se situent entre $1200 J.kg^{-1}.K^{-1}$ et $1600 J.kg^{-1}.K^{-1}$. Dans notre cas, les valeurs varient entre $1380 J.kg^{-1}.K^{-1}$ et $1490 J.kg^{-1}.K^{-1}$ en fonction de la teneur en eau. L'intérêt pour les anas de lin est leur masse volumique bien supérieure à celle des isolants traditionnels, ce qui améliore l'inertie thermique des parois à épaisseur équivalente. La masse de matériau isolant mis en œuvre est environ 3 fois supérieure.

2.3.3. Courbes de sorption

L'utilisation d'un matériau naturel nécessite de connaître son comportement par rapport aux niveaux d'humidité relative ambiante. Le protocole consiste ici à placer l'échantillon dans une enceinte climatique régulée en température et permettant d'imposer des plages d'humidité relative variant entre 0% et 95% (en fonction des caractéristiques techniques de l'enceinte) (NF EN 12571 2013).

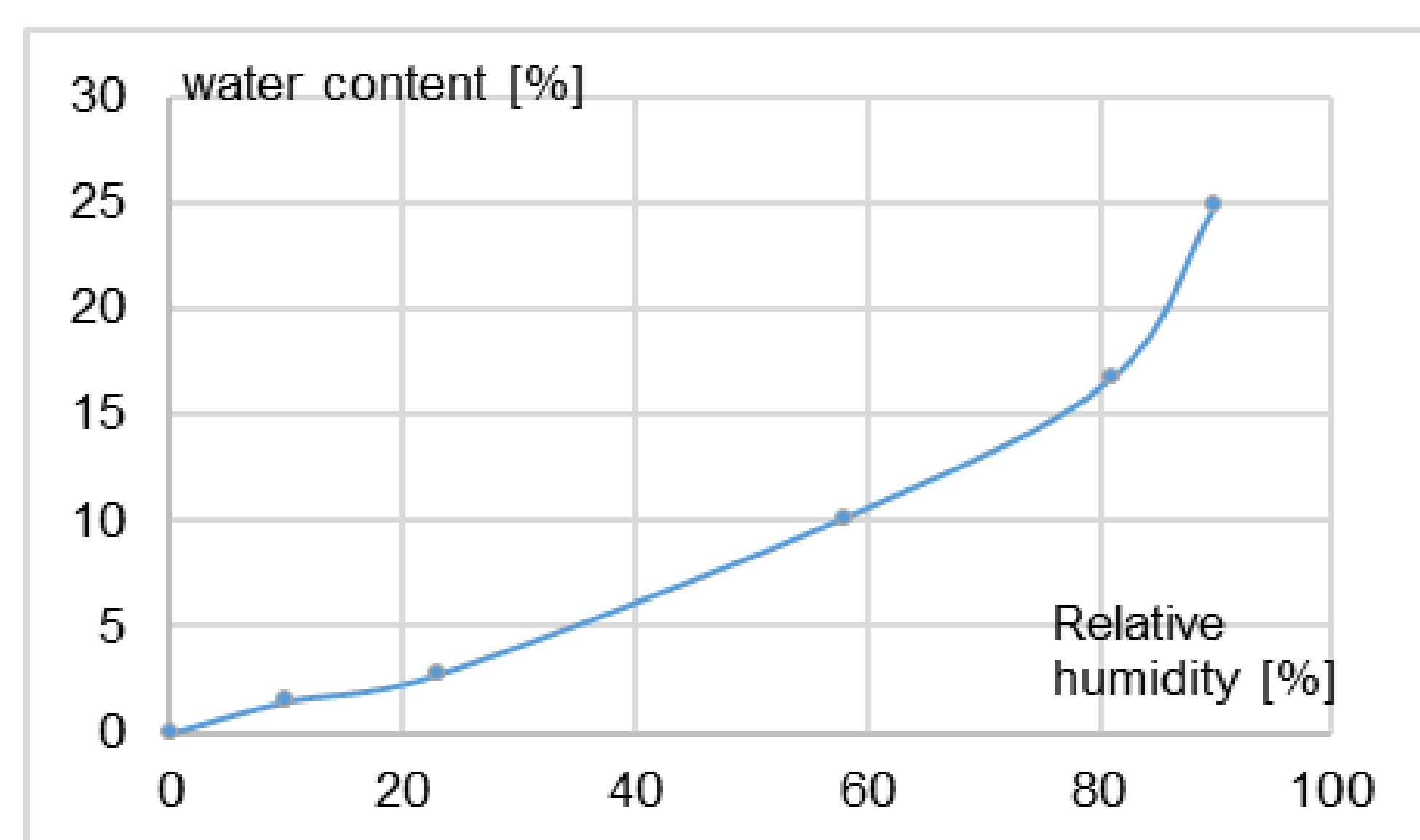


Figure 2 : Courbe de sorption des anas de lin.

Par cette mesure on peut relier les niveaux d'humidité relative ambiante à la teneur en eau massique du matériau ce qui peut permettre de détecter les risques de développement de micro-organismes ou de moisissures. La courbe de sorption (Figure 2) fait apparaître une évolution quasi linéaire de la prise de masse entre 0% et 80% d'humidité relative, avant une dynamique plus prononcée à partir de 80%. Elle met en évidence la capacité du matériau à stocker une quantité importante de vapeur d'eau.

3. MISE EN ŒUVRE ET INSTRUMENTATION

3.1. EXPERIMENTATION

Le démonstrateur est une maison typique des Flandres, en brique traditionnelle, datant de 1610 et ne comportant qu'un seul niveau (rez-de-chaussée). Le toit a une pente de 60° qui permet l'évacuation de pluie fine, les longueurs des façades sont importantes (par rapport aux largeurs) côté sud, pour favoriser les apports gratuits de chaleur et de lumière par les ouvertures. Cette configuration explique l'étroitesse du grenier où sera mis en œuvre le matériau. L'habitation est occupée pendant toute l'expérimentation ce qui permet de tester le matériau en conditions réelles d'utilisation. La forme en vrac du matériau fait qu'il doit être mis en œuvre en comble perdu. Celui-ci fait $75 m^2$, la toiture a été

rénovée récemment et est équipée d'un pare-poussière, une trappe permet d'accéder à ce grenier. Avant la mise en œuvre des anas de lin, le grenier était isolé avec de la laine minérale, celle-ci s'est tassée avec le temps et nous avons pu constater lors de notre intervention une densité importante de micro-fibres en suspension dans l'air, issues de la dégradation de la laine minérale. De plus, la présence de rongeurs au sein de l'isolant et en surface est à noter, de nombreuses niches sont présentes. La Figure 3 montre le grenier avant et après réhabilitation, la dépose de l'ancienne isolation et la pose des anas de lin s'est déroulée sur 2 jours. Les boîtiers électriques et ouvertures dans le plafond ont été protégés pour éviter l'inclusion d'anas. Les rampants en bout de plancher ont été obstrués avec l'ancien isolant pour éviter le déversement d'anas dans les rampants sous toiture.



Figure 3 : Grenier avant et après rénovation.

3.2. INSTRUMENTATION ET MONITORING

L'instrumentation a pour but de suivre le comportement hygrothermique des anas de lin, dépendant des conditions climatiques journalières et saisonnières. Les performances thermiques minimales doivent être assurées et la régulation de l'humidité effective.

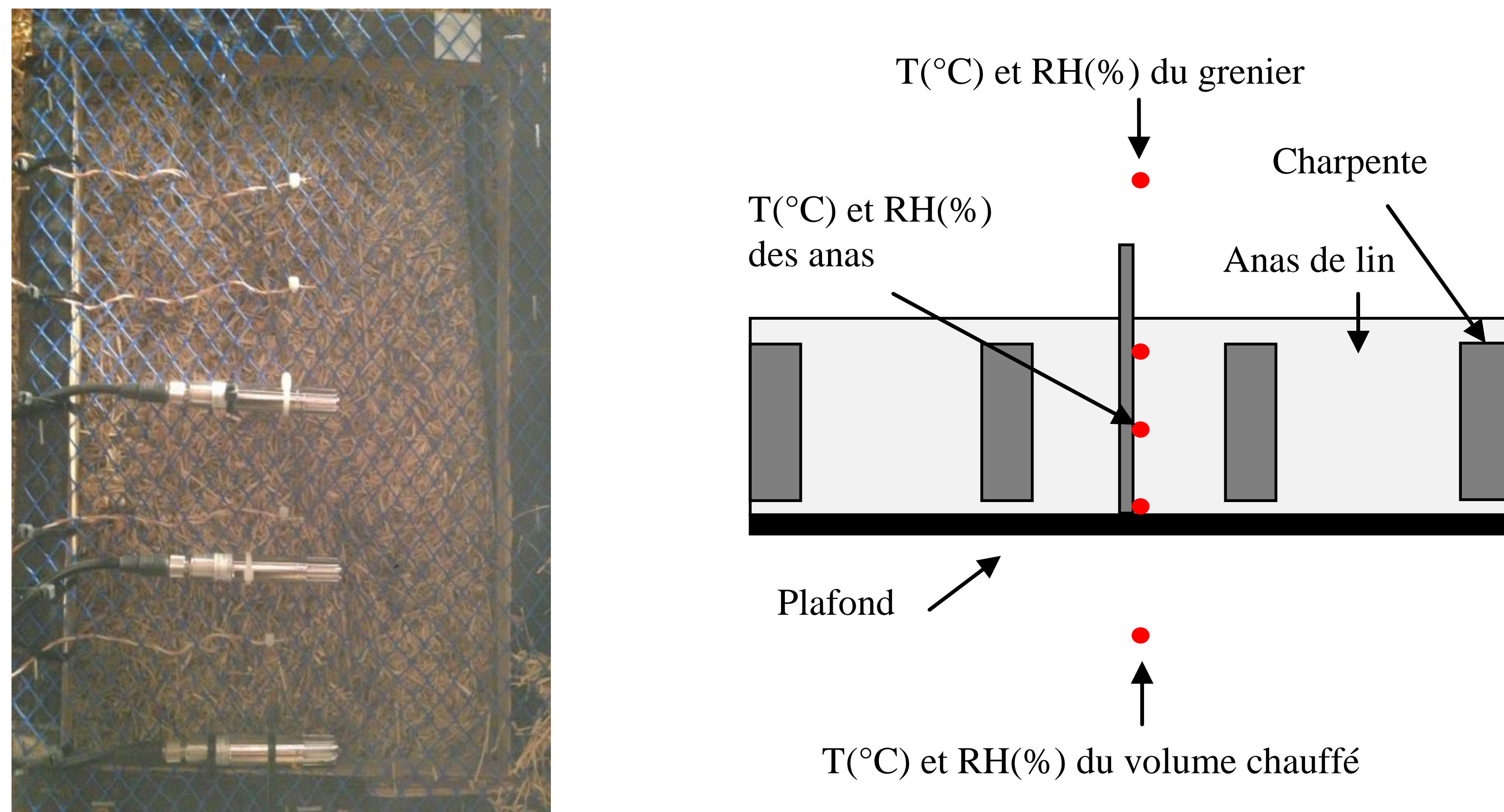


Figure 4 : Mise en place des capteurs.

Les capteurs utilisés sont des thermo-hygromètres (types HMP 110 Vaisala et enregistreurs Easylog EL-USB-2+) et des thermocouples. Les mesures sont réalisées dans les volumes intérieurs chauffés, le grenier et au sein du matériau (Figure 4). Un cadre en bois muni d'un grillage en PVC est

positionné verticalement, il supporte les thermohygromètres placés à intervalles réguliers. Les mailles larges du grillage favorisent le bon arrangement des anas et ne perturbent pas les transferts de chaleur et de vapeur. Les mesures de l'humidité relative ambiante du grenier et de l'intérieur du logement sont également réalisés, les capteurs sont connectés à une centrale d'acquisition, les données sont relevées toutes les 20 minutes pendant 18 mois environ.

4. MESURES IN SITU

Nous analysons les données de température et d'humidité relative entre février et novembre 2016. Pour faciliter la lecture, un zoom est fait sur les mois de février et d'août, représentatifs de conditions hivernales et estivales. Ce sont les périodes représentant les contrastes les plus forts en termes de température et d'humidité relative, des valeurs extrêmes y sont mesurées.

4.1. FEVRIER 2016

Les courbes présentées Figure 5 correspondent à l'humidité relative du grenier, des anas et du volume intérieur chauffé. L'humidité relative du volume intérieur est comprise entre 50% et 60%, ce qui correspond à une ambiance confortable. Les anas de lin en contact avec le plafond sont influencés par la température intérieure. La stabilité de l'humidité relative au sein des anas contraste avec les variations mesurées dans l'atmosphère, elle est liée à l'inertie thermique du matériau où les variations de températures sont faibles. Les valeurs sont également influencées par l'état initial des anas dont la teneur en eau dépend du mélange de départ (plus de 20% de teneur en eau massique). La Figure 5 présente dans l'ordre croissant des températures, les températures du grenier, au sein des anas et du volume intérieur. Les anas de lin permettent de maintenir une température de surface de plafond de l'ordre de 15°C, les amplitudes sont relativement bien amorties par l'isolant. Il est possible d'estimer le déphasage induit par une sollicitation en mesurant le décalage entre le pic de température mesuré en entrée de l'isolant et celui mesuré en sortie, vers l'intérieur du bâtiment, au contact du plafond, il est de l'ordre de 7H30.

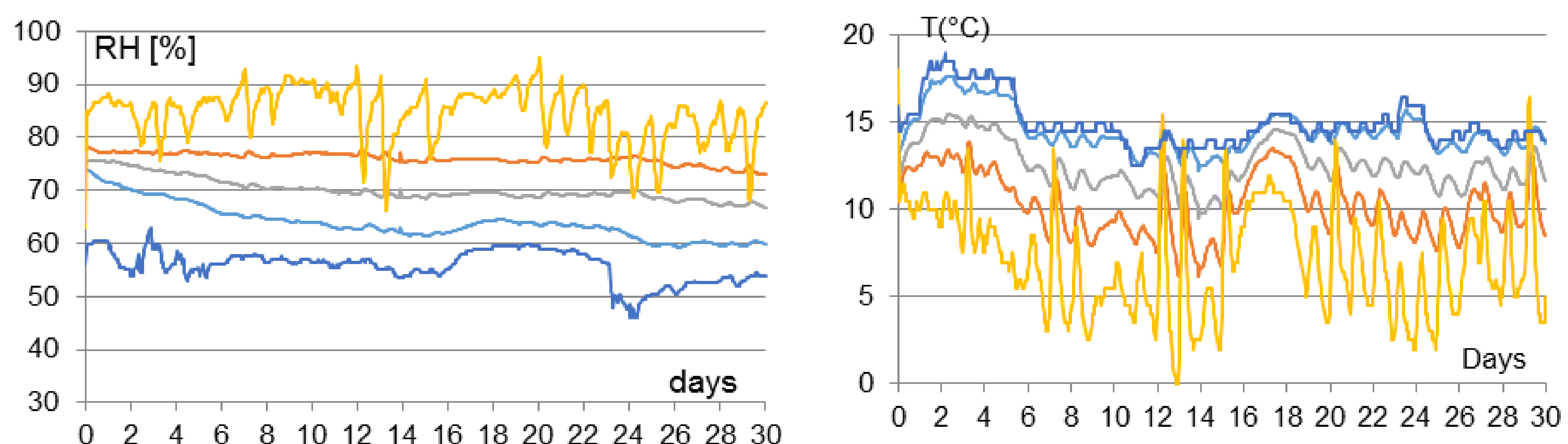


Figure 5 : Relevés d'humidité relative et de températures.

4.2. AOUT 2016

Les températures sont bien plus élevées en été, les niveaux d'humidité relative sont plus bas, les fuseaux sont resserrés entre 50% et 70% d'humidité relative environ (Figure 6). Les niveaux d'humidité relative sont en moyenne de 60% au sein des anas, les valeurs en fonction de la position sont très proches, ceci est dû au faible gradient de température enregistré au sein des anas. Dans le logement, l'activité humaine impacte les évolutions d'humidité relative. Dans le grenier, les amplitudes sont très fortes et corrélées aux variations de températures.

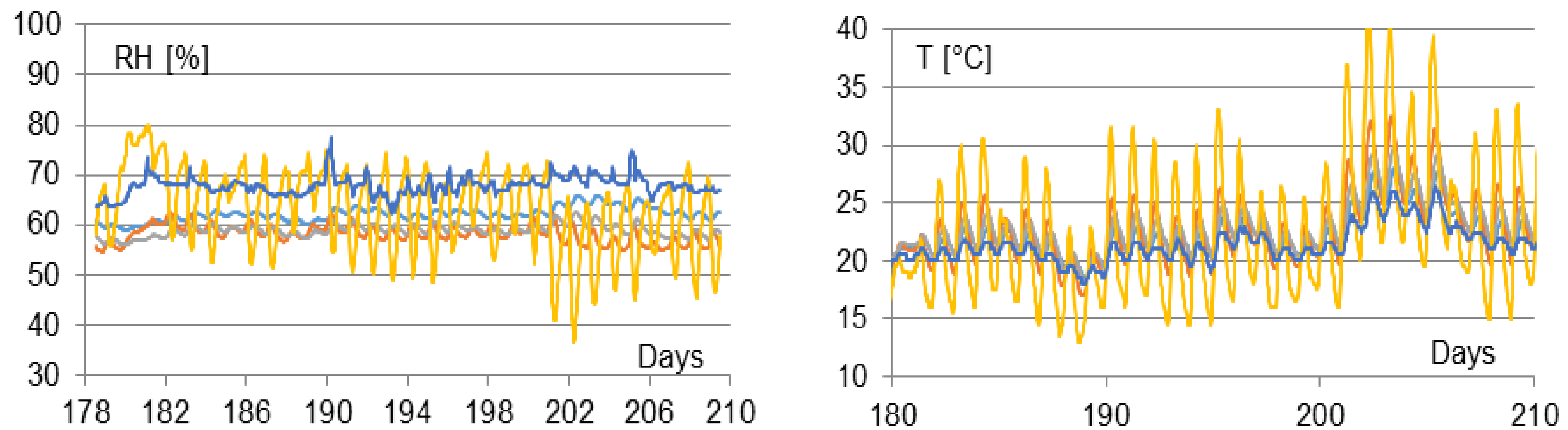


Figure 6 : Relevés d'humidité relative et de températures.

Les amplitudes de températures qui y sont relevées sont proches de 21°C sur 24H lors des journées les plus chaudes, ceci est dû à la faible ventilation de cet espace qui stocke beaucoup de chaleur dans la journée. Les amplitudes observées en partie basse des anas n'exèdent pas 3°C. Les caractéristiques des matériaux évoluant, le déphasage estimé en été est de l'ordre de 7H. Les valeurs d'amortissement et de déphasage observés sont intéressants comparés aux isolants habituels. Les données d'humidité relative révèlent un comportement homogène au-delà de la période de séchage du matériau. Si on fait la corrélation avec la courbe de sorption, à une température supérieure à 20°C, l'humidité relative moyenne mesurée est de 60% ce qui correspond à une teneur en eau massique des anas de l'ordre de 11%, beaucoup plus faible que les 20% de teneur en eau du mélange au départ. Concernant la problématique de perméabilité à l'air, l'isolation en vrac a l'avantage de se mettre en place par gravité sur toute la surface de plancher, les anas comblent les vides sous solives et au niveau des poutres. Par leur densité initiale élevée et leur arrangement, ils sont moins sujets au tassement que les isolants fibreux. Contrairement à ce qu'on pourrait penser, très peu de traces de rongeurs ont été relevées, ceci est lié à la densité du matériau et à sa structure qui est instable lorsque des galeries sont creusées.

5. APPROCHE NUMERIQUE

Le modèle de Philip and De Vries (Philip et al. 1957) a été choisi pour simuler les humidités relatives et les températures au sein du matériau. Ce modèle tient compte des transferts d'humidité sous deux formes, liquide et vapeur. Il considère que le transfert de la phase vapeur est effectué sous un gradient de pression partielle de vapeur et le transfert de masse par capillarité. Le modèle de Philip and De Vries est représenté par l'équation (1) qui décrit les transferts de chaleur et de masse.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \text{div} ((D_{\theta} \nabla \theta) + (D_T \nabla T)) \text{ et } \rho_o c_{pm} \frac{\partial T}{\partial t} = (\lambda \nabla \theta) + \rho_l L_v (D_{T,v} \nabla T) + \rho_l L_v (D_{\theta,v} \nabla \theta) \quad (1)$$

Où θ [kg.kg⁻¹] est la teneur en eau, T la température [K], D_T [m².s⁻¹.K⁻¹] et D_{θ} [m².s⁻¹] sont respectivement les coefficients de transport de masse associés à la température et à la teneur en eau. La modélisation est effectuée à l'aide du logiciel Comsol Multiphysics®, les propriétés thermophysiques introduites dans le modèle ont été préalablement déterminées en laboratoire. L'approche 2D est réalisée avec un maillage de 1mm et un pas de temps de 300s. L'humidité et la température ambiantes mesurées au niveau du grenier et à l'intérieur de la maison ont été utilisées dans la modélisation comme étant les conditions aux limites. Les coefficients d'échanges thermiques sont évalués respectivement à 3 (W.m⁻².K⁻¹) à l'intérieur de la maison et 16 (W.m⁻².K⁻¹) dans le grenier. Il faut noter que la conductivité thermique est dépendante de la teneur en eau, le modèle d'évolution est obtenu à partir d'une approximation polynomiale faite sur les mesures en laboratoire en fonction de la teneur en

eau. Les données issues du modèle ont été comparées avec celles mesurées in-situ et sont représentées Figure 7. La comparaison a été effectuée par rapport aux données d'humidité relative mesurées par les HMP-60 positionnés à 10 cm et 17 cm. Nous remarquons une bonne concordance entre les courbes numériques et expérimentales. Si on prend en considération la mise en œuvre en vrac du matériau et ses éléments constitutifs de formes variées, sa porosité se trouve être aléatoire et difficile à estimer. On peut donc supposer que les caractéristiques intrinsèques du matériau (conductivité thermique, isotherme de sorption) varient de la même façon ce qui peut rendre la modélisation très complexe. Au regard des résultats obtenus, on peut dire que l'écart observé entre les humidités relatives mesurées et simulées est acceptable.

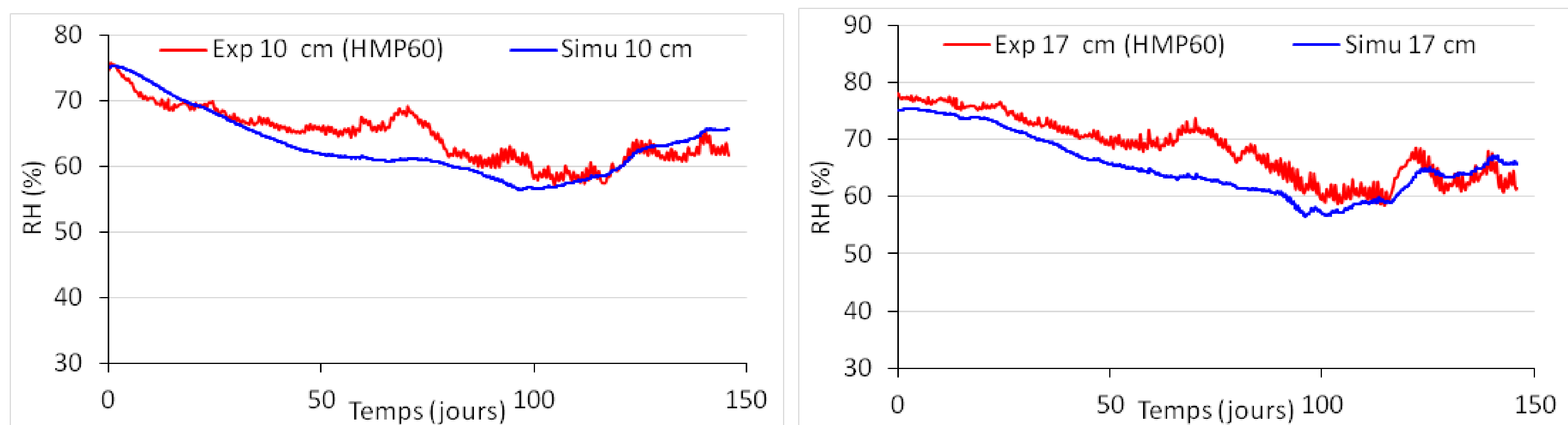


Figure 7 : Humidités relatives mesurées et simulées à 10 cm et 17 cm de profondeur

6. CONCLUSION

Cette opération de recherche sur les isolants thermiques bio-sourcés issus d'une production locale, basée sur des approches en laboratoire et in situ, a permis de mieux connaître les caractéristiques thermiques du matériau élaboré, et son comportement en conditions réelles d'utilisation. Même si les performances thermiques sont moindres comparées à un isolant issu de l'industrie, sa masse volumique relativement élevée permet d'apporter de l'inertie à un plafond léger. La résistance thermique peut être améliorée en augmentant l'épaisseur tout en respectant les règles constructives liées à la mise en œuvre de ce type de paroi. La forme des particules et la forme en vrac permet de combler tous les espaces réduits. Les mesures d'humidité relative ont montré une bonne adaptation aux conditions environnantes, elles sont confirmées par une inspection visuelle qui ne fait apparaître aucune sensation d'humidité présente au sein du matériau qui a vu sa teneur en eau massique divisée par 2 sur 8 mois. La comparaison des mesures expérimentales et simulées a permis de confirmer les évolutions des grandeurs thermophysiques liées aux conditions micro-climatiques in situ.

7. BIBLIOGRAPHIE

- Biswas K., Shrestha S.S., Bhandari M.S., Desjarlais A.O., Insulation materials for commercial buildings in North America: An assessment of lifetime energy and environmental impacts, *Energy Build.*, vol. 112, pp. 256–269, Jan. 2016
- Kozasowski R.M, Mackiewicz-Talarczyk M., Allam A.M, *Handbook of Natural Fibres*, Pages 56-113, 2012.
- Lasvaux S, Achim F., Garat P., Peuportier B., Chevalier J., Habert G., Correlations in Life Cycle Impact Assessment methods (LCIA) and indicators for construction materials: What matters?, *Ecol. Indic.*, vol. 67, pp. 174–182, Aug. 2016

- Lelievre D., Colinart T., Glouannec P., Hygrothermal behavior of bio-based building materials including hysteresis effects: Experimental and numerical analyses, *Energy Build.*, vol. 84, pp. 617–627, Dec. 2014
- NF EN 12664, “Thermal performance of building materials and products. Determination of thermal resistance by means of guarded hot plate and heat flow meter methods. Dry and moist products of medium and low thermal resistance,” pp. 75–225, 2001.
- NF EN ISO 12571 Hygrothermal performance of building materials and products- Determination of hygroscopic sorption properties, 2013
- Philip J. R., De Vries D. A., Moisture Movement in Porous Materials under Temperature Gradients, *Transactions*, American Geophysical Union, pp. 222–232, Apr-1957.
- Sassine E., Younsi Z., Cherif Y., Antczak E., Frequency domain regression method to predict thermal behavior of brick wall of existing buildings, *Applied Thermal Engineering*, Volume 114, Pages 24-35, March 2017.
- Vololonirina O., Coutand M., Perrin B., Characterization of hygrothermal properties of wood-based products – Impact of moisture content and temperature, *Constr. Build. Mater.*, vol. 63, pp. 223–233, Jul. 2014

Développement d'une approche rationnelle par diagnostic thermique des façades pour une réhabilitation optimale d'un bâtiment résidentiel

Hajar BEN HMIDOU*¹, Zaid ROMANI ², Abdeslam DRAOUI ¹

¹ ETTE, Equipe de recherche en Transferts Thermiques et Énergétique (UAE/E14FST), Faculté des Sciences et Techniques de Tanger, Université Abdelmalek Essaâdi, Tétouan, Maroc.

² Ecole Nationale d'Architecture de Tétouan, Maroc.

*hajarbenhmidou@hotmail.fr

RESUME : Au cours de ces dernières années, plusieurs méthodes ont été utilisées pour représenter avec précision l'état énergétique actuel des bâtiments existants en particulier la thermographie infrarouge. A cet égard, ce travail de recherche concerne une étude du diagnostic thermique à l'aide de la thermographie infrarouge afin d'assurer une réhabilitation optimale d'un logement situé à la ville de Tanger au Nord du Maroc. Un protocole expérimental a été mis en place dans le but de localiser les surfaces déperditives du bâtiment étudié. Les différentes températures de surface extérieure des différentes façades de ce bâtiment sont utilisées pour estimer le coefficient de transmission thermique réelle et les résultats obtenus montrent que les valeurs réelles de ce coefficient sont différentes de celles calculées théoriquement. Grâce à ces résultats, les performances énergétiques réelles des bâtiments existants peuvent être estimées à l'aide de la thermographie infrarouge pour une réhabilitation optimale.

MOTS-CLÉS : Thermographie infrarouge, coefficient de transmission thermique, réhabilitation.

ABSTRACT: In recent years, several methods have been used to represent the current state of existing buildings, in particular Infrared thermography. In this regard, this research work concerns a study of thermal inspection of buildings by using Infrared thermography to ensure an optimal rehabilitation of a house located in Tangier, north of Morocco. In order to identify the lossy surfaces of the studied facades, an experimental protocol was carried out. The different temperatures of the exterior surface of the facades are used to estimate the thermal transmission coefficient U and obtained results show that the real values of this coefficient are different to those calculated theoretically. Through these results, the real energy performance of existing buildings can be estimated using infrared thermography for an optimal rehabilitation.

KEYWORDS: infrared thermography, Thermal Transmission Coefficient, rehabilitation.

1. INTRODUCTION

Le bâtiment est le secteur le plus énergivore dans le monde, il représente à lui seul plus de 35% de la consommation d'énergie finale et contribue à hauteur d'un cinquième des émissions de gaz à effet de serre dans le monde (ADEREE Moroccan Agency for the Development of Renewable Energies and Energy Efficiency 2014). Cette consommation énergétique est appelée à augmenter rapidement dans les années futures suite à l'expansion du secteur de bâtiments et aux exigences accrues du confort thermique. Par conséquent, la réduction de cette consommation constitue une priorité.

Au Maroc, le secteur du bâtiment représente 25% de la consommation énergétique totale du pays, dont 18% pour le résidentiel et 7% pour le tertiaire (ADEREE Moroccan Agency for the Development of Renewable Energies and Energy Efficiency 2014). Le poids du logement existant est un élément essentiel dans la politique de réduction de la consommation d'énergie au Maroc du fait que le parc des logements existants est considérable et la plupart de ces bâtiments sont inadaptés et énergivores.

Afin d'obtenir des réductions ambitieuses en consommation énergétique dans le secteur du bâtiment, il paraît nécessaire de représenter avec précision l'état actuel des bâtiments existants et d'améliorer l'efficacité de leurs réhabilitations. Dans ce contexte, la valeur du coefficient de transmission thermique U est devenue un paramètre clé pour évaluer la performance thermique de l'enveloppe du bâtiment en régime permanent. Dans le but de présenter les performances énergétiques réelles des bâtiments existants et de calculer le coefficient de transmission thermique U de l'enveloppe de ces bâtiments, on peut soit modéliser le bâtiment considéré soit opter pour un diagnostic énergétique.

A cet égard, plusieurs études ont été menées sur la prédiction des performances énergétiques en utilisant des outils de simulation tels que EnergyPlus, Ecotect et eQuest (Azar et Menassa 2011)(Turner et Frankel 2008). En revanche, ces performances énergétiques estimées s'écartent généralement des mesures réelles, en raison des nombreuses hypothèses et simplifications qui sont généralement effectuées au cours du processus de la modélisation des bâtiments étudiés.

Actuellement, le diagnostic énergétique à l'aide de la thermographie infrarouge est très utile pour évaluer les performances énergétiques d'un bâtiment. Plusieurs études (Balaras et Argiriou 2002; Albatici et Tonelli 2010; Albatici, Tonelli, et Chiogna 2015; Fokaidés et Kalogirou 2011; Lehmann et al. 2013; Avdelidis et Moropoulou 2004; Dall'O', Sarto, et Panza 2013) ont démontré l'efficacité de la thermographie dans les pratiques du diagnostic énergétique des bâtiments. Balaras et Argiriou (Balaras et Argiriou 2002) ont présenté une revue sur les principaux domaines d'utilisation de la thermographie infrarouge. Dans cette étude, les auteurs ont montré que même si l'utilisation de la caméra thermique peut entraîner une augmentation du temps du diagnostic, elle fournit des informations très utiles sur la performance énergétique de ce dernier.

Albatici et Tonelli et Albatici et al (Albatici et Tonelli 2010)(Albatici, Tonelli, et Chiogna 2015) ont effectué des mesures des températures à l'aide de la thermographie infrarouge depuis l'extérieur des bâtiments, tandis que Fokaidés et Kalogirou (Fokaidés et Kalogirou 2011) ont effectué un diagnostic depuis l'intérieur des bâtiments. Dans ces trois études, les mesures du coefficient de transmission thermique sont effectuées dans des conditions thermiques quasi-permanentes. Cependant, le diagnostic thermique depuis l'extérieur des bâtiments a plusieurs limites par rapport à celui de l'intérieur. D'abord, il est plus sensible aux conditions climatiques extérieures. Ainsi que, de nombreux objets à l'extérieur ayant un état thermique inconnu peuvent être réfléchis sur le bâtiment étudié. Avdelidis et Moropoulou (Avdelidis et Moropoulou 2004) ont présenté une revue bibliographique sur les techniques de mesure de l'émissivité et ils ont indiqué l'importance des valeurs de l'émissivité des surfaces étudiées dans le diagnostic des bâtiments existants.

Dans la présente étude, la thermographie infrarouge est utilisée pour effectuer un diagnostic thermique d'un logement d'hôte situé à la Faculté des Sciences et Techniques de Tanger (FSTT) afin de réduire ses besoins énergétiques et d'augmenter son confort thermique intérieur. Pour cela, on a identifié les pertes de chaleurs à travers l'enveloppe de ce logement en utilisant les images thermiques obtenues de la thermographie. Une méthode inverse a été développée pour estimer la valeur du

coefficient de transmission thermique U de l'enveloppe. Et la valeur ainsi calculée a été ensuite comparée avec celle de la théorie.

2. DESCRIPTION DU LOCAL ETUDIE

Le local étudié est un des deux bâtiments d'hôtes situé à la FST de Tanger. Les deux bâtiments sont juxtaposés et séparés par un mur mitoyen. La composition des parois de ce logement est donnée dans le tableau 1. La façade principale comprend une surface vitrée de 5.161 m².

Matériaux (couches)	Épaisseur (cm)	Conductivité Thermique (W/m.K)	Capacité Thermique (J/kg.K)	Densité kg/m ³
Enduit ciment	1.5	1.15	1000	1700
Brique rouge à 6 trous	7	0.5	741	1200
Lame d'air	10	-	1000	1
Brique rouge à 6 trous	7	0.5	741	1200
Enduit ciment	1.5	1.15	1000	1700

Tableau 1 : Caractéristiques des matériaux constituant les murs extérieurs du bâtiment étudié.

3. MATERIELS ET METHODES UTILISES

3.1. CHOIX DES EQUIPEMENTS DU DIAGNOSTIC THERMIQUE

Une caméra infrarouge est nécessaire pour mesurer quantitativement les valeurs de U in situ au moyen de la thermographie infrarouge. Des thermocouples et des enregistreurs de données hygrothermiques sont nécessaires pour mesurer les conditions environnementales.

Plusieurs chercheurs ont spécifié dans leurs études que les exigences minimales pour une caméra thermique sont liées à la gamme spectrale, à la résolution spatiale, à la plage de température, à la sensibilité thermique et à l'angle d'inclinaison (Fox et al. 2014; Kylili et al. 2014). Pour éviter toute réflexion de la caméra dans les images résultantes, l'angle d'inclinaison doit être au minimum de 5 ° entre la camera et l'objet cible.

Dans ce travail, une caméra infrarouge à haute performance de type Flir E50bx avec une plage de température de fonctionnement comprise entre -20 °C et + 120 °C est utilisée. Concernant les mesures des conditions climatiques, des enregistreurs d'humidité et de température de type Tinytag ULTRA2 qui permettent de mesurer les températures comprises entre -25°C et +85°C et l'humidité relative entre 0 et 95 % ont été exploités.

3.2. MESURE DE LA TEMPERATURE REFLECHIE ET DE L'EMISSIVITE

Avant d'effectuer un diagnostic thermique, la caméra infrarouge doit être étalonnée pour l'élément à étudier. En d'autres termes, la température ambiante réfléchie (T_{Ref}) ainsi que l'émissivité de la surface de l'enveloppe du bâtiment étudié (ϵ) sont nécessaires pour éviter les erreurs de lecture sur les images thermiques obtenues (figure1).

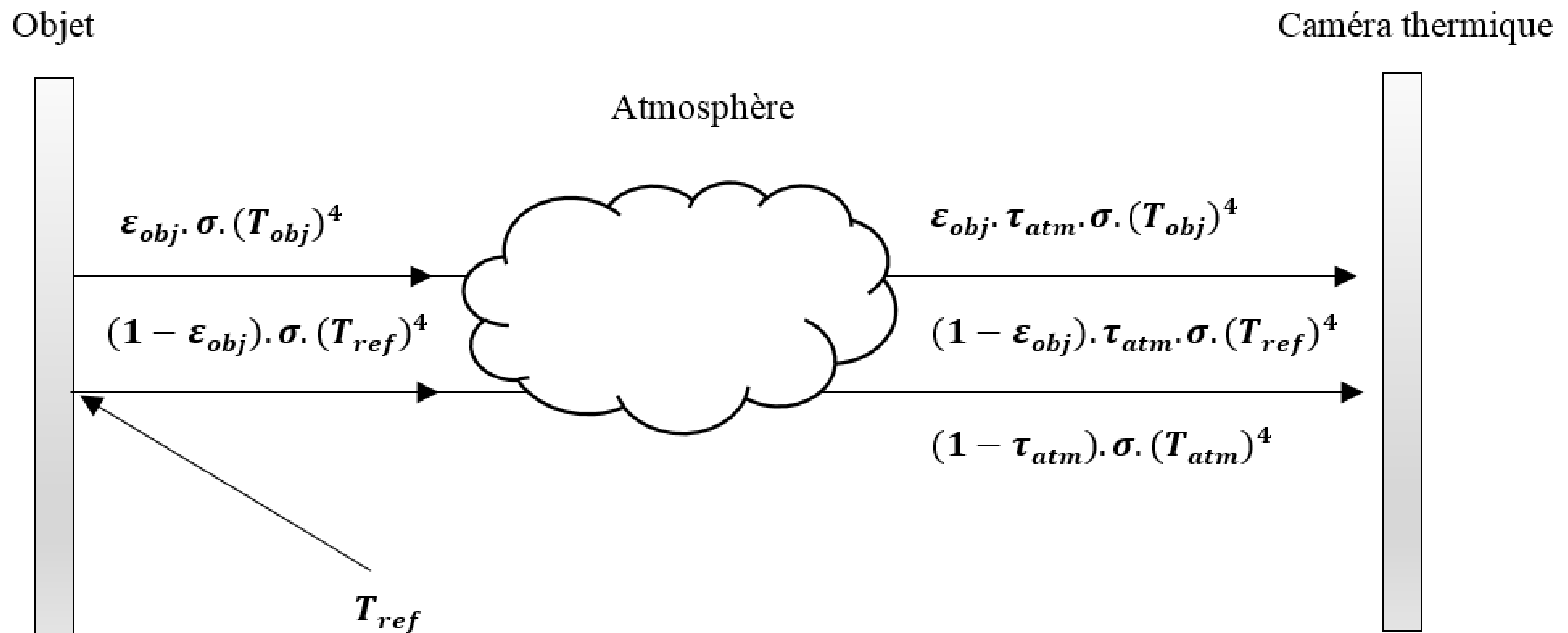


Figure 1 : Schématisation du rayonnement thermique entre l'objet et la caméra thermique

La température réfléchissante peut être mesurée au moyen d'une feuille d'aluminium froissée fixée sur la surface, l'émissivité de la caméra thermique à ce point de mesure est égale à 1. La détermination de la valeur de l'émissivité (ϵ) peut être effectuée selon deux méthodes dont la première est basée sur les valeurs d'émissivité de référence selon le type du matériau et la deuxième consiste à mesurer l'émissivité des surfaces étudiées in situ au moyen d'une source de chaleur. A cet égard, la mesure de l'émissivité du mur est effectuée selon la méthode in situ et ce choix est justifié par la dépendance de l'émissivité des conditions réelles de la surface qui subit de la rugosité, de l'humidité et de la pollution. Cette méthode consiste à déplacer des éléments chauds qui peuvent être utilisés comme une source de chaleur près de la surface du mur, par exemple un fer à souder (avec une température autour de 400K). D'après la loi de conservation d'énergie entre une source d'énergie et un élément opaque (mur) et la loi Kirchhoff, l'émissivité thermique peut être exprimée comme suite :

$$\epsilon = 1 - \frac{\rho \Phi_i}{\Phi_i} \quad (1)$$

Avec ρ et Φ_i sont respectivement le facteur de réflexion et le flux incident.

Le flux de chaleur émis par la source (Φ_i) et le flux réfléchi ($\rho \Phi_i$) sont proportionnels aux gradients de température ($T_s^4 - T_{ext}^4$) et ($T_r^4 - T_{ext}^4$), respectivement. Avec T_s est la température de la source, T_r est la température de l'image réfléchi et T_{ext} est la température d'air extérieure. Alors l'expression de l'émissivité devient comme suite :

$$\epsilon = 1 - \left[\frac{T_r^4 - T_{ext}^4}{T_s^4 - T_{ext}^4} \right] \quad (2)$$

3.3. ESTIMATION DU COEFFICIENT DE TRANSMISSION U DE L'ENVELOPPE DU BATIMENT ETUDIE

Le calcul du coefficient de transmission thermique U à l'aide de la caméra thermique a été effectué en supposant que le transfert de chaleur de l'enveloppe vers la caméra thermique est principalement attribué à la convection thermique Φ_{cv} et au rayonnement Φ_r donné par les équations (3) et (4).

$$\Phi_{cv} = h_{cv,ext} \times S \times (T_{ext,env} - T_{ext,air}) \quad (3)$$

$$\Phi_r = \epsilon \times \sigma \times s \times (T_{ext,env}^4 - T_{reflechie}^4) \quad (4)$$

Le coefficient de transmission thermique U de l'enveloppe du bâtiment est donné comme suit :

$$U = \frac{\Phi_{cv} + \Phi_r}{S(T_i - T_e)} = \frac{h_{cv,ext}(T_{ext,env} - T_{ext,air}) + \varepsilon \times \sigma(T_{ext,env}^4 - T_{reflech}^4)}{(T_i - T_e)} \quad (5)$$

Le coefficient de transfert de chaleur convectif $h_{cv,ext}$ est calculé en utilisant les corrélations de Liu et Harris (Liu et Harris 2015).

3.4. RESULTATS ET DISCUSSIONS

Au moment du diagnostic thermique du bâtiment étudié, la température d'air intérieur était d'environ 22 °C, la température d'air extérieur était de 4 °C (gradient de température de 18 °C) et la vitesse d'air à l'extérieur était d'environ 2.05m/s. Afin d'analyser les images thermiques obtenues, l'échelle des températures a été maintenue à 4-16 °C. Il est à noter qu'un système de chauffage a été installé dans le local 15 jours (360 h) avant le diagnostic afin d'atteindre le régime permanent. Nous avons effectué le diagnostic plusieurs fois, pendant la saison d'hiver, avant le lever du soleil ou le soir après le coucher du soleil pour éviter l'influence du rayonnement solaire. Alors que le bâtiment mitoyen est non chauffé ce qui permet de réaliser une étude comparative entre ces deux bâtiments.

D'après les résultats obtenus du diagnostic énergétique de ce local (Figure 2), on constate que les ponts thermiques dans ce bâtiment sont localisés principalement dans la jonction de deux matériaux à nature différente (Ex : le mur avec la dalle).



Figure 2 : (a) Photos numériques du bâtiment étudié ; (b) images thermiques du bâtiment étudié.

Ce diagnostic nous a permis aussi de visualiser les surfaces déperditives en comparant les images thermiques du bâtiment étudié qui est chauffé et le bâtiment mitoyen qui est non chauffé. Cette étude comparative nous a permis de déterminer les principales surfaces déperditives des façades du bâtiment étudié (figure 3).



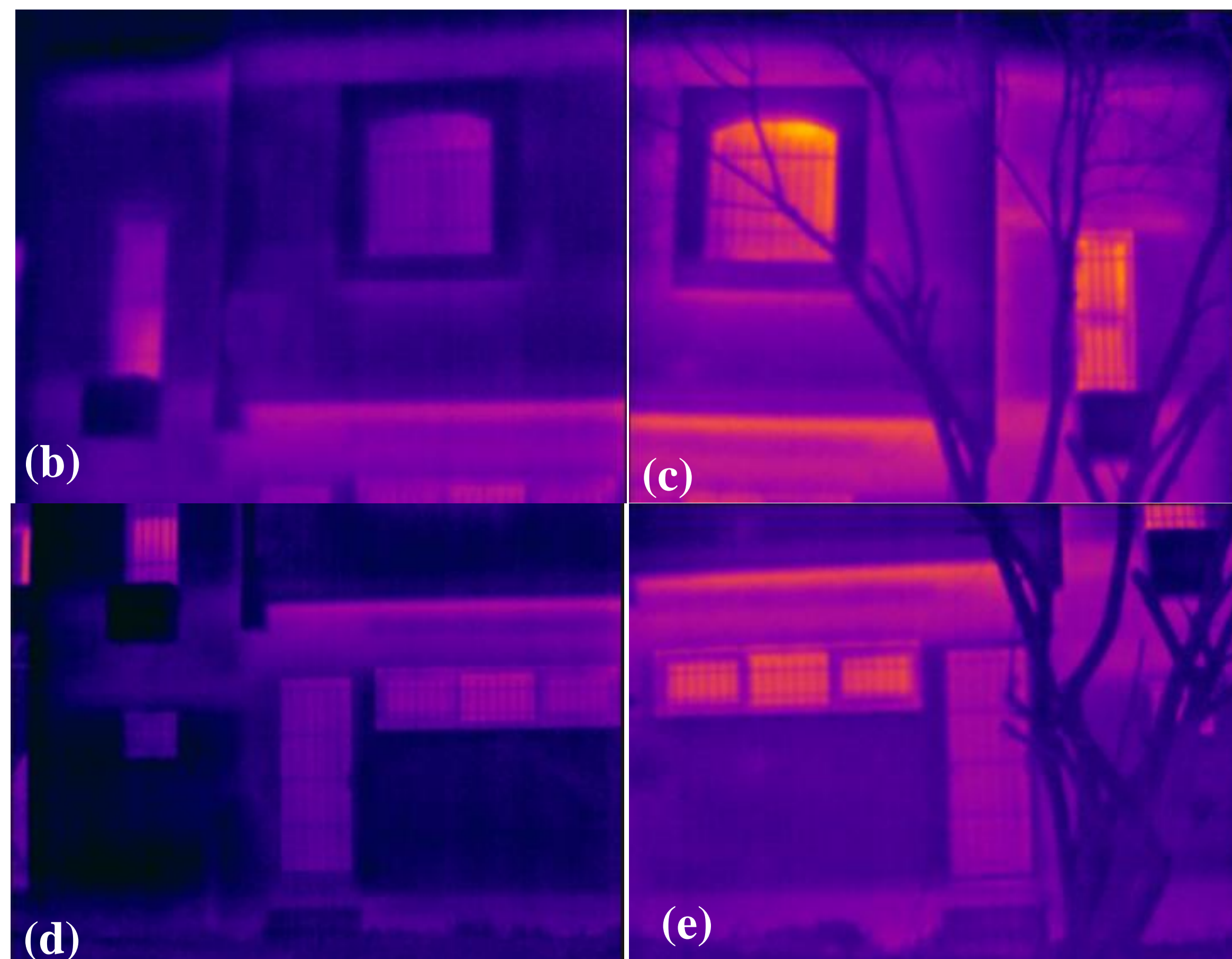


Figure 3 : (a) Image numérique de la deuxième façade des bâtiments d'hôtes ; (b) et (d) images thermique du bâtiment chauffé ; (c) et (e) images thermiques thermique du bâtiment non chauffé.

La température réfléchie a été mesurée au moyen d'une feuille d'aluminium froissée (figure 4) comme cité dans la section 3.2. La mesure in situ de la valeur d'émissivité ϵ de la surface des murs a été effectuée selon la procédure décrite dans la section 3.2 et l'image thermique obtenue est illustrée sur la figure 9. En se basant sur l'image issue de la mesure de l'émissivité in situ, la température de la source (fer à souder) a été égale à 423,2K, la température apparente réfléchie par le mur a été de 296,9K ainsi que la température d'air extérieure a été de 285 K. Finalement, la valeur de l'émissivité thermique est égale à 0,953.

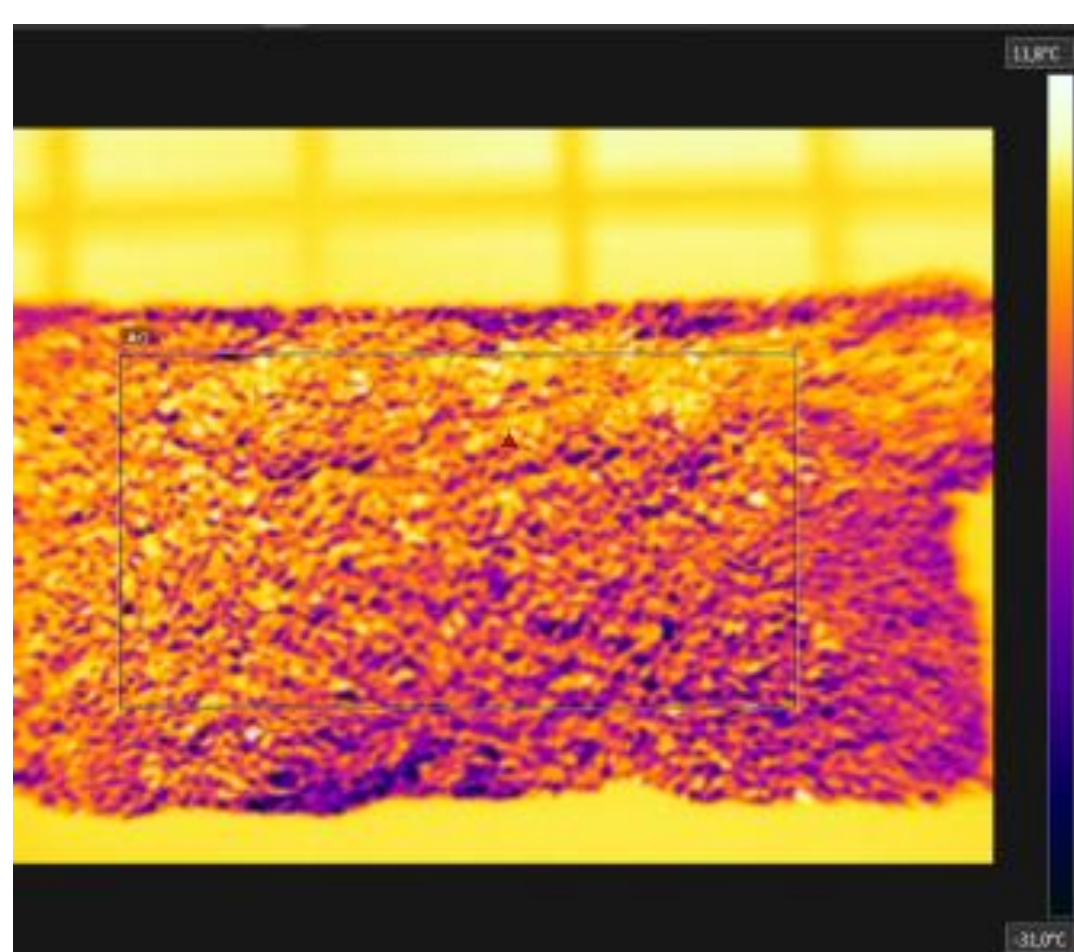


Figure 4 : Image thermique pour la détermination de la température réfléchie.

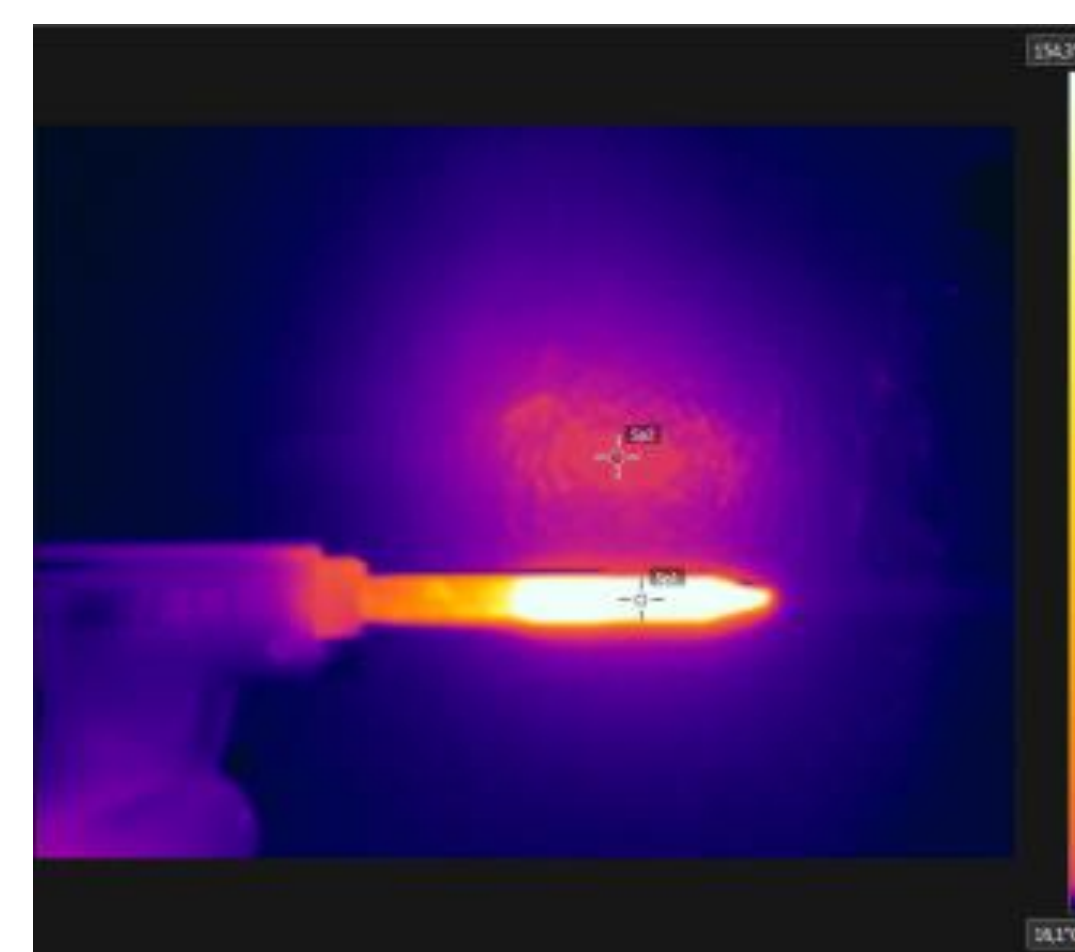
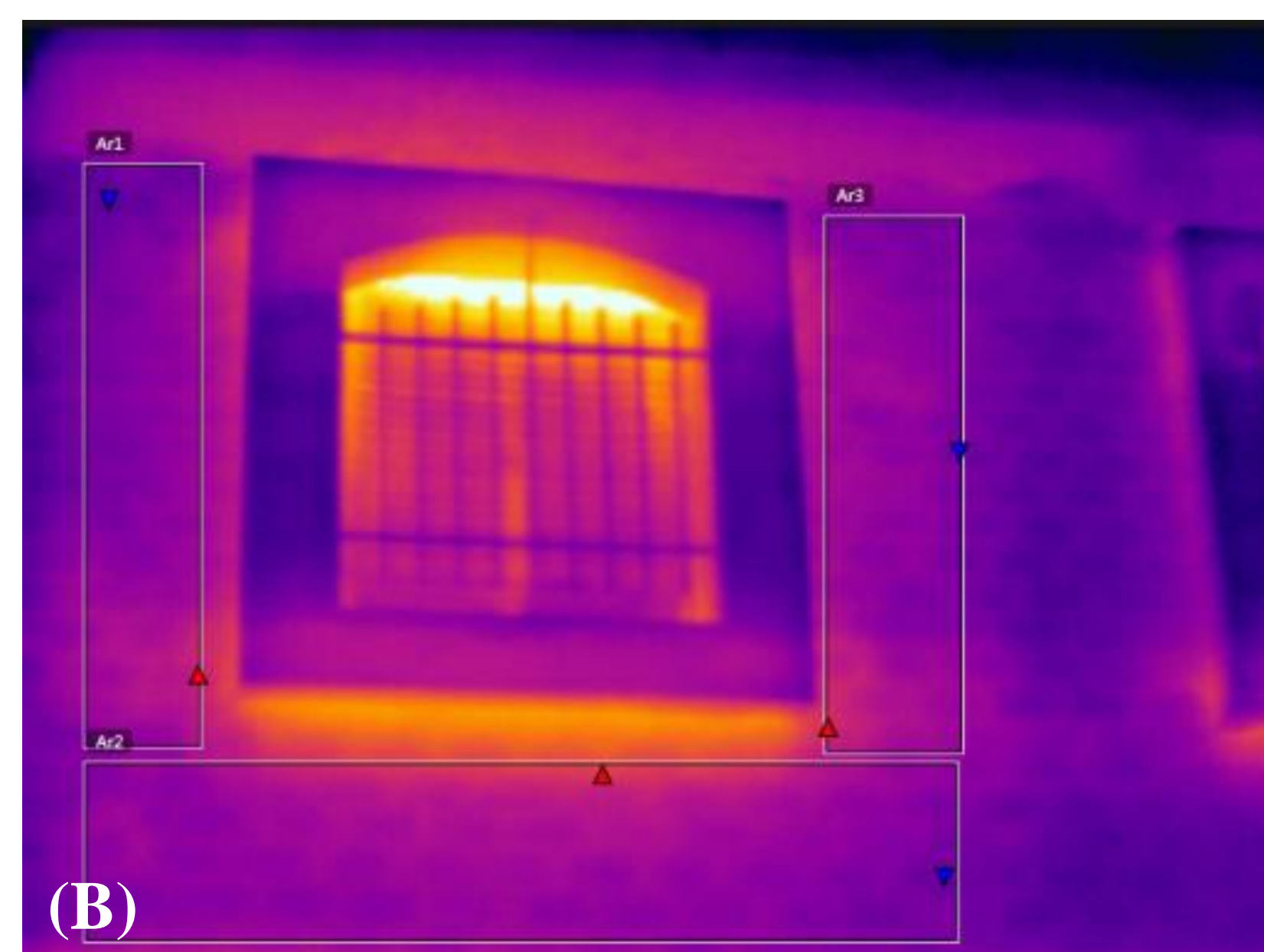


Figure 5 : Image thermique du fer à souder utilisé pour la mesure de l'émissivité.

Comme signalé précédemment, les surfaces déperditives ont été visualisées à l'aide de la caméra infrarouge et sont localisées sur la façade principale et la façade latérale du bâtiment. Sur ces façades, un zonage a été effectué dans le but de calculer le coefficient de transmission thermique (figure 6).



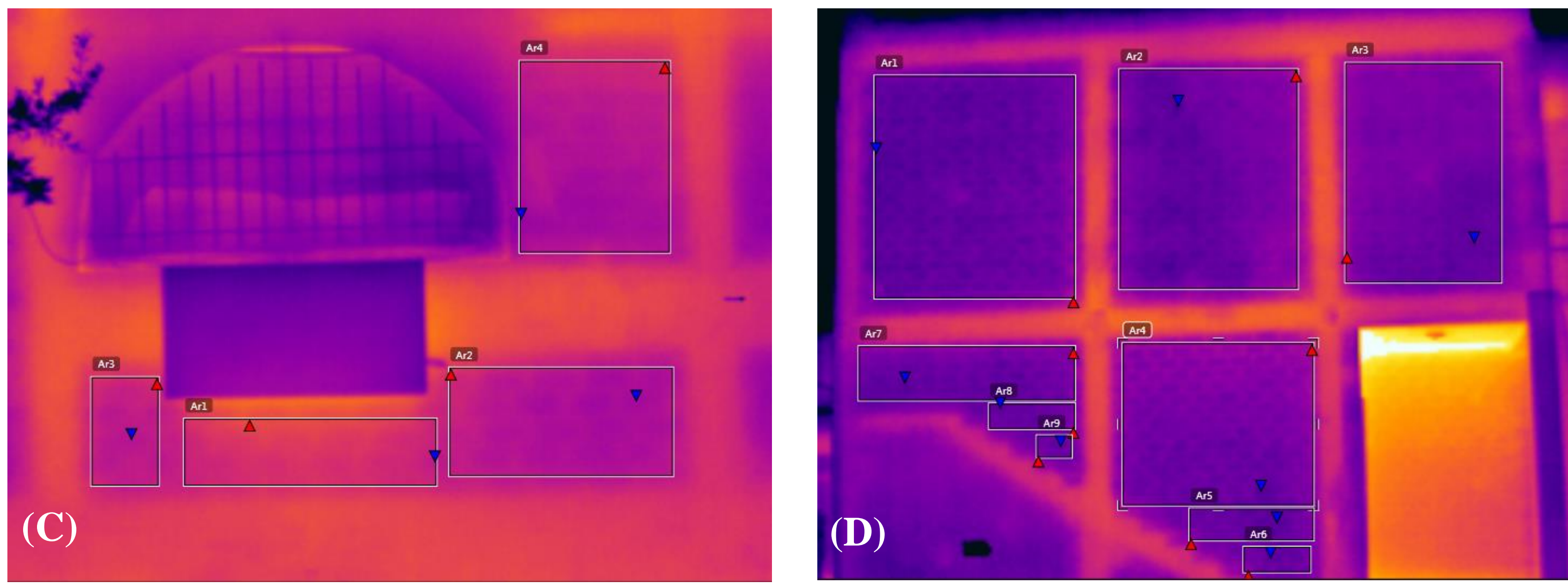


Figure 6 : Images thermiques des zones étudiées des façades principales.

Les résultats obtenus de l'étude comparative entre les coefficients de transmission thermiques (U) mesurés in-situ et ceux calculés théoriquement sont présentés dans le tableau 2. On peut observer que les valeurs du coefficient U mesurées sont supérieures à celles calculées. Ces résultats peuvent être justifiés par la dégradation que subit l'enveloppe du bâtiment dans les phases de la construction et de l'exploitation. Les valeurs maximales du coefficient U sont obtenues dans les zones situées au niveau du premier étage (Zone C) et cela est dû à la proximité de cette zone du sol et l'accumulation de l'air chaud dans les coins.

Façade étudiée	Partie de la façade étudiée	Zones	Température moyenne (°C)	Coefficient U1 mesuré (W/m ² K)	Coefficient U2 mesuré (W/m ² K)	Coefficient U calculé (W/m ² K)
Façade principale	A	Ar1	6.7	2.43	2,73	1.884
		Ar2	6.7	2.43	2,73	1.884
		Ar3	8.6	3.41	3,48	1.884
		Ar4	8.5	3.36	3,37	1.884
		Ar5	8.5	3.36	3,37	1.884
		Ar6	7	2.58	2,73	1.884
	B	Ar1	7.6	2.89	1,77	1.884
		Ar2	7.9	3.05	2,41	1.884
		Ar3	7.7	2.94	1,88	1.884
	C	Ar1	9.2	3.73	3,05	1.884
		Ar2	9.8	4.04	3,37	1.884
		Ar3	8.8	3.52	2,84	1.884
		Ar4	8.8	3.52	2,84	1.884
Façade latérale	D	Ar1	6.2	3.26	3,19	1.884
		Ar2	6.4	3.37	3,41	1.884
		Ar3	6.5	3.42	3,30	1.884
		Ar4	6.6	3.47	3,73	1.884
		Ar5	6.3	3.31	3,09	1.884
		Ar6	6.3	3.31	3,09	1.884
		Ar7	6.4	3.37	3,51	1.884
		Ar8	6.3	3.31	3,19	1.884

Tableau 2 : Comparaison entre les valeurs théorique et mesurée du coefficient de transmission en utilisant la thermographie infrarouge.

4. CONCLUSION

Dans le présent travail, un diagnostic thermique à l'aide de la thermographie infrarouge d'un logement d'hôte situé à la Faculté des Sciences et Technique de Tanger (Maroc) a été effectué. Une analyse visuelle et analytique ont été réalisées sur les façades de ce logement. Les résultats obtenus nous

ont permis de détecter les défauts thermiques potentiels sur ces façade ainsi que de déterminer leurs coefficients de transmission thermique. Une comparaison entre les coefficients U mesurés in situ et ceux calculés analytiquement nous a permis d'identifier les surfaces dégradées. Ces valeurs seront utilisées par la suite pour la modélisation énergétique du bâtiment étudié et pour la proposition des solutions adéquates pour sa réhabilitation.

5. BIBLIOGRAPHIE

- ADEREE Moroccan Agency for the Development of Renewable Energies and Energy Efficiency. 2014. « Règlements thermiques de construction au Maroc ». *Www.Aderee.Ma*, 46.
- Albatici, Rossano, et 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). Elsevier B.V.: 2177-83. doi:10.1016/j.enbuild.2010.07.010.
- Albatici, Rossano, Arnaldo M. Tonelli, et Michela Chiogna. 2015. « A comprehensive experimental approach for the validation of quantitative infrared thermography in the evaluation of building thermal transmittance ». *Applied Energy* 141. Elsevier Ltd: 218-28. doi:10.1016/j.apenergy.2014.12.035.
- Avdelidis, N. P., et A. Moropoulou. 2004. « Applications of infrared thermography for the investigation of historic structures ». *Journal of Cultural Heritage* 5 (1): 119-27. doi:10.1016/j.culher.2003.07.002.
- Azar, Elie, et Cc Menassa. 2011. « Agent-based modeling of occupants and their impact on energy use in commercial buildings ». *Journal of Computing in Civil Engineering* 26 (August): 506-18. doi:10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000158.
- Balaras, C. A., et A. A. Argiriou. 2002. « Infrared thermography for building diagnostics ». *Energy and Buildings* 34 (2): 171-83. doi:10.1016/S0378-7788(01)00105-0.
- Dall'O', Giuliano, Luca Sarto, et Angela Panza. 2013. « Infrared screening of residential buildings for energy audit purposes: Results of a field test ». *Energies* 6 (8): 3859-78. doi:10.3390/en6083859.
- Fokaides, Paris A., et Soteris A. Kalogirou. 2011. « Application of infrared thermography for the determination of the overall heat transfer coefficient (U-Value) in building envelopes ». *Applied Energy* 88 (12). Elsevier Ltd: 4358-65. doi:10.1016/j.apenergy.2011.05.014.
- Fox, Matthew, David Coley, Steve Goodhew, et Pieter De Wilde. 2014. « Thermography methodologies for detecting energy related building defects ». *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 40. Elsevier: 296-310. doi:10.1016/j.rser.2014.07.188.
- Kylili, Angeliki, Paris A. Fokaides, Petros Christou, et Soteris A. Kalogirou. 2014. « Infrared thermography (IRT) applications for building diagnostics: A review ». *Applied Energy* 134. Elsevier Ltd: 531-49. doi:10.1016/j.apenergy.2014.08.005.
- Lehmann, B., K. Ghazi Wakili, Th Frank, B. Vera Collado, et Ch Tanner. 2013. « Effects of individual climatic parameters on the infrared thermography of buildings ». *Applied Energy* 110. Elsevier Ltd: 29-43. doi:10.1016/j.apenergy.2013.03.066.
- Liu, Y, et D. J. Harris. 2015. « Measurements of wind speed and convective coefficient on the external surface of a low-rise building ». *International Journal of Ambient Energy* 36 (5): 225-34. doi:10.1080/01430750.2013.853204.
- Turner, Cathy, et Mark Frankel. 2008. « Energy Performance of LEED® for New Construction Buildings ». *New Buildings Institute*, n° March: 1-46.

Études expérimentales et numériques d'un Micro-Grid : modélisation électrique et thermique pour la création d'un outil de prédiction

Philippe Chauvelon¹, Patrick Glouannec¹, Guillaume Danet¹, Édouard Cereuil², Youran Wang¹, Antoine Houry¹,

¹ Univ. Bretagne-Sud, UMR CNRS 6027, IRDL
rue de saint Maudé, F-56100 Lorient
[*patrick.glouannec@univ-ubs.fr](mailto:patrick.glouannec@univ-ubs.fr)

²Morbihan Energies, Luscanen, CS 32610
56010 Vannes Cedex

RESUME. L'amélioration de l'autoconsommation est une des conditions importantes pour une meilleure intégration des ENR dans les projets de bâtiments. La connexion à un micro-grid est une solution devant permettre d'optimiser les projets, tout en jouant sur la rentabilité et la flexibilité sur des critères globaux tels l'autoconsommation, l'autoproduction ou l'effacement électrique. Un suivi de paramètres du fonctionnement énergétique d'un site est réalisé en continu. L'objectif de l'étude engagée est de disposer d'un outil de prédiction numérique à courts et moyens termes de la production électrique et de la consommation interne du bâtiment en fonction de différents scénarios de fonctionnement. Une démarche de modélisation/simulation du fonctionnement globale a été entreprise sur TRNSYS. L'objectif de la communication est de présenter les modèles actuellement développés et par le biais de confrontation à des mesures de montrer leur pertinence.

MOTS-CLÉS : mesures, simulation numérique, stockage électrique

ABSTRACT. Improvement of direct use of generated electricity is one essential conditions for a best integration of renewable energy in building project. A system connected with a microgrid would allowed the optimization of projects. The actions would base on direct use and self-production rates or evens-out of peak demand by example. It is a tertiary building, equipped with photovoltaic panels and electric storage. Many parameters, witch characterize the energy building's functioning, are continuously acquired. The objective of this present study, is to obtain a numerical predictive tool (short or long terms), of electrical production and internal building consumption for multiple scenarios of operating. Modelling and simulation's procedures of global functioning was performed with TRNSYS software. The main's objective of the present article is to show the current modelling performed, and, by the way of the confrontation of the predictive results with the experimental ones, to prove the pertinence of this modelling.

KEYWORDS: measurement, numerical simulation, electrical storage.

1. INTRODUCTION

La généralisation des systèmes de production d'énergies renouvelables et de l'indépendance énergétique ne pourront se développer que grâce à une meilleure prise en compte de l'autoproduction et de l'autoconsommation. Or, il n'y a pas nécessairement simultanité de la production des énergies renouvelables et de la consommation. Le dimensionnement de l'installation se fait donc généralement en se basant sur le talon de consommation. Le regroupement de consommateurs en un petit réseau (microgrid), la complémentarité des utilisations et l'effet de lissage que cela induit, peut permettre une meilleure adaptation de la consommation à la production (Quenard 2011).

L'amélioration de l'autoconsommation devrait permettre une meilleure intégration des ENR dans les projets de bâtiments. La connexion à un micro-grid est une solution qui doit permettre d'optimiser les projets, tout en agissant sur la rentabilité et la flexibilité, ainsi que sur des critères globaux, tels les taux d'autoconsommation, d'autoproduction ou de l'effacement de pics de consommation électrique (Chabaud, Eynard, et Grieu 2015, 2013).

L'objectif est donc de disposer d'un outil de prédiction du fonctionnement de l'installation en fonction de scénarios météorologiques, d'occupations et de consommations (Craparo, Karatas, et Singham 2017; Schulze et Granado 2010; Maleki et Pourfayaz 2015). À terme, l'objectif serait d'étendre les résultats à de nouveaux projets dans le but d'optimiser le dimensionnement des installations d'ENR et, en particulier, le dimensionnement des batteries électriques.

Dans un premier temps, nous présentons le site et ses caractéristiques techniques, puis nous nous intéressons aux différents modèles utilisés pour simuler le microgrid (production photovoltaïque, stockage et régulation). Enfin, nous nous intéressons à la simulation du comportement thermique du bâtiment.

2. DESCRIPTIF DU MICROGRID.

Le site pilote étudié, situé dans la Morbihan, (Cereuil 2014; Morbihan Energie s. d.) en fonctionnement depuis 2013, est essentiellement composé de bureaux et de salles de réunion (3300 m² sur 2 étages) (Voir Figure 1). Il est équipé de 850 m² de panneaux solaires photovoltaïques en toiture (Figure 2), représentant une puissance nominale installée d'environ 126 kWc.



Figure 1 : Plans du bâtiment rez-de-chaussée et rez-de-jardin.



Figure 2 : Vue aérienne du bâtiment.

Le site possède un système de stockage électrique 'statique', par batteries Lithium-ion, d'une capacité de 56 kWh, ce qui correspond à environ 2 heures d'autonomie de fonctionnement du bâtiment en hiver. La puissance maximale pouvant être délivrée par le stockage est de 100 kW. La structure est également dotée d'un parc de véhicules électriques rechargeables sur site. Dès sa conception, le site a été instrumenté afin de suivre en temps réel l'ensemble du fonctionnement sur les aspects électriques et thermiques.

Construit en ossature mixte bois béton, isolation extérieure renforcée et triple vitrage, le bâtiment est labellisé « Passivhaus ». La consommation annoncée lors de la pré-étude du bâtiment est inférieure à 15 kWh m².an⁻¹, et une consommation totale en énergie primaire inférieure à 120 kWh m².an⁻¹. Le chauffage des locaux est assuré par deux PAC, qui fonctionnent alternativement, de puissance 'en chaud' de 80 kW environ chacune, associées à de la géothermie (24 puits, de 100m de profondeur). Les bureaux et les salles de réunion sont chauffés à l'aide de panneaux rayonnants alimentés par quatre boucles d'eau chaude. Les espaces de circulation, les sanitaires et les vestiaires sont chauffés par une boucle d'eau chaude alimentant des radiateurs.

3. SIMULATION DE LA PRODUCTION PV ET DU STOCKAGE

La modélisation a été développée sur TRNSYS 18 ®. Le champ solaire PV et les onduleurs sont modélisés par l'intermédiaire du type 'Photovoltaic Panels with MPPT no inverter' (Type 190c). Le système de stockage est modélisé par l'intermédiaire du Type 47, modèle de batterie Plomb-Acide, à défaut d'avoir un modèle Ion-Lithium disponible dans la bibliothèque de TRNSYS. La régulation du système se fait par l'intermédiaire de la GTB, Modélisée actuellement par le Type 48c, un nouveau modèle sera à créer afin de tenir compte des précédentes remarques (Houssamo 2012).

- Période hivernale

Les résultats de simulation (pas de temps de 5 minutes) sont confrontés à l'expérimentation pour une période hivernale. Les données météorologiques et la consommation électrique de l'ensemble du site constituent les entrées du modèle. Les sorties du modèle sont la production des panneaux photovoltaïques, l'énergie stockée ou déstockée dans les batteries, ainsi que l'énergie soutirée ou injectée sur le réseau.

Sur la période observée, le mode d'utilisation du bâtiment est « priorité autoconsommation ». Dans un premier temps, l'énergie solaire photovoltaïque sert à couvrir les consommations du bâtiment et le surplus d'énergie, s'il existe, est envoyé vers le stockage puis injecté sur le réseau si le stockage est plein.

Nous observons sur la Figure 3 que l'évolution de la production photovoltaïque simulée sur la période étudiée suit bien les valeurs expérimentales. La production photovoltaïque simulée est de 1154 kWh sur la période et la valeur expérimentale est de 1143 kWh, soit un écart de moins de 2%. La Figure 4 donne l'évolution des puissances stockées ou déstockées par les batteries électriques sur une journée de fonctionnement. Nous constatons une bonne adéquation de l'évolution temporelle, malgré la différence technologique, entre le modèle (batterie Acide/Plomb) et l'expérimental (batterie Ion/Lithium).

Sur la période étudiée la quantité d'énergie stockée simulée est de 138 kWh contre 140 kWh pour la donnée réelle. En ce qui concerne l'énergie déstockée, nous trouvons une valeur de 130 kWh pour

la modélisation (soit 95% de l'énergie stockée), contre 92 kWh pour la valeur expérimentale (soit 65% de l'énergie stockée).

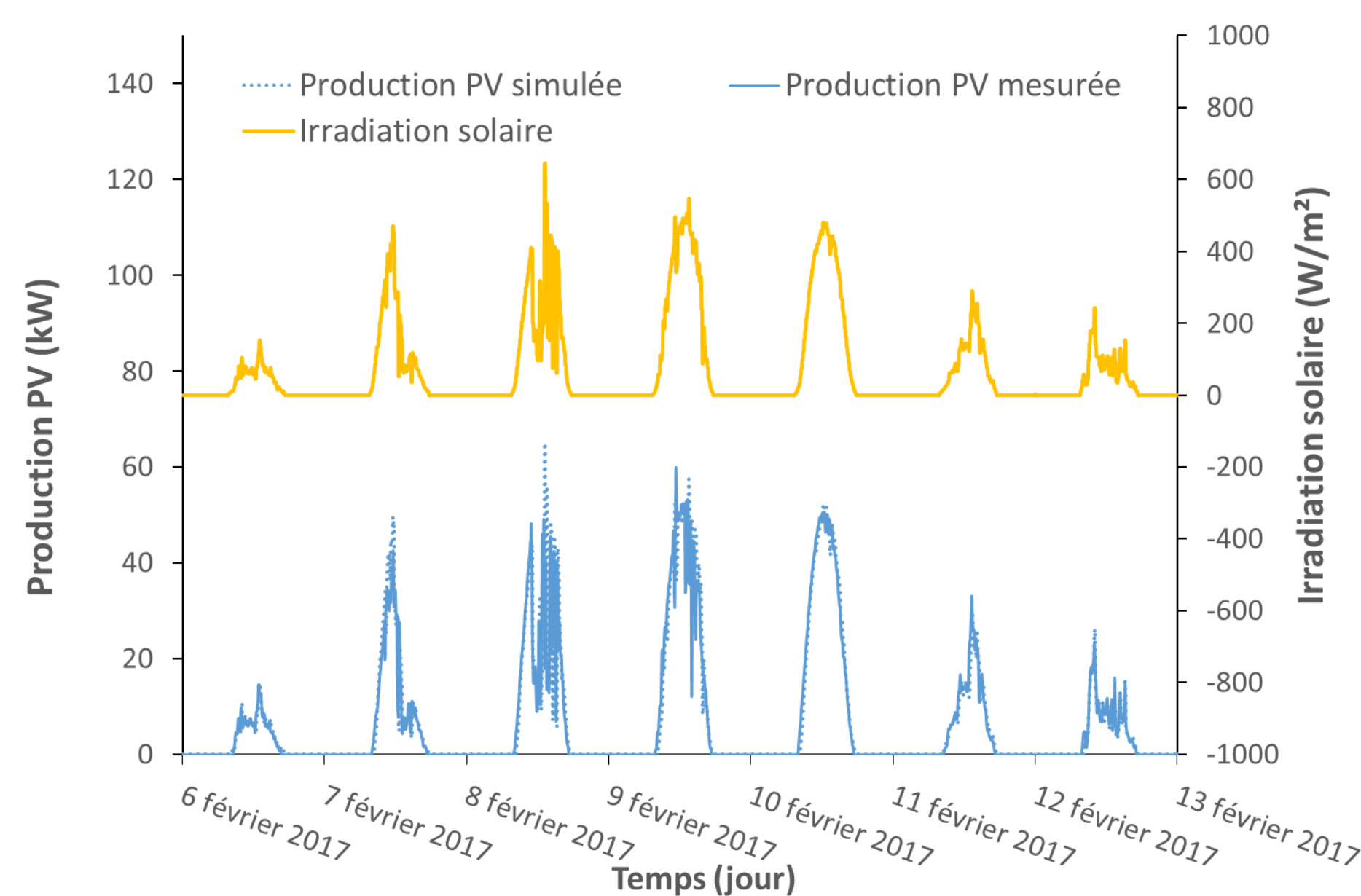


Figure 3 : Production PV

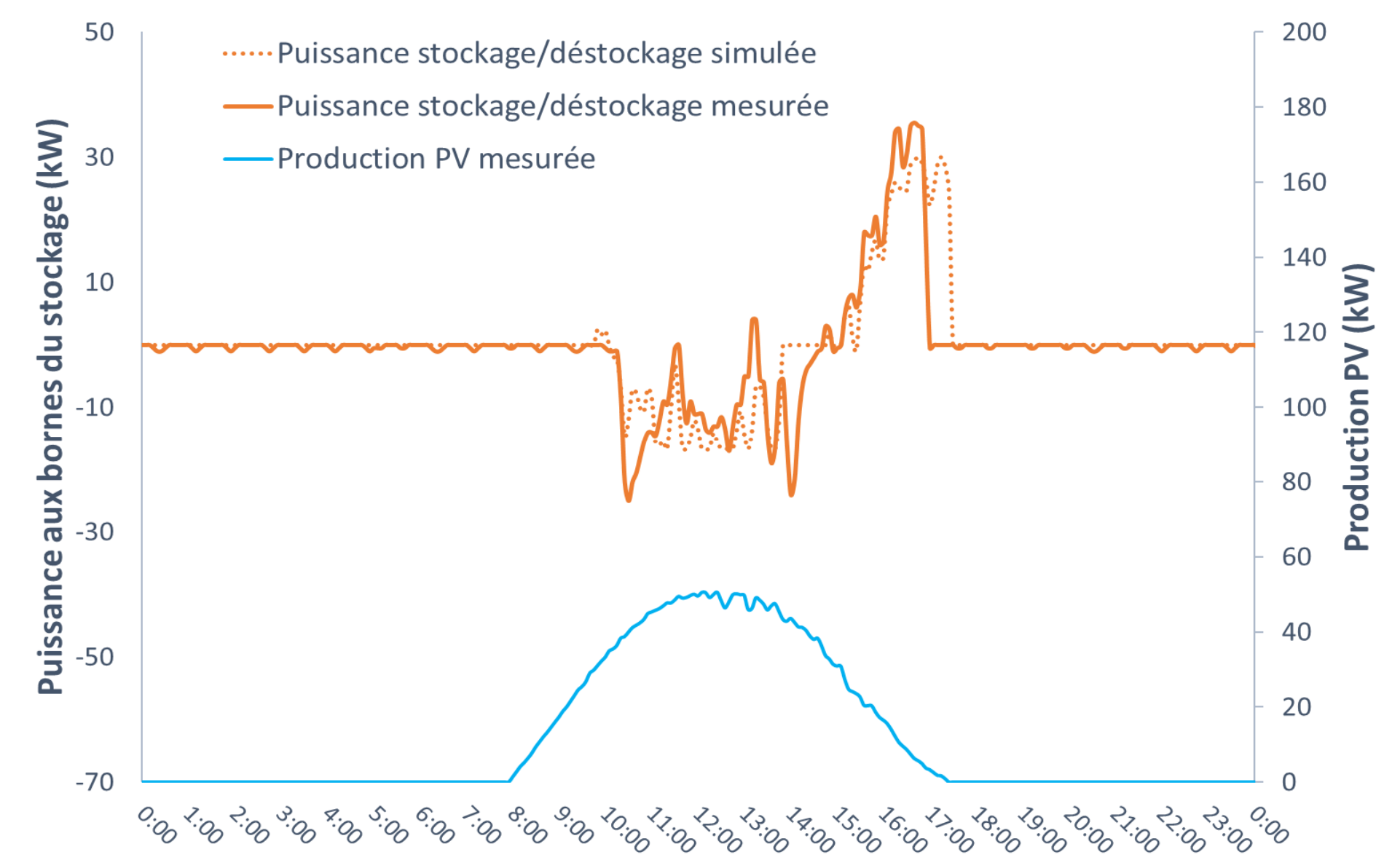


Figure 4 : Puissances aux bornes du stockage et production PV sur la journée du 10/02

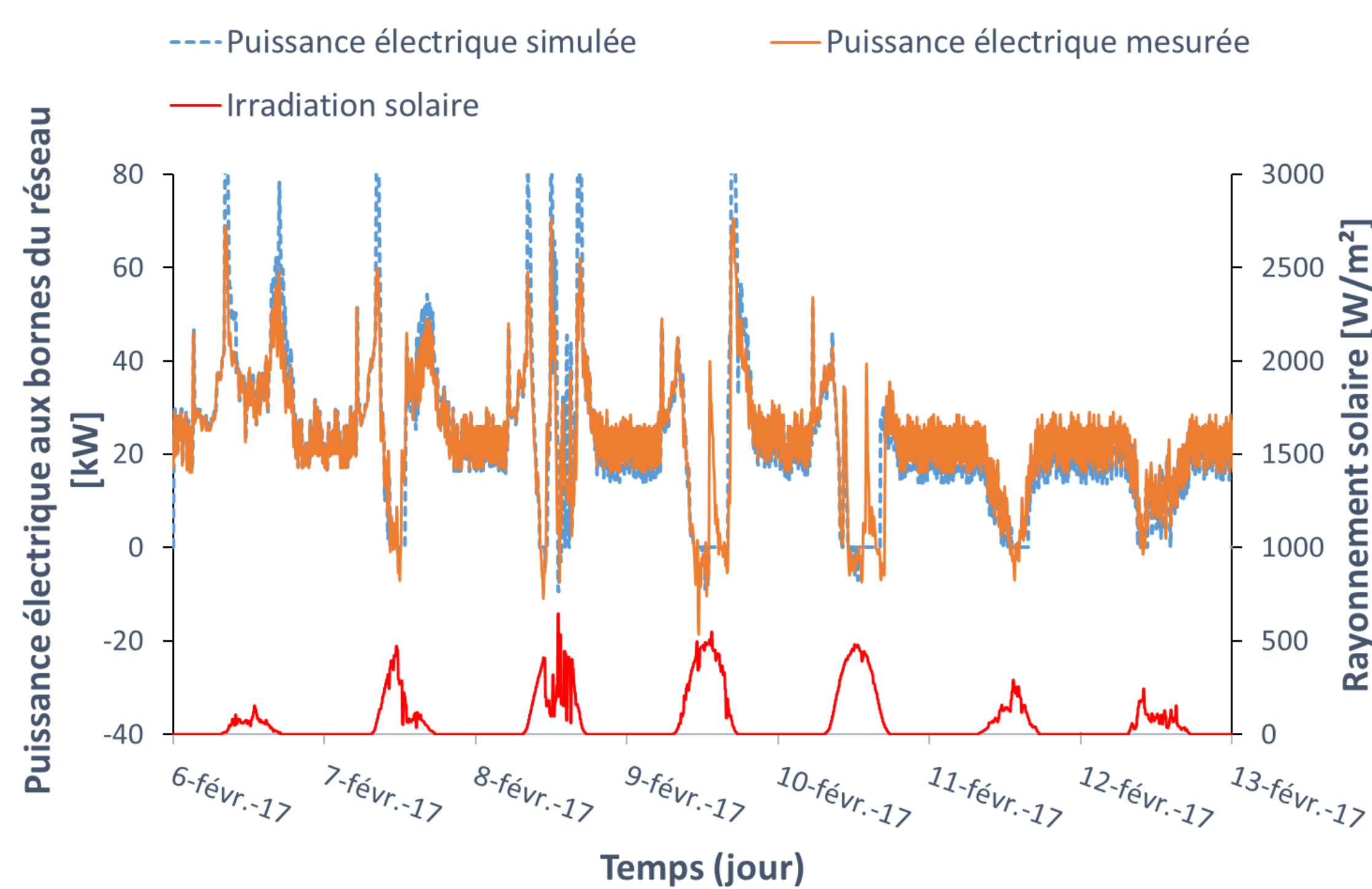


Figure 5 : Évolution de la puissance électrique échangée avec le réseau et irradiation solaire

La Figure 5 présente l'évolution de la puissance électrique échangée entre le réseau électrique et le micro-grid. Une puissance positive indique un soutirage du réseau et une puissance négative indique que l'on injecte de l'énergie vers le réseau. Sur ce graphique est également reporté les valeurs du rayonnement solaire afin de bien faire apparaître le cycle journalier.

La puissance soutirée simulée est de 3645 kWh contre 3922 kWh pour la valeur expérimentale soit un écart d'environ 7%. La puissance injectée dans le réseau s'élève à 12 kWh pour la partie simulée, contre 43 kWh pour la valeur expérimentale ce qui représente moins de 1% de la puissance soutirée. L'ensemble de ces résultats montre la pertinence du modèle pour le mode d'utilisation « priorité autoconsommation ». Il est à noter que la partie solaire couvre 24 % des besoins énergétiques sur cette période hivernale.

- Période estivale

La figure 6 présente les données simulées et mesurées pour la puissance électrique échangée par les batteries électriques, sur deux jours pour plus de lisibilité des courbes.

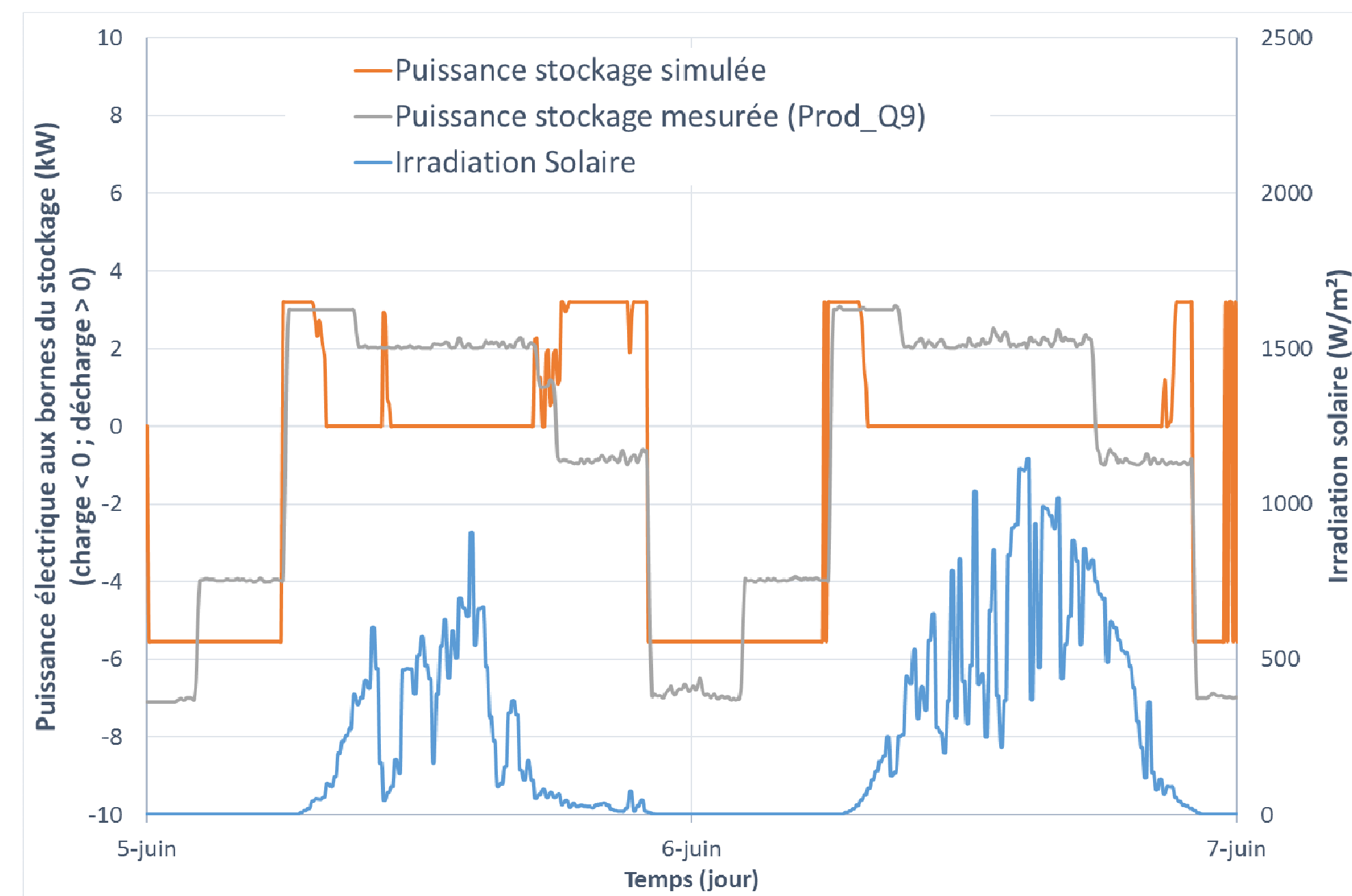


Figure 6 : Visualisation de 2 journées estivales pour le stockage

Comme il apparaît sur la figure 6, la confrontation simulation/mesure sur cette période estivale est à affiner. En effet, la régulation globale du système qui se fait par l'intermédiaire d'une GTB, autorise 11 configurations possibles (effacement, autoconsommation, revente, etc...). Ainsi, durant la période estivale simulée, le système était en mode « propriétaire ». L'élément issu de la bibliothèque TRNSYS ne peut pas prendre en charge cette configuration. Un nouveau type d'élément devra donc être créé.

4. SIMULATION DE LA REPONSE THERMIQUE DES ZONES ETUDIEES.

4.1. PARTIE DU BATIMENT ETUDIEE

L'objectif est de disposer, à la fin de l'étude, d'un outil de prédiction de la courbe de charge du système (Chabaud, Eynard, et Grieu 2013; Asadi et al. 2012a, 2012b).

Dans le cadre de cette communication, nous présentons l'étude d'une partie du bâtiment. La zone étudiée (cf. figure 7) est située dans l'aile Est du bâtiment en rez-de-jardin. Nous avons retenu 3 zones dans notre modélisation sur TRNSYS, la zone A, avec une façade orientée plein-est, composée de bureaux et salle de réunion (311 m², de surface), une zone (B) de circulation (161 m²), et la zone C, avec une façade orientée plein-ouest, composée de bureaux et de sanitaires, (311 m²). La superficie totale de ces zones est de 783m². Les parois vitrées de ces zones sont du triple vitrage ($U_w=1.09 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$) et les murs sont composés de béton lourd et d'une isolation par l'extérieur ($U_{mur}=0.355 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$).

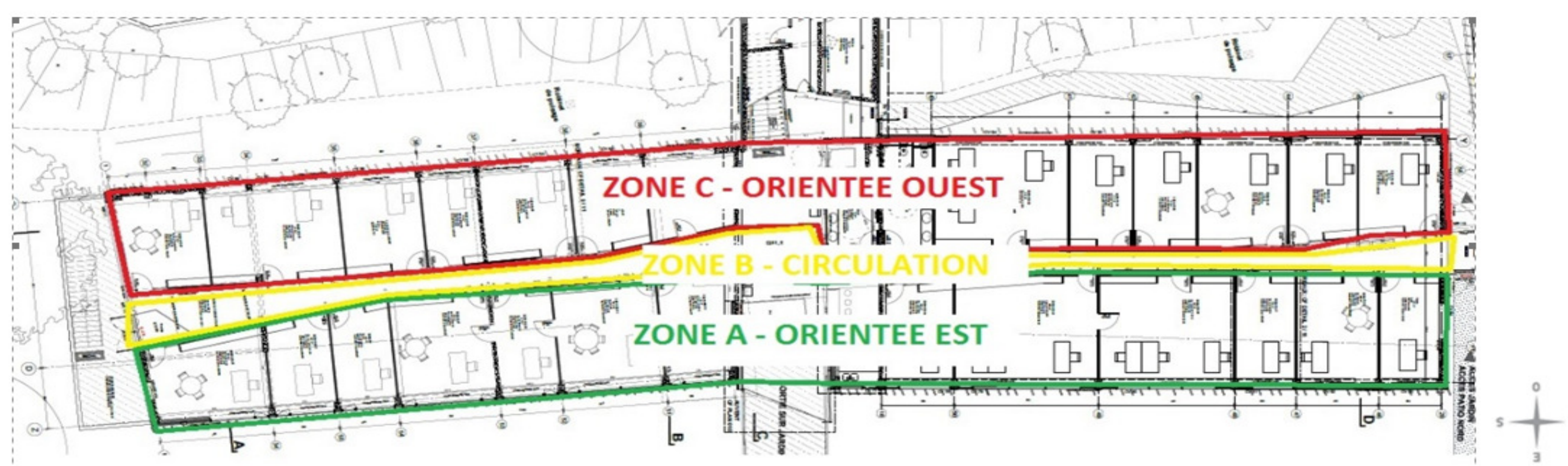


Figure 7 : Partie du bâtiment utilisée pour l'étude thermique et zonage.

Lors de la modélisation, nous prenons comme condition aux limites des transferts thermiques entre le plafond et la température moyenne dans l'étage supérieur (pour la partie qui n'est pas en contact avec l'extérieur), et la température extérieure sinon. Pour la dalle, sur terre-plein avec une isolation

complémentaire, nous utilisons une température de sol calculée par le Type 77 de TRNSYS ('Simple Ground Temperature'). La température du ciel est, elle, estimée par l'intermédiaire du Type 69b. Les apports solaires sont calculés par le modèle de bâtiment de TRNSYS (Type 56).

Une instrumentation complémentaire a été installée sur le site, par le laboratoire, afin d'avoir une meilleure connaissance des données d'entrée du modèle (conditions climatiques, fonctionnement CTA), et des sorties (température d'air). Des capteurs de température et d'humidité, ont été implantés dans des pièces non instrumentées afin d'avoir une connaissance plus précise du comportement du bâtiment, ou dans des locaux déjà instrumentés afin de pouvoir recouper ces résultats avec ceux donnés par l'instrumentation originelle du site (cf. Figure 8).

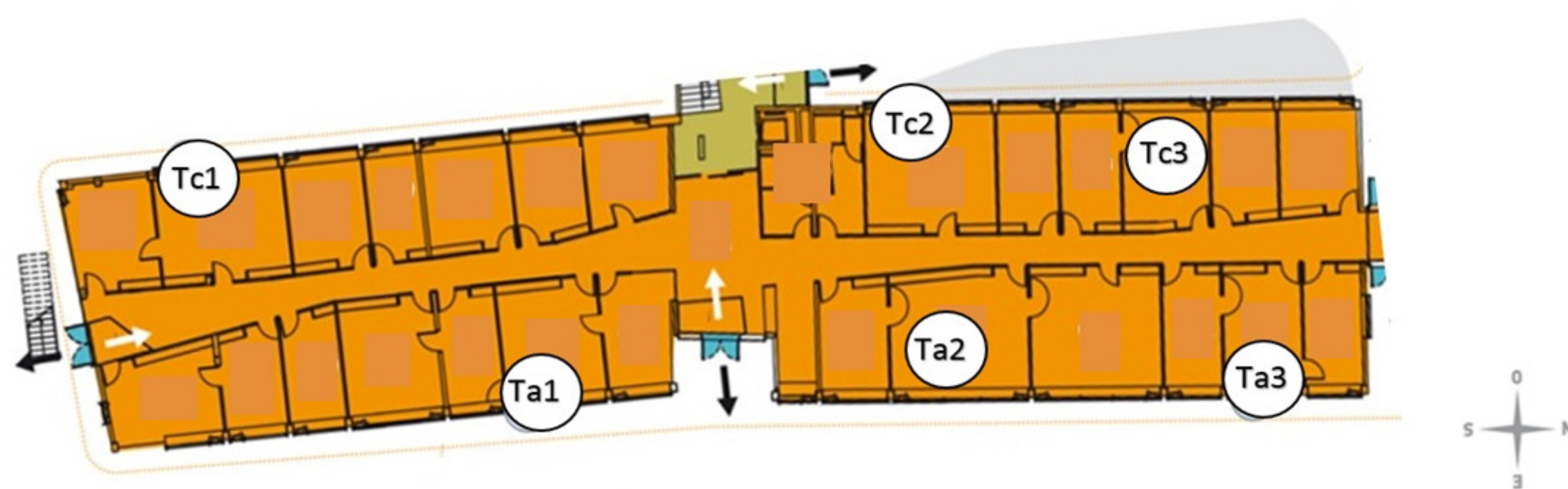


Figure 8 : Emplacement des capteurs de température dans les zones A et C.

Certaines mesures concernent tout le bâtiment ou pour bien une zone de celui-ci : température d'air, soufflage et reprise CTA, boucles de chauffage. Pour estimer la puissance thermique ainsi que le débit d'air, entrant dans la partie du bâtiment étudiée, nous avons pris des ratios au prorata des surfaces au sol, internes. Les débits d'air de ventilation dans chaque zone sont la somme des débits d'air nominaux réglementaires de chaque pièce en fonction de leur utilisation.

La valeur de la puissance de chauffage injectée, les débits d'air, les conditions météo, ainsi que les apports gratuits internes (éclairage des pièces, occupation, équipements électriques, ...) constituent les variables d'entrée de notre modèle (cf. figures 9 et 10). La puissance électrique des équipements et de l'éclairage est entièrement restituée sous forme d'apport interne de chaleur. En sortie de modélisation nous obtenons les températures des locaux. Précisons que l'usage des ratios des débits nominaux de chaque pièce, fixés par le bureau d'études lors de la pré-étude n'a pas d'incidence notables sur les résultats.

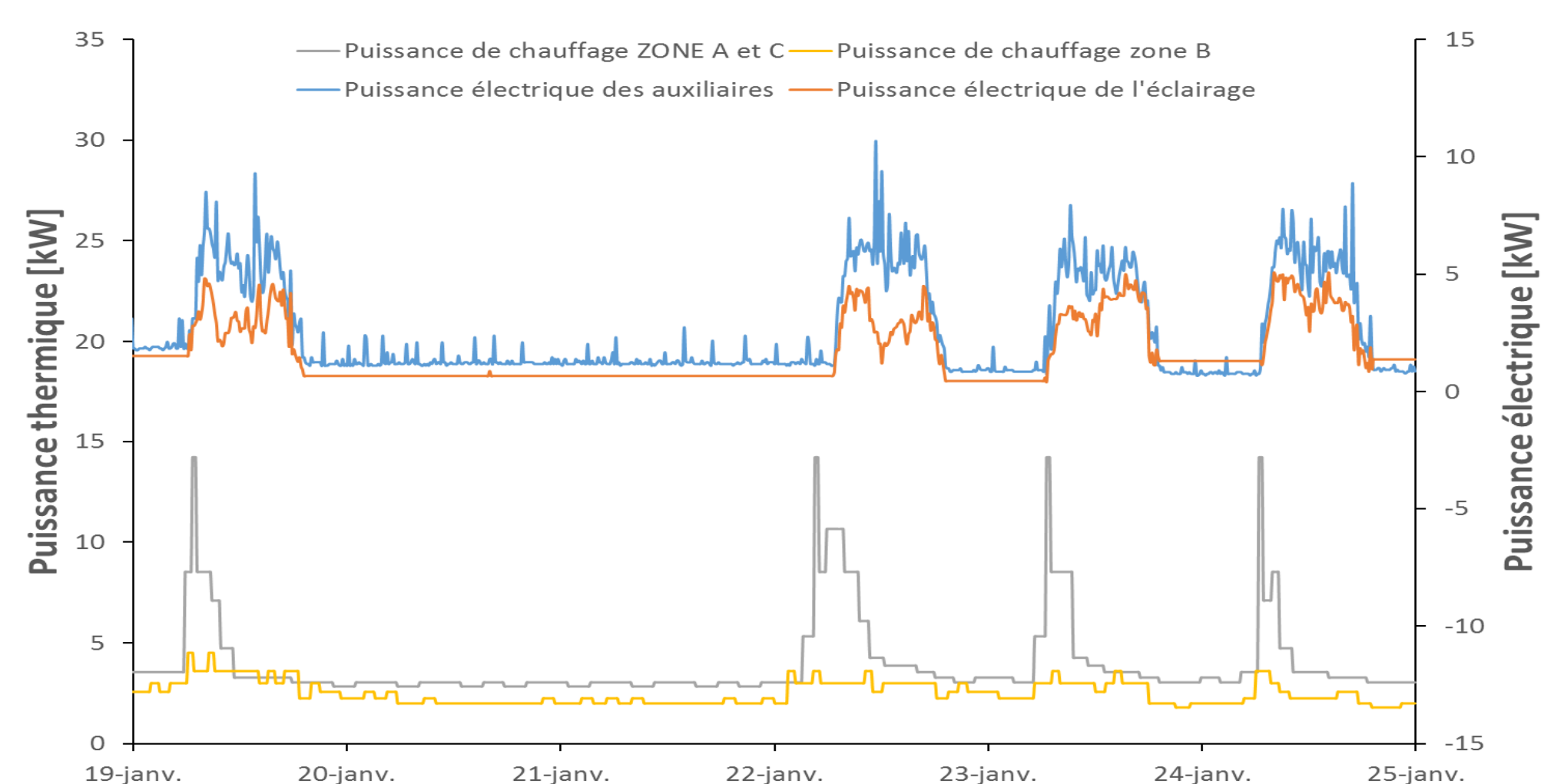


Figure 9 : Puissances thermiques et électriques

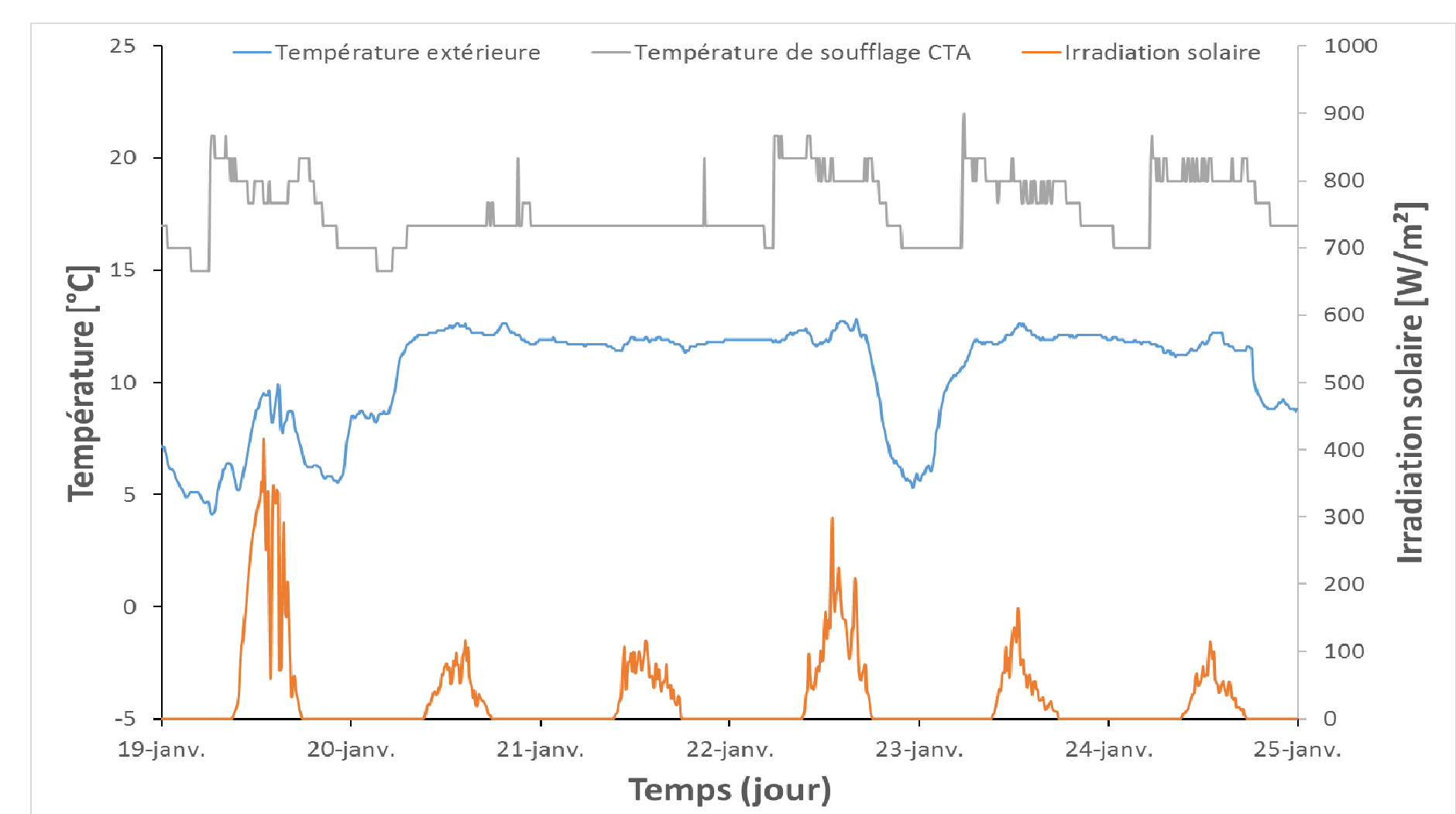


Figure 10 : Température de soufflage CTA et rayonnement solaire.

Les scénarios d'occupation des zones A et C sont représentés sur la figure 11 ainsi que le planning de la CTA double flux dans le tableau 1. Nous considérons que les occupants ont une activité 'travail de bureau'. Le weekend, la CTA est à l'arrêt.

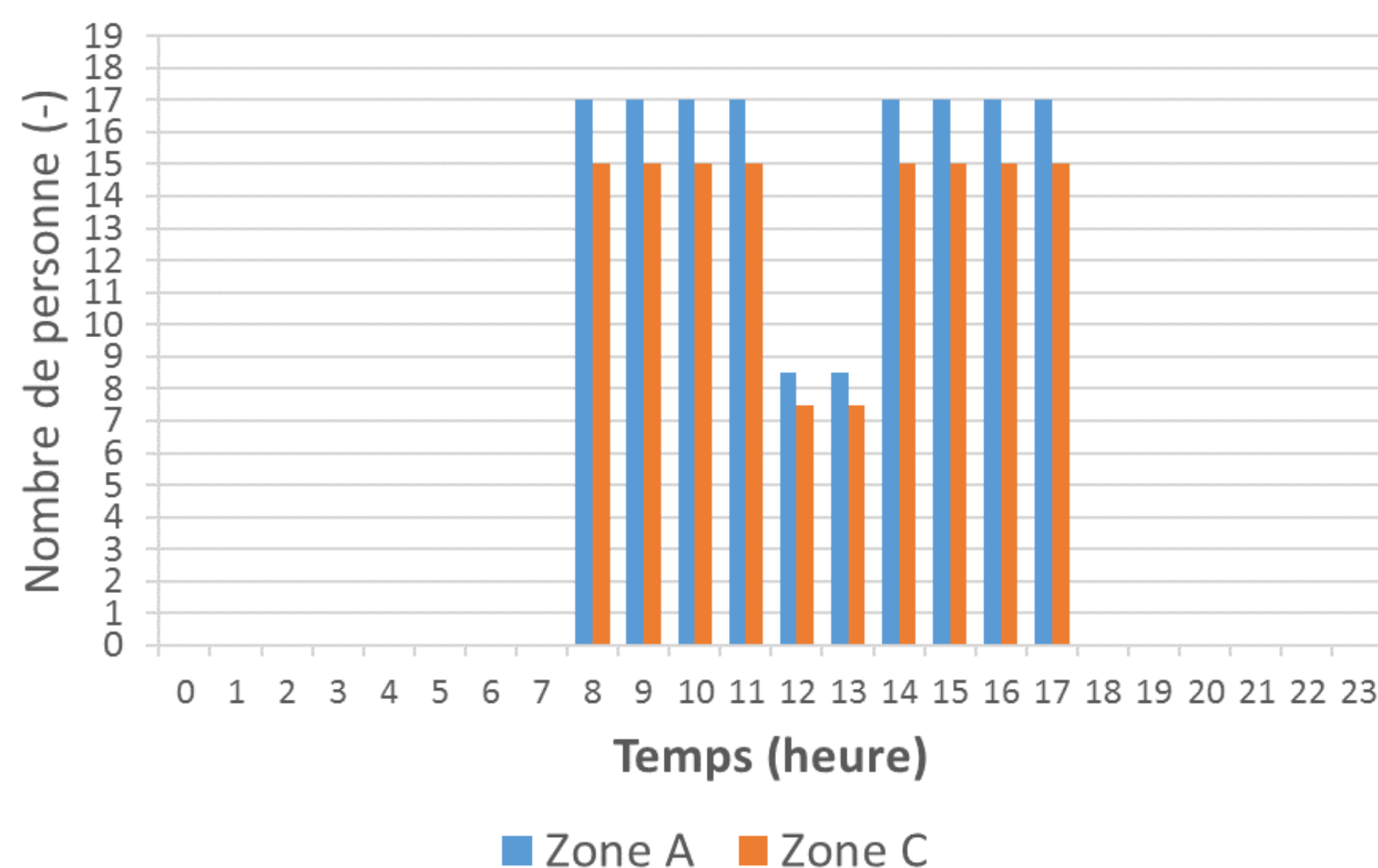


Figure 11 : Profil d'occupation

	<i>Débit d'air</i>	<i>Horaire de fonctionnement</i>
Zone A	625 m ³ /h	8h-20h
Zone B	-	-
Zone C	505 m ³ /h	8h-20h

Tableau 1 : Fonctionnement de la CTA

4.2. CONFRONTATION SIMULATIONS MESURES

Nous présentons une confrontation simulation-mesure. Cette période comprend une période d'inoccupation. Le modèle est simulé au pas de temps de 10 minutes et, pour une meilleure compréhension des phénomènes thermiques globaux dans les zones, nous avons moyenné les températures mesurées pour les zones A et C. Il est à noter que nous n'avons pas encore de données expérimentales sur la température dans la zone B (circulation).

Nous constatons sur la figure 12, que les évolutions temporelles des températures simulées dans la zone A (Est) et la zone C (Ouest) suivent bien les valeurs expérimentales. Pour les zones A et C, nous notons que l'erreur moyenne est inférieure à la précision de la mesure (0,5°C) ; et que l'écart maximal est inférieur à 1°C. Il semble donc que nous prenons bien en compte l'impact des scénarii de fonctionnement de la CTA, l'occupation du bâtiment et les apports solaires. Sur la période d'inoccupation du bâtiment (le 20 et 21 janvier), nous observons une bonne similitude au niveau de la dérive en température du bâtiment entre les valeurs simulée et mesurée, venant valider le comportement inertiel du modèle TRNSYS.

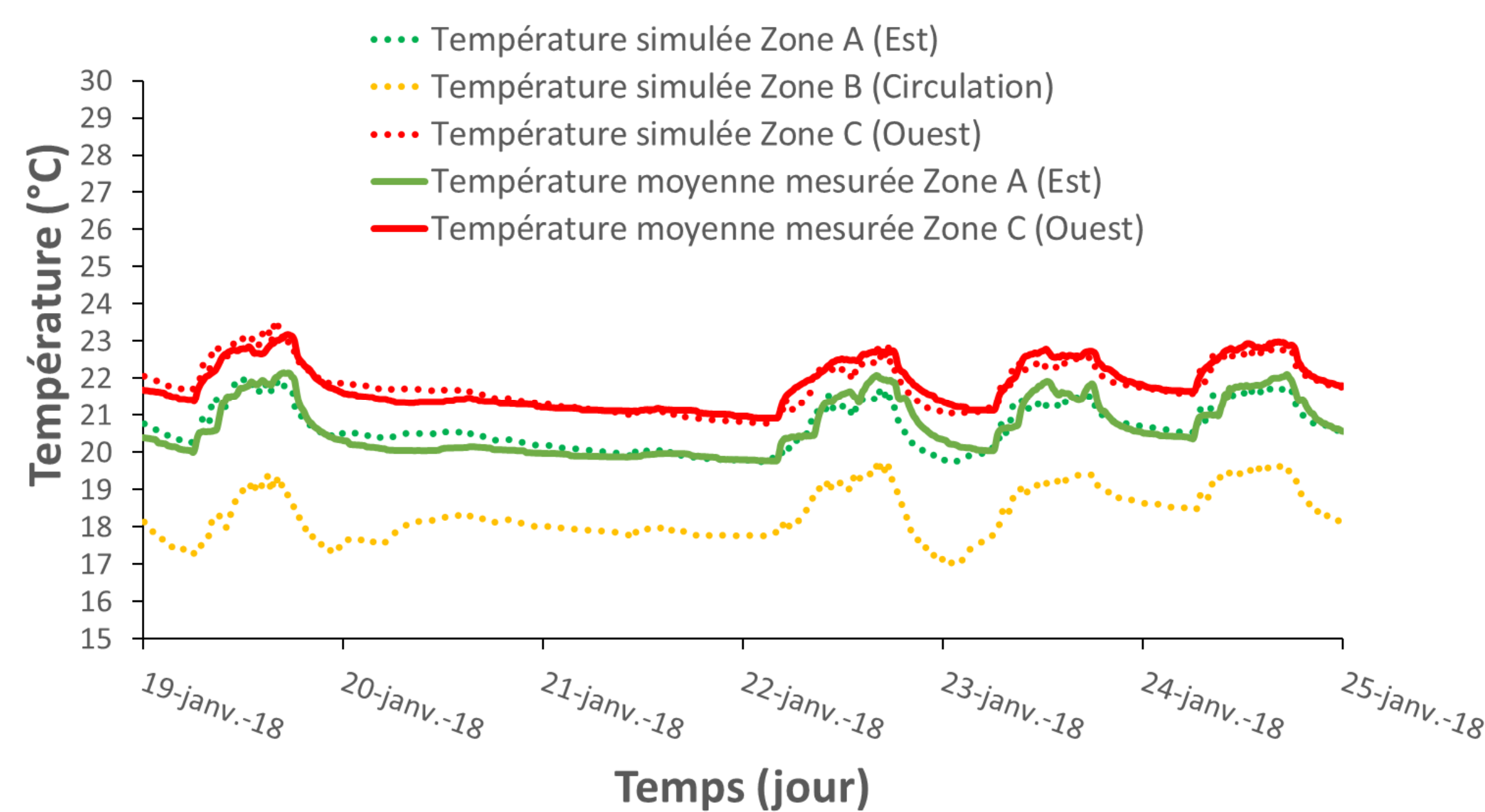


Figure 12 : Profil de température dans les zones

5. CONCLUSION.

La validation de ce modèle est une étape importante dans l'optique de la création d'un outil de prédiction de la courbe de charge du bâtiment. Les premiers résultats sont encourageants. Il nous faudra cependant, entres-autres, étendre l'étude à tout le bâtiment et prendre en compte les réglages de fonctionnement de celui-ci. L'objectif de l'étude est de mettre au point un outil de prédiction à moyens termes (4-5 jours max) du fonctionnement du système à partir des prédictions météo et des scénarios d'usage prévus sur cette durée. Dans cet outil le « mode de fonctionnement » deviendra un paramètre de sortie, qui permettra à termes une bonne utilisation du bâtiment.

6. BIBLIOGRAPHIE

- Asadi, Ehsan, Manuel Gameiro da Silva, Carlos Henggeler Antunes, et Luís Dias. 2012a. « Multi-objective optimization for building retrofit strategies: A model and an application ». *Energy and Buildings* 44 (janvier): 81-87.
- . 2012b. « A multi-objective optimization model for building retrofit strategies using TRNSYS simulations, GenOpt and MATLAB ». *Building and Environment* 56 (octobre): 370-78.
- Cereuil, Edouard. 2014. « KERGRID- Building Smart Grid ». *OPEDUCA-DAYS*, mai 22.
- Chabaud, Aurélie, Julien Eynard, et Stéphane Grieu. 2013. « Gestion multicritère des ressources énergétiques à l'échelle d'un habitat individuel : interaction bâtiment/réseau électrique ». In *5èmes Journées Doctorales / Journées Nationales MACS, 5: Communication JD-4.4, Session JD-4 : Approches multi-critères*. Strasbourg, France.
- . 2015. « A new approach to energy resources management in a grid-connected building equipped with energy production and storage systems: A case study in the south of France ». *Energy and Buildings* 99 (juillet): 9-31.
- Craparo, Emily, Mumtaz Karatas, et Dashi I. Singham. 2017. « A robust optimization approach to hybrid microgrid operation using ensemble weather forecasts ». *Applied Energy* 201 (septembre): 135-47.
- Houssamo, Issam. 2012. « Contribution à l'étude théorique, à la modélisation et à la mise en oeuvre d'un système multisource appartenant à un micro-réseau électrique: considération sur la qualité de l'énergie ». *Thèse de doctorat, Université de Technologie Compiègne*.
- Maleki, Akbar, et Fathollah Pourfayaz. 2015. « Optimal sizing of autonomous hybrid photovoltaic/wind/battery power system with LPSP technology by using evolutionary algorithms ». *Solar Energy* 115 (mai): 471-83.
- Morbihan Energie. s. d. « KERGRID ». *Morbihan énergies - SDEM*. Consulté le 15 mars 2018. <http://morbihan-energies.fr/kergrid/>.
- Quenard, Daniel. 2011. *Diaporama*. Diaporama présenté à Schneider electric, juin 7.
- Schulze, M., et P. Crespo Del Granado. 2010. « Optimization modeling in energy storage applied to a multi-carrier system ». In *IEEE PES General Meeting*, 1-7.

Cette étude a été menée dans le cadre du projet ADEME FlexBat.

Etude d'un bâtiment en béton de chanvre : suivi expérimental et validation numérique

Georges Costantine*, Chadi Maalouf, Tala Moussa, Guillaume Polidori

GRESPI, SFR Condorcet FR CNRS 3417, Université de Reims Champagne-Ardenne, Faculté des Sciences, BP 1039, Moulin de la Housse, 51687 Reims, Cedex 2, France

*georges.costantine@univ-reims.fr

RESUME. Vu la tendance actuelle à utiliser les matériaux de construction à faible impact environnemental dans les constructions, la modélisation du comportement hygrothermique du béton de chanvre subit une évolution notable. Toutefois, son étude à l'échelle du bâtiment reste rare dans la littérature. Dans ce contexte, un bâtiment français dans la région Grand-Est, utilisant le béton de chanvre comme isolant extérieur est suivi. Les températures intérieures, les humidités relatives, le flux de chaleur thermique ainsi que les conditions climatiques extérieures sont mesurées. L'approche expérimentale est ensuite couplée à une validation numérique à l'échelle du local par le biais de l'outil de simulation SPARK. La température et l'humidité relative de l'air à l'intérieur du bureau sont exploitées. Les résultats mettent l'accent sur l'importance de la maîtrise des coefficients d'échange thermique dans le local et des scénarios d'occupation des habitants.

MOTS-CLÉS: béton de chanvre, suivi expérimental, validation numérique

ABSTRACT. Given the current trend to use construction materials with low environmental impact in buildings, modeling of hemp concrete hygrothermal behavior undergoes a significant evolution. However, it is scarcely studied at building scale in the literature. In this context, a French building in the Grand-Est region, using hemp concrete as exterior insulation is investigated. Indoor temperatures, relative humidities, thermal heat flux and outdoor climate conditions are measured. The experimental approach is then coupled to a numerical validation at the local scale using SPARK simulation tool. The temperature and relative humidity of the air inside the office are investigated. The results emphasize the importance of controlling the heat exchange coefficients in the room and the occupancy scenarios of the inhabitants.

KEYWORDS: hemp concrete, experimental follow-up, numerical validation

1. INTRODUCTION

Du « Grenelle de l'environnement » en 2007 jusqu'au « COP21 » en 2015, les préoccupations environnementales et les aspirations sociétales de préserver les ressources planétaires ont largement contribué à reconnaître les matériaux biosourcés comme ressources naturelles potentielles à exploiter. Les résultats de nombreux travaux de recherche menés à cet égard ont prouvé leur fiabilité et avantages dans plusieurs domaines d'application : industrie chimique, agriculture, transports, emballage, ainsi que dans la construction (Nuyttens 2017). Dans ce contexte, le béton de chanvre connaît son plein essor. Au moment où la littérature présente de nombreuses études du béton de chanvre à l'échelle intrinsèque du matériau et de la paroi (Costantine et al. 2016)(Tran Le et al. 2010), son comportement hygrothermique à l'échelle réelle du bâtiment et pour de longues durées est toujours moins abordé (Bennai et al. 2017).

Ce travail s'intègre alors dans le but de combler ces lacunes en mettant en œuvre une étude d'un bâtiment utilisant le béton de chanvre comme isolation par l'extérieur. Un appartement du bâtiment, situé à Fleury-La-Rivière, une commune d'Epernay, est choisi pour être instrumenté. Des sondes de température et d'humidité relative sont installées dans les différentes pièces. Des fluxmètres sont aussi

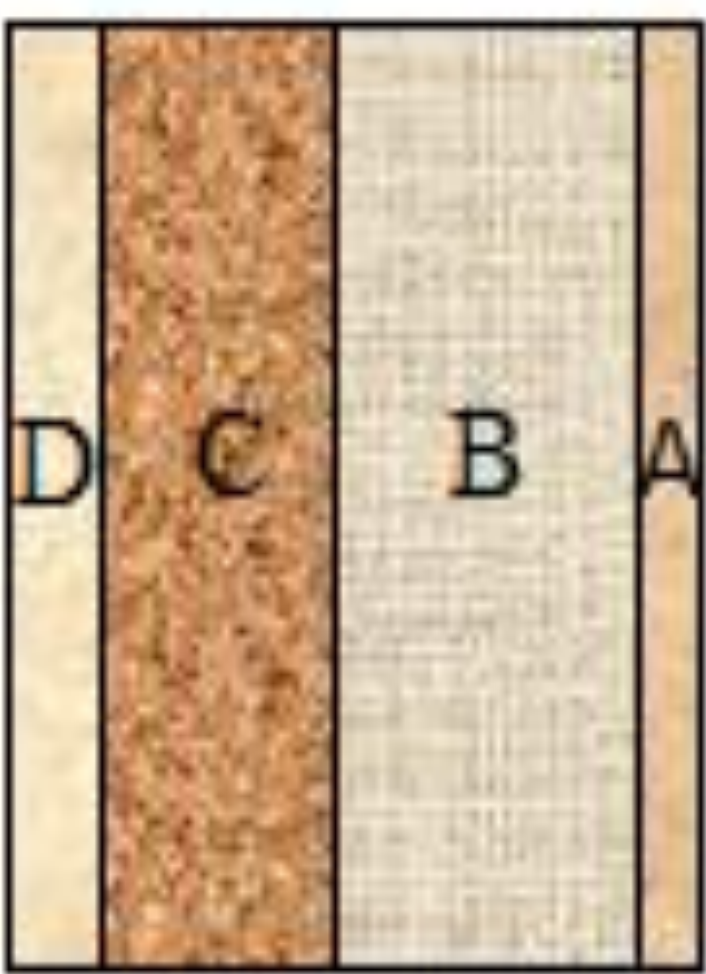
plantés sur la façade-sud du bâtiment pour quantifier les déperditions thermiques à travers l'enveloppe. Les conditions météorologiques extérieures sont couvertes par une station-météo fixée sur le toit de l'immeuble.

Une analyse du confort thermique dans l'appartement est ensuite établie. Les résultats montrent un niveau acceptable de température et d'humidité de l'air intérieur. Ensuite, une validation numérique des résultats expérimentaux est effectuée à l'échelle du local, au niveau de l'une des pièces de l'appartement (le bureau) en utilisant l'outil de simulation numérique SPARK. Les sorties du modèles arrivent à bien prédire les relevés expérimentaux tout en portant une attention particulière au scénario d'occupation de la pièce et aux coefficients d'échange convectifs entre les parois et l'air intérieur.

2. APPROCHE EXPERIMENTALE

2.1. INSTRUMENTATION D'UN APPARTEMENT

L'enveloppe du bâtiment est formée de quatre couches comme l'indique le Tableau 1 suivant. Les propriétés des matériaux sont fournies par le bureau d'études. Le béton de chanvre, utilisé comme isolant extérieur, est projeté sur place dans les murs. Les différents appartements sont équipés de radiateurs électriques pour le chauffage et de systèmes de ventilation mécanique. Un sondage relatif aux conditions de confort ressenti par les habitants a conduit à la sélection d'un appartement du bâtiment de surface 92,30 m² et occupé par une famille de trois membres avec deux chiens. Le plan de l'appartement est présenté dans la Figure 1.

	Matériaux	Epaisseur (m)	Densité (kg.m ⁻³)	Conductivité thermique (W.m ⁻¹ K ⁻¹)	Capacité thermique (J.Kg ⁻¹ °C ⁻¹)
	A : gypse	0,015	900	0,25	850
B: Optibric®	0,20	700	R _{eq} =1,07	850	
C: béton de chanvre	0,13	450	0,095	1000	
D : sable-chaux	0,02	1650	0,4	830	

A: revêtement intérieur
D: revêtement extérieur

Tableau 1: Propriétés de l'enveloppe

Une station-météo fixée sur le toit du bâtiment enregistre les données relatives au climat extérieur (température, humidité relative, pluviométrie, radiations, vitesse de l'air...). A l'intérieur de l'appartement, différentes sondes sont mises en place (voir Tableau 2) : trois boules noires qui mesurent la température rayonnante dans chaque pièce (séjour, bureau et chambre à coucher des parents), quatre thermo-hygromètres mesurant la température et l'humidité relative de l'air intérieur (séjour, bureau et deux chambres à coucher), et trois fluxmètres placés sur la façade sud dans le bureau pour enregistrer

les déperditions thermiques dans la paroi. Les capteurs sont connectés à une console qui enregistre les données. Les relevés de mesure se sont effectués tous les mois entre novembre 2015 et septembre 2016.



Thermo-hygomètre



Boule noire



Fluxmètres

Précision: $\pm 0,2 \text{ }^\circ\text{C}$, $\pm 1,8 \%$ Précision: $\pm 0,1 \text{ }^\circ\text{C}$ Précision : $\pm 5\%$

Tableau 2: Dispositif expérimental

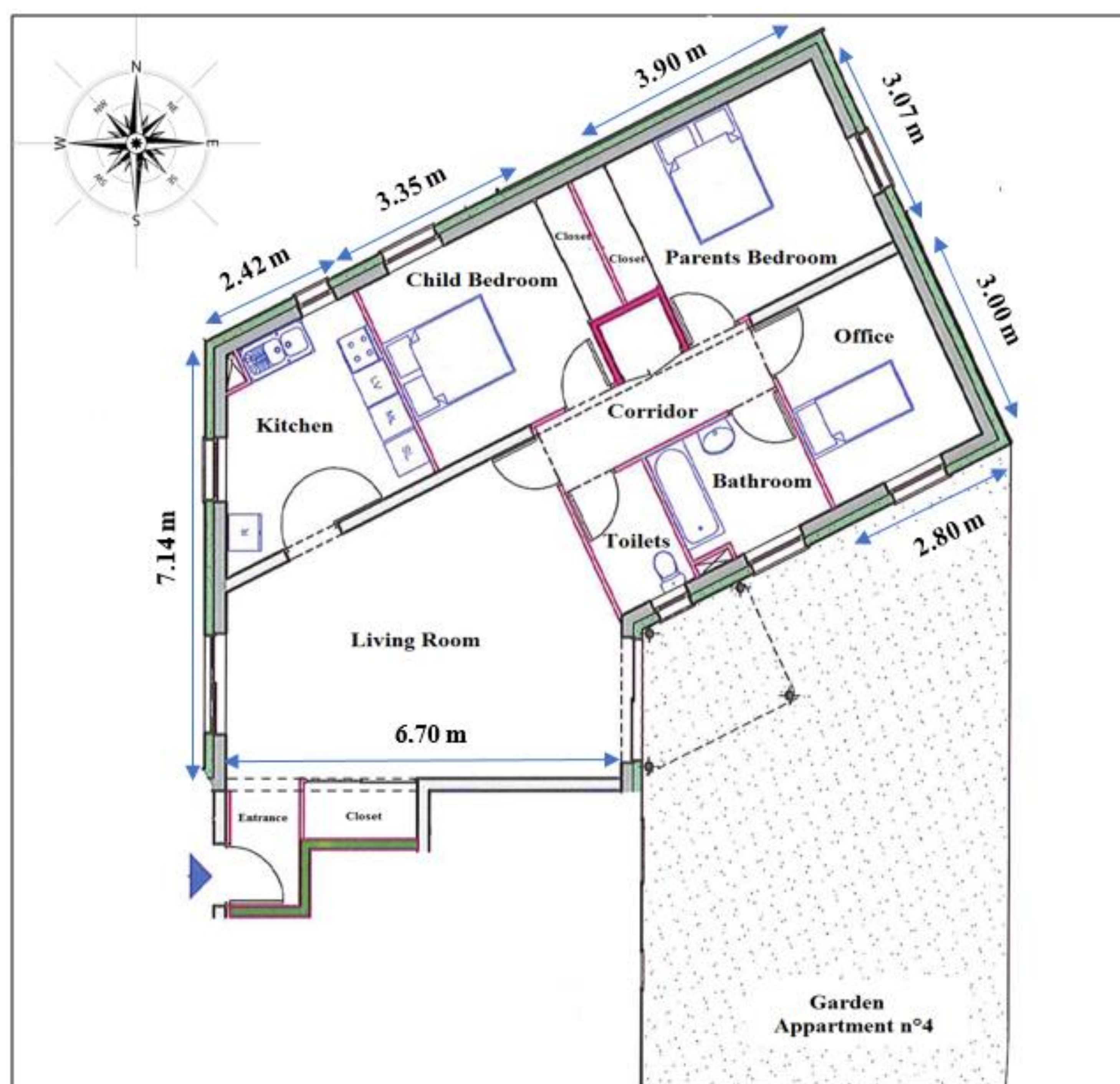


Figure 1: Plan de l'appartement étudié

2.2. RESULTATS EXPERIMENTAUX

2.2.1. Analyse du confort intérieur

Le diagramme psychrométrique de l'air à l'intérieur de chaque pièce permet d'avoir une idée à propos du confort ressenti par les occupants. A cet égard, la température opérative (T_o) est calculée en se basant sur la température de l'air (T_a) sec donnée par les thermo-hygomètres et la température

rayonnante (T_r) dans la pièce déduite de la température mesurée par les boules noires comme suit (Kazkaz and Pavelek 2013) :

$$T_o = T_a + (1 - A)(T_r - T_a) \quad (1)$$

A est un coefficient qui dépend de la vitesse de l'air ($A=0,5$ en hiver où les fenêtres sont fermées et $A=0,7$ en été où les fenêtres sont ouvertes). Pour des raisons de clarté, le Tableau 3 présente uniquement les diagrammes psychrométriques pour le séjour et la chambre à coucher des parents.

En se référant aux normes fondamentales de l'ASHRAE (ASHRAE 2013), les plages acceptables de température et d'humidité opératoires pour les personnes portant des vêtements d'hiver et d'été typiques pendant une activité essentiellement sédentaire sont illustrées dans les Figure 2 et Figure 3. Les niveaux d'humidité relative sont globalement acceptables, des valeurs élevées ($>70\%$) sont décelées à quelques reprises due au fait que la cuisine est ouverte sur le séjour et que l'activité de cuisson a lieu souvent avec la bouche d'aération fermée. A cela s'ajoute le fait de sécher le linge à l'intérieur du salon. En outre, les points sur le diagramme où une chute de température (au-dessous de 21°C) est observée en hiver correspondent à la période de vacances pendant laquelle les chauffages sont arrêtés. En été, des valeurs élevées de température intérieure sont détectées pendant la période de canicule où la température extérieure dépasse 35°C .

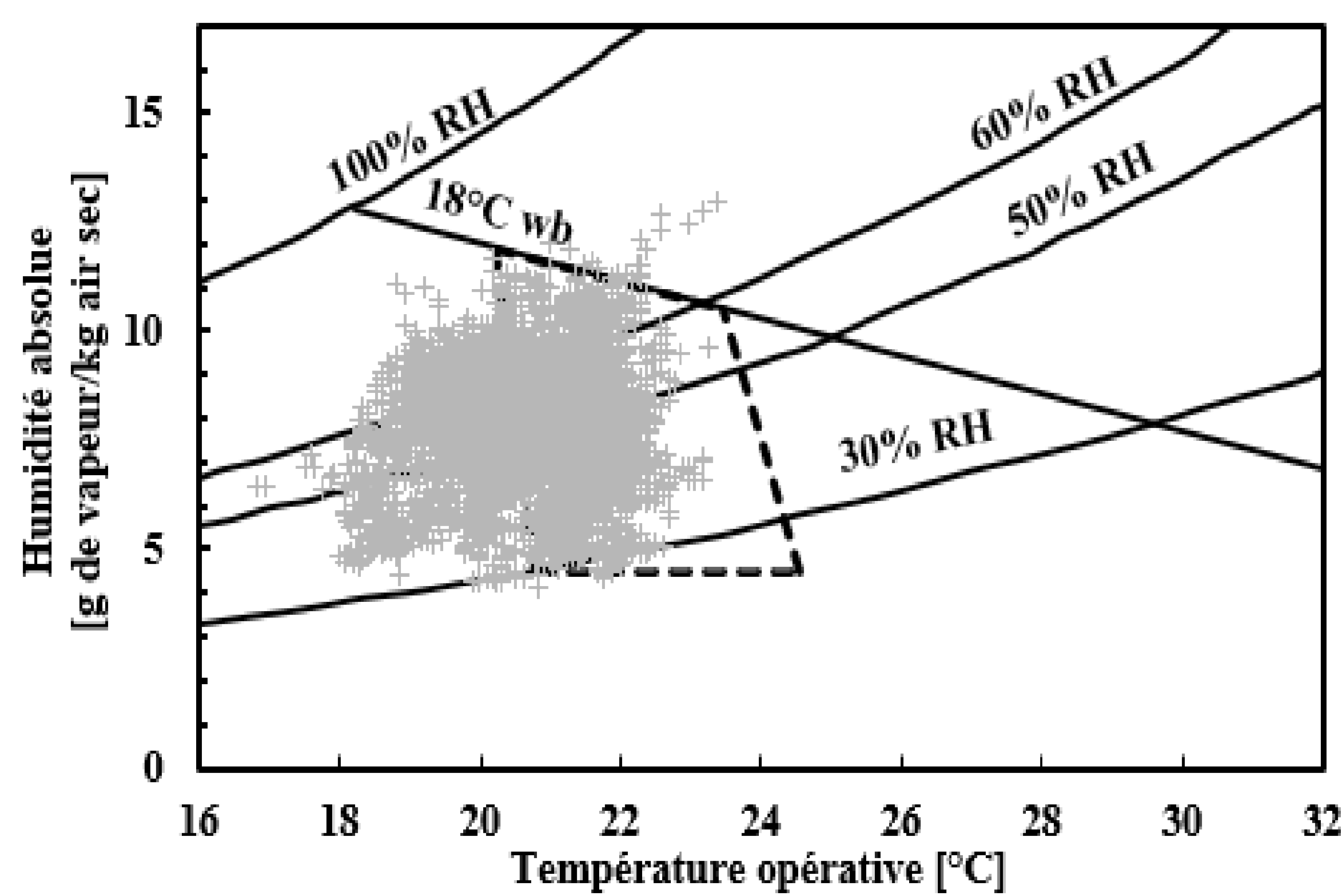


Figure 2: Diagramme psychrométrique du séjour en hiver

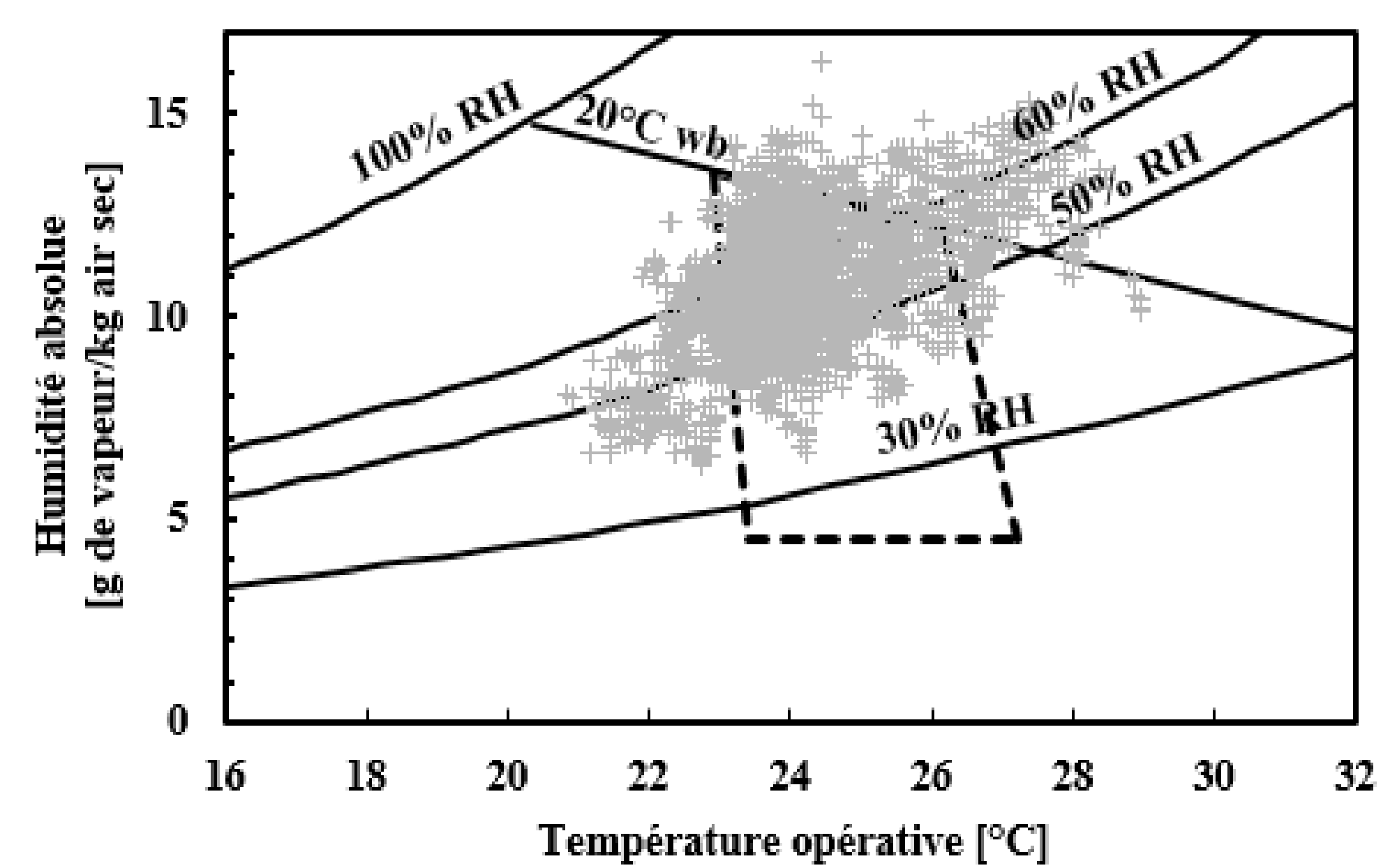


Figure 3: Diagramme psychrométrique du séjour en été

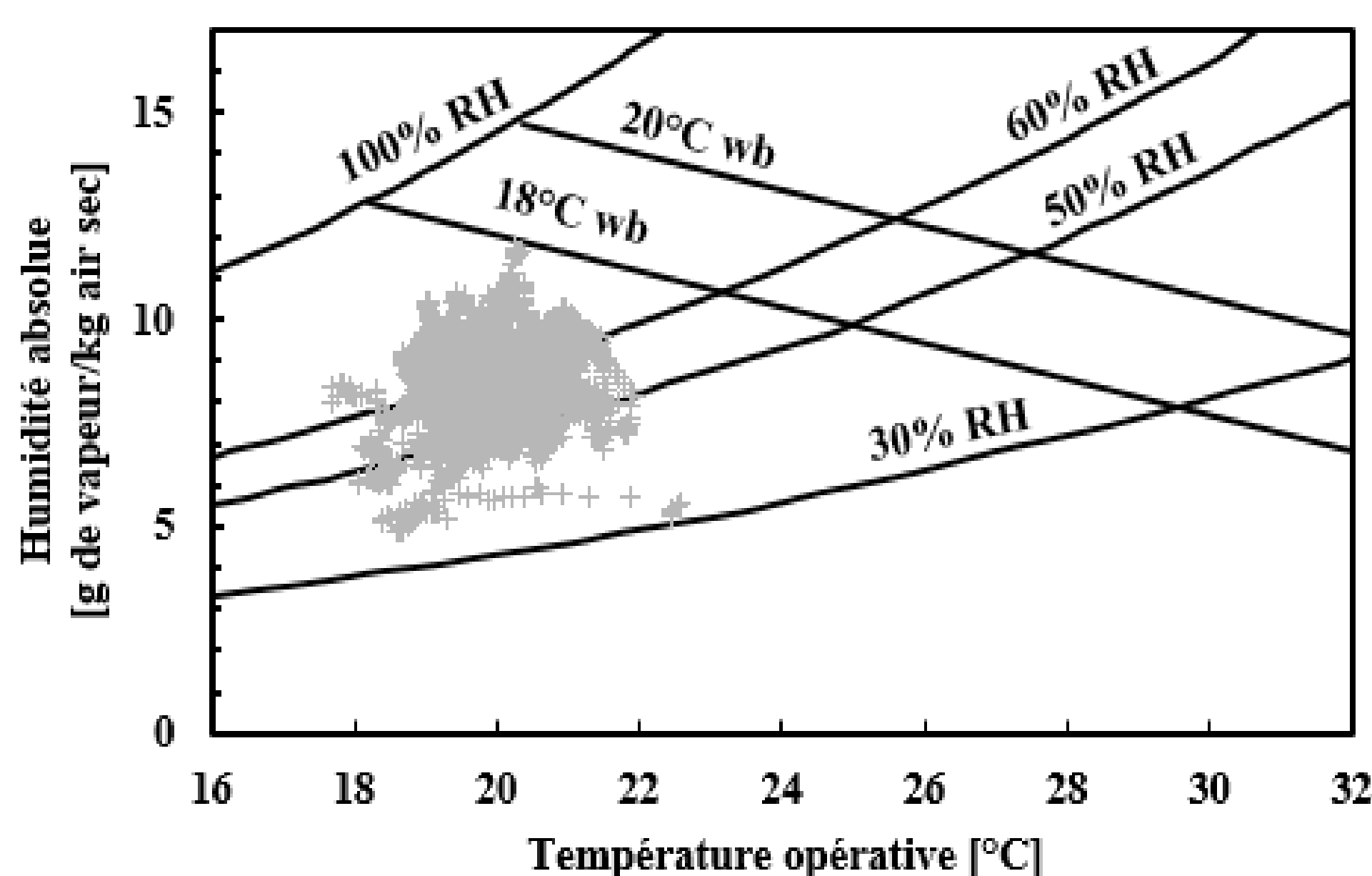


Figure 4: Diagramme psychrométrique de la chambre des parents en hiver

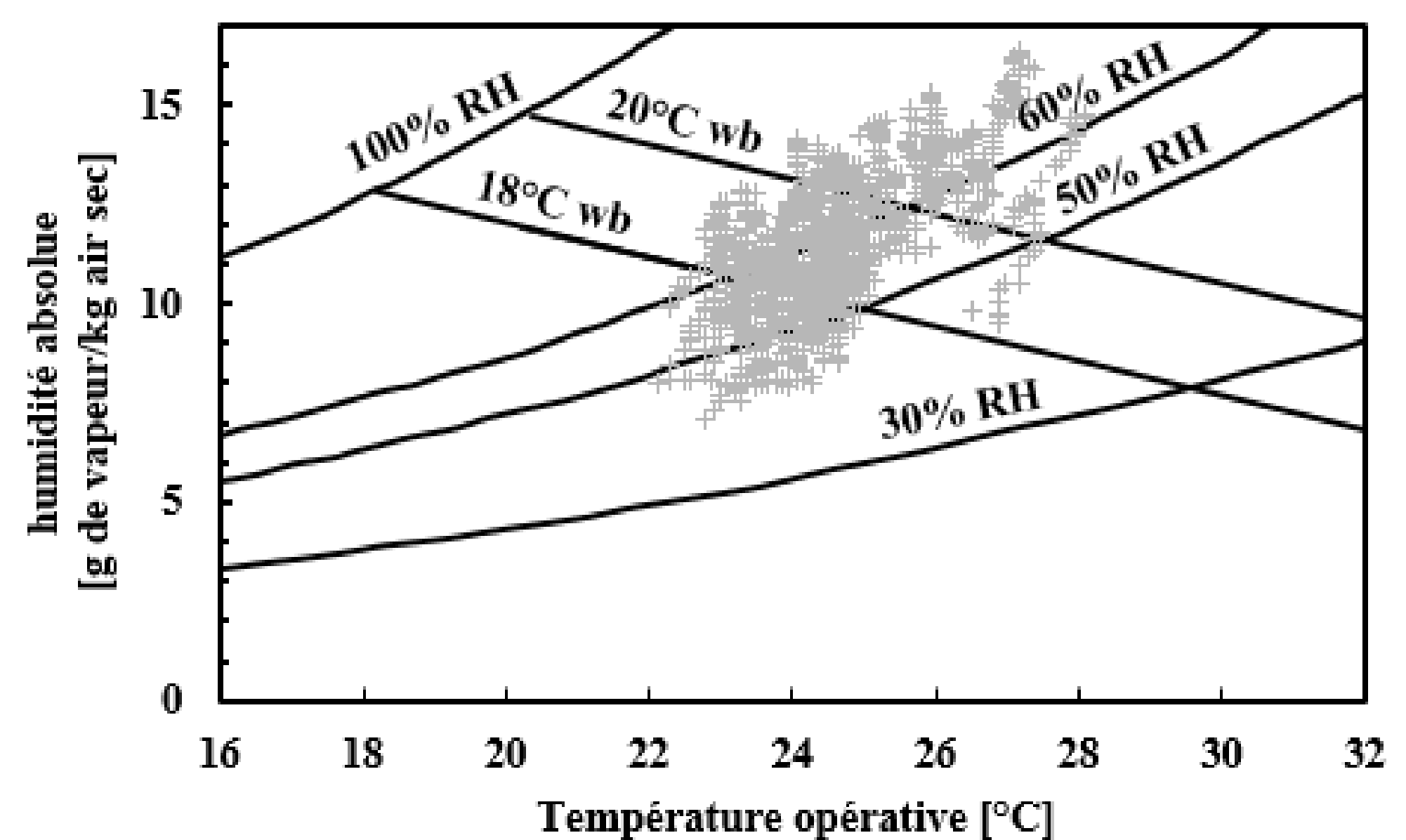


Figure 5: Diagramme psychrométrique de la chambre des parents en été

Tableau 3: Diagrammes psychrométriques dans le séjour et la chambre des parents

Pour la chambre à coucher des parents, l'aération de la pièce n'est toujours pas bien assurée. En plus, la présence des deux chiens en compagnie des parents est une source non-négligeable de vapeur dans l'air, d'où les niveaux d'humidité relative élevés en été ou en hiver. Concernant le confort thermique dans les chambres à coucher, les études qui existent sur cet axe sont limitées. La température de confort estival maximale est estimée à 26°C par le CIBSE (CIBSE 2006). De même, ASHRAE 55-2004 (Olesen 2004) indique que des températures estivales élevées sont acceptables en présence d'un ventilateur. En hiver, Le CIBSE signale une température de confort minimale de 17°C, au moment où L'Organisation Mondiale de Santé recommande un seuil minimal de température de l'ordre de 16°C pour ne pas favoriser les infections respiratoires en-dessous de cette température. D'après ce qui précède, les conditions de température intérieure dans l'appartement sont acceptables.

2.2.2. Analyse des déperditions thermiques à travers l'enveloppe

Trois fluxmètres installés sur la façade Sud du côté intérieur du bureau permettent de mesurer le flux thermique dans la paroi. Les Fluxmètres_1 et 3 sont placés à une hauteur de 1,20 m de part et d'autre de la fenêtre et le Fluxmètre_2 est placé au niveau de la plinthe (voir Tableau 2). Les enregistrements sont effectués pour les Fluxmètres_1 et 2 dans une première partie (entre 01/12/2015 et 15/12/2015) et pour les Fluxmètres _1 et 3 (entre 16/12/2015 et 11/01/2016) dans la seconde.

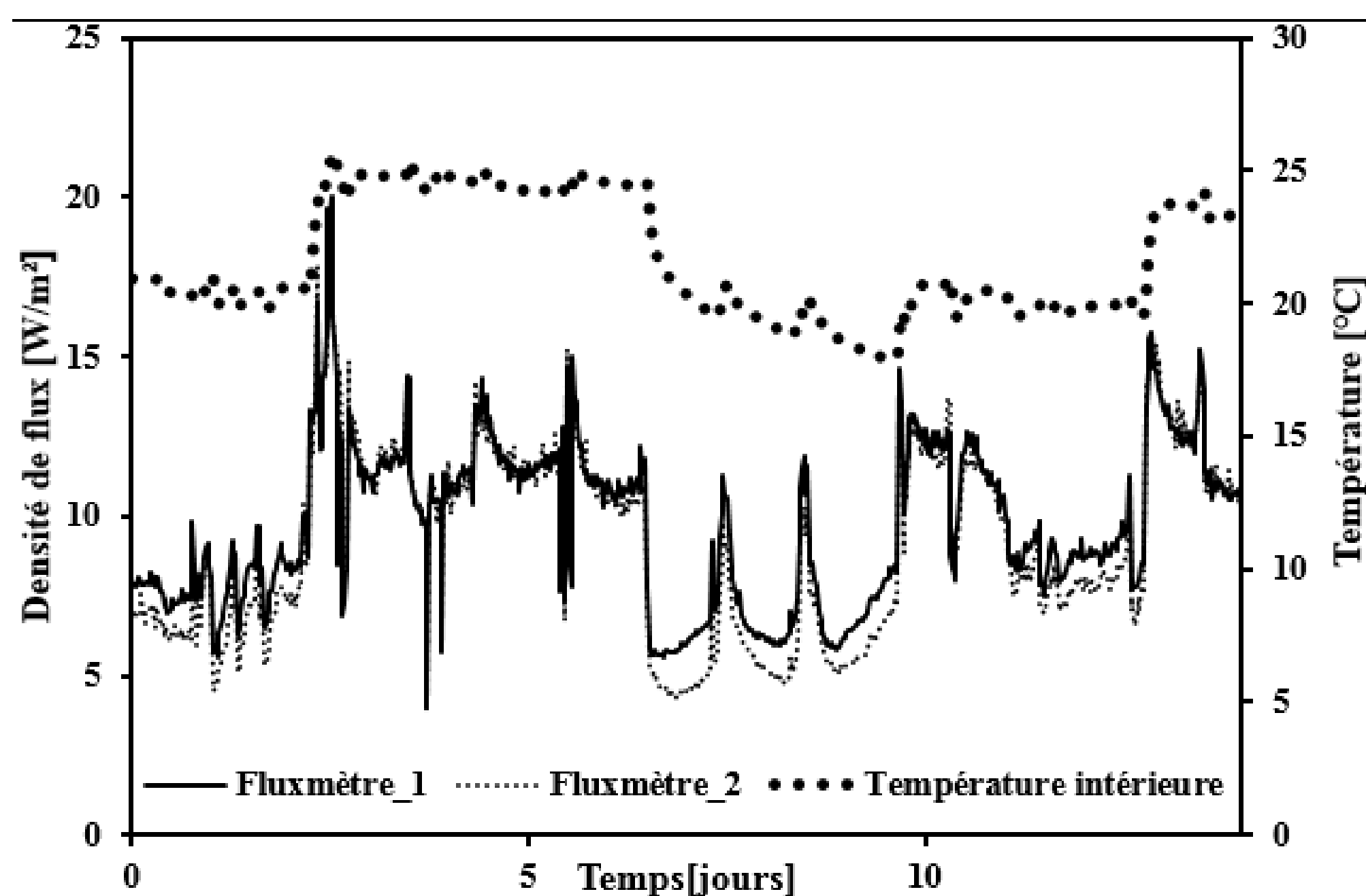


Figure 6: Densité de flux et température intérieure (1^{ère} période)

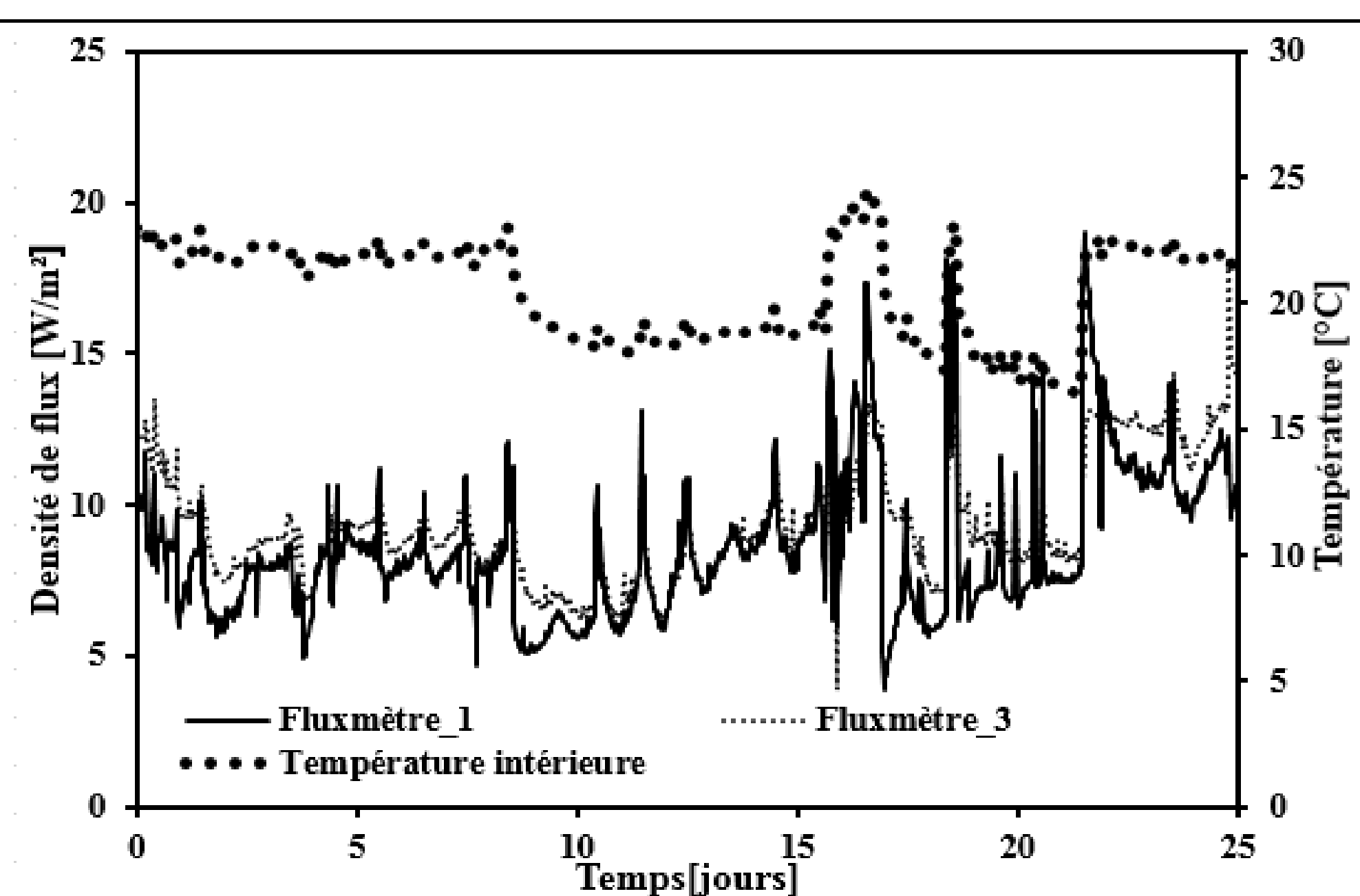


Figure 7: Densité de flux et température intérieure (2^{ème} période)

Tableau 4: Relevés expérimentaux de la densité de flux et de la température intérieure dans le bureau

Les flux de chaleur sont pilotés par la variation de température à l'intérieur dans les deux périodes (Figure 6 et Figure 7), ce qui est cohérent comme étant proportionnels au gradient de température entre la surface intérieure et l'air dans la pièce. Ensuite, pendant la première période, le flux est assez homogène dans la paroi sur la verticale où sont placés les Fluxmètres_1 et 2 (valeur moyenne de 9,71 W/m² pour le Fluxmètre_1 et 9,15 W/m² pour le Fluxmètre_2). Par contre, les déperditions thermiques du Fluxmètre_3 dans la deuxième période (moyenne de 9,59 W/m²) sont globalement plus élevées que celle du Fluxmètre_1 (moyenne de 8,69 W/m²). Ceci peut être attribué à la position du Fluxmètre_3 au milieu de la façade, ce qui fait qu'il est plus exposé au vent et à la pluie battante, et fait augmenter ainsi la conductivité thermique de l'enveloppe et ainsi le flux de chaleur conduit vers l'extérieur de la paroi.

3. APPROCHE NUMERIQUE

3.1. ECHELLE DU LOCAL : LE BUREAU

Le local étudié dans cette partie est le bureau. Il s'agit d'un bureau de $2,8 \times 3,3 \times 2,5 \text{ m}^3$. La façade Sud contient un double vitrage de $1,25 \times 1,1 \text{ m}^2$. La façade Est est en partition avec un garage, tandis que les deux autres sont considérées comme partition intérieure. Le bureau est supposé occupé chaque jour par une personne entre 14h et 18h. Les sources de chaleur principales sont dues à l'éclairage et l'ordinateur. L'inertie thermique initiale du local est $I = 500\,000 \text{ J.K}^{-1}$. Les coefficients de convection intérieurs des parois verticales ($h_{\text{conv_int}}$), du plafond ($h_{\text{conv_plafond}}$) et du plancher ($h_{\text{conv_plancher}}$) sont calculés comme suit :

$$h_{\text{conv_int}} = 1,235(T_i - T_{si})^{\frac{1}{4}} \exp(0,0467H) \quad (2)$$

$$h_{\text{conv_plafond}} = \begin{cases} \left[\left(1,5 \left(\frac{T_i - T_{si}}{H} \right)^{\frac{1}{4}} \right)^6 + \left(1,23(T_i - T_{si})^{\frac{1}{3}} \right)^6 \right]^{\frac{1}{6}} & \text{if } T_i > T_{si} \\ 0,6 (T_i - T_{si})^{\frac{1}{5}} & \text{if } T_i < T_{si} \end{cases} \quad (3)$$

$$h_{\text{conv_plancher}} = 1,8 |T_i - T_{si}|^{\frac{1}{3}} \quad (4)$$

T_i étant la température de l'air intérieur et T_{si} la température de la surface intérieure de la paroi. Les coefficients de convection extérieurs ($h_{\text{conv_ext}}$) sont déduits en se basant sur la vitesse (V) et la direction de l'air extérieur :

$$h_{\text{conv_ext}} = \begin{cases} 1,7(1,8 \times V + 0,2) + 5,1 & \text{façade face au vent} \\ 1,7(0,4 \times V + 1,7) + 5,1 & \text{façade non exposée} \end{cases} \quad (5)$$

Les conditions climatiques extérieures, y compris la température, l'humidité relative et la densité de rayonnement constituent les entrées pour le modèle. La modélisation des transferts de chaleur et d'humidité ainsi que les équations de conservation de l'énergie et de la masse sont détaillés dans (Costantine et al. 2017). Un cas de simulation initial est testé. Les températures et humidités relatives de l'air intérieur simulées sont comparées aux relevés expérimentaux. Une étude paramétrique est ensuite réalisée en faisant varier l'inertie thermique du local, les sources de chaleur et de vapeur dans la pièce et les coefficients de convection intérieurs. Les différents cas testés sont résumés dans le tableau (5) et les résultats sont présentés pour la période de 31 Juillet 2016 à 20 Août 2016.

Cas	Notes	Température moyenne de l'air (°C)	Humidité relative moyenne de l'air (%)
Expérimental	-	24,80	53,23
Initial	Simulation initiale	25,73	47,08
Cas_1	Inertie thermique multipliée par 5	25,78	46,96
Cas_2	Sources de chaleur et vapeur négligées	25,16	47,68
Cas_3	$h_{\text{conv_int}} = 4,5$	24,24	51,46
Cas_4	$h_{\text{conv_plafond}} = 5,5$ et $h_{\text{conv_plancher}} = 1,38$	25,28	48,36

Tableau 5: Différents cas de simulation à l'échelle du local

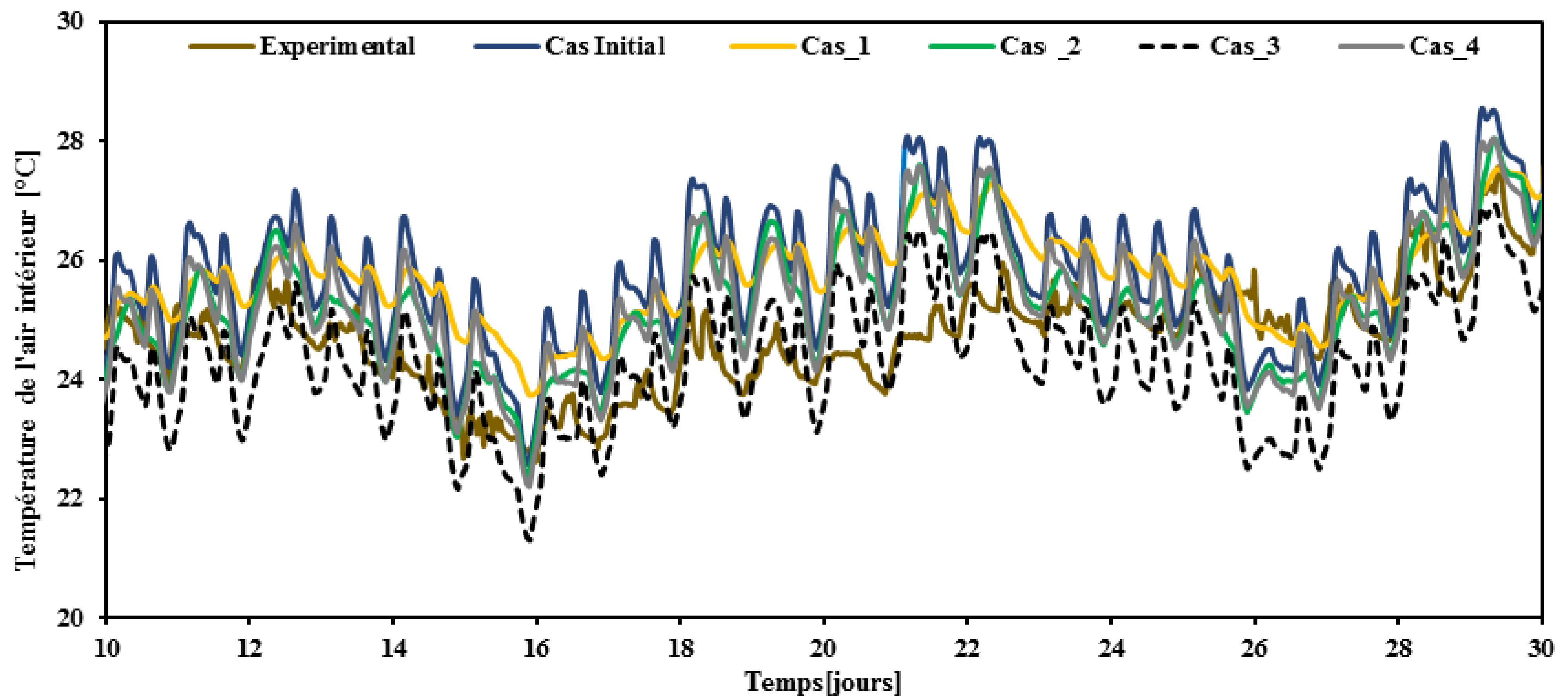


Figure 8: Comparaison entre les températures intérieures mesurées et calculées dans le local

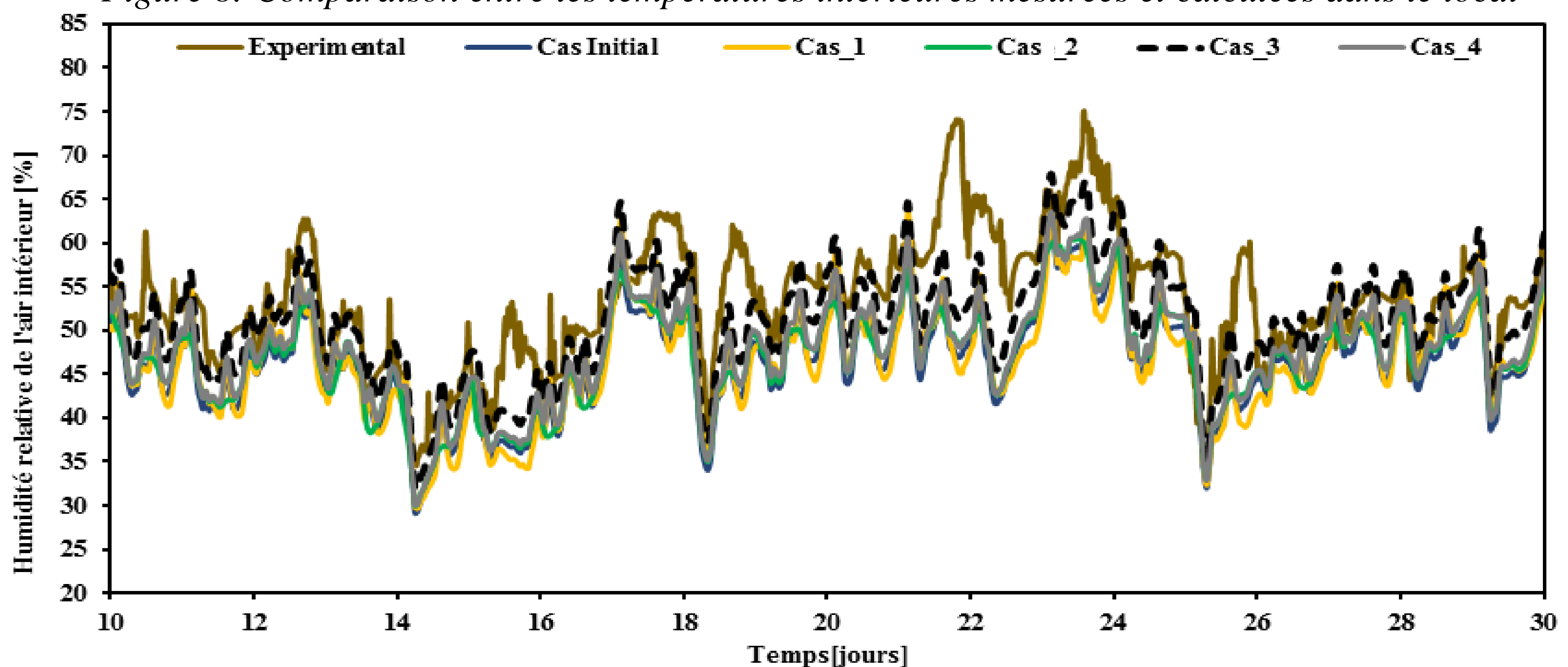


Figure 9: Comparaison entre les températures intérieures mesurées et calculées dans le local

Le cas numérique initial montre que la température de l'air à l'intérieur du bureau est globalement surestimée (Figure 8). Augmenter l'inertie thermique dans la pièce (Cas_1) diminue les fluctuations de température intérieure et réduit son amplitude de variations sans affecter sa valeur moyenne ($25,73^{\circ}\text{C}$ dans le cas initial et $25,78^{\circ}\text{C}$ dans le Cas_1). Cependant, négliger les sources de chaleur et de vapeur intérieures (Cas_2) fait chuter de $0,56^{\circ}\text{C}$ la température moyenne de l'air étant donné que la chaleur libérée est réduite dans le local. Ce qui met l'accent sur l'importance du scénario d'occupation dans la pièce qui est variable selon les activités des habitants. Dans la corrélation de h_{conv_int} , l'ordre de grandeur du coefficient de convection avec les parois verticales est entre 2 et $2,2 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$. Une fois augmenté à $4,5 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ (et ceci est justifié par les fenêtres ouvertes en été et ainsi une vitesse plus grande de l'air)(Cas_3), les échanges convectifs entre l'air dans le local et la surface intérieure de la paroi sont favorisés. Ainsi, le gradient de température considéré se réduit et la température moyenne de l'air intérieur diminue de l'ordre de $1,5^{\circ}\text{C}$. En outre, le Cas_3 reproduit bien les variations dynamiques de la température intérieure mesurée en termes d'amplitude et de déphasage. Finalement, pour le Cas_4 où les coefficients d'échange convectifs du plancher et du plafond sont fixés respectivement à $1,38$ et $5,5 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$, la température moyenne est diminuée de $0,45^{\circ}\text{C}$. Ce qui montre que le coefficient convectif des parois verticales a une influence plus remarquable sur les résultats que celui du plancher

et du plafond. Les observations notées pour l'humidité relative de l'air intérieur sont similaires (Figure 9). Le Cas_3 montre les meilleurs résultats avec une humidité relative moyenne de 51,46%. L'inertie thermique du bureau (Cas_2) a un impact réduit sur l'humidité relative par rapport à son influence sur la température de l'air intérieur. En négligeant les sources de chaleur et vapeur (Cas_3), l'humidité relative augmente de 0,60% de moyenne par rapport au cas initial à cause de la diminution de la température dans ce cas. Dans le Cas_4, l'humidité relative moyenne s'est améliorée mais elle reste toujours écartée des résultats expérimentaux.

En se basant sur ce qui précède et tenant compte de la précision des hygromètres, le Cas_3 semble le plus adapté pour modéliser les variations de température et d'humidité dans le local étudié. Il s'en suit qu'une combinaison convenable des coefficients de transferts convectifs des parois intérieures est un atout pour améliorer les sorties du modèle.

4. CONCLUSION

Ce travail présente l'étude d'un bâtiment situé dans le nord-est de la France. Le béton de chanvre, utilisé comme isolant extérieur, constitue une couche de 13 cm de l'enveloppe. Un appartement est sélectionné et instrumenté. Les relevés expérimentaux sont ensuite confrontés à une validation numérique à l'échelle du bureau sur les températures et humidités relatives intérieures. Les diagrammes psychrométriques dans les différentes pièces de l'appartement montrent des niveaux thermiques et hydriques acceptables. Les humidités relatives élevées à plusieurs reprises sont dues au comportement des habitants vis-à-vis de leur appartement. En outre, les relevés des fluxmètres indiquent une homogénéité globale de la paroi. D'ailleurs, à l'échelle du bureau, le modèle numérique établi sous SPARK montre un accord acceptable entre les mesures expérimentales et les résultats numériques. Cependant, maîtriser les scénarios d'occupation de la pièce et les phénomènes des transferts convectifs entre les parois intérieures et l'air dans le local sont deux paramètres essentiels pour améliorer les sorties du modèle.

5. BIBLIOGRAPHIE

- ASHRAE. 2013. *ASHRAE HANDBOOK FUNDAMENTALS*. SI Edition.
- Bennai, F. et al. 2017. "Experimental Characterization of Thermal and Hygric Properties of Hemp Concrete with Consideration of the Material Age Evolution." *Heat and Mass Transfer*: 1–9.
- CIBSE. 2006. *Environmental Design, Chartered Institution of Building Services Engineers*. London.
- Costantine, Georges, Chadi Maalouf, Elias Kinab, and Guillaume Polidori. 2016. "Numerical Study of a Hemp Concrete Wall." In *Advanced Buildings Skins ABS*, Bern, Switzerland.
- Costantine, Georges, Chadi Maalouf, Elias Kinab, and Guillaume Polidori. 2017. "Numerical Investigation of the Hygrothermal Behaviour of a Hemp-Concrete Room: Hysteresis Effect of the Sorption Isotherm and Its Temperature Dependency." In *Building Simulation*, San Francisco, United States.
- Kazkaz, Mohammad, and Milan Pavelek. 2013. "OPERATIVE TEMPERATURE AND GLOBE TEMPERATURE." *Engineering MECHANICS* 204(3): 319–25.
- Nuytens, Anne-Marie. 2017. *Production, Transformation et Utilisation Des Matériaux Biosourcés Pour La Construction : Quelles Actions de La Région Ile-de-France?* http://www.ceser-iledefrance.fr/sites/default/files/travaux/avis_materiaux_biosources_ceseridf_20171213.pdf
- Olesen, B. W. 2004. "International Standards for the Indoor Environment." *Indoor Air* 14(s7): 18–26.
- Tran Le, A.D. et al. 2010. "Transient Hygrothermal Behaviour of a Hemp Concrete Building Envelope." *Energy and Buildings* 42(10): 1797–1806.

6. REMERCIEMENTS

Ce travail est financé par la région Champagne-Ardenne (FEDER) et cofinancé par le bailleur social le « Foyer Rémois ». L'Europe s'engage en Champagne-Ardenne avec le FEDER.

Arrivée massive des capteurs communicants à basse consommation et bas coût au sein des bâtiments : vers de nouveaux services aux occupants

Benoit Delinchant^{1*}, Frédéric Wurtz¹, Stéphane Ploix², Dinh Van Binh¹

¹ Univ. Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP, **G2Elab**, 38000 Grenoble, France

² Univ. Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP, **G-SCOP**, 38000 Grenoble, France

*benoit.delinchant@G2Elab.grenoble-inp.fr

RESUME. L'Internet des objets est synonyme d'augmentation de la quantité de mesures et de l'accessibilité de ces mesures. Comment cette croissance impressionnante est-elle possible ? Comment se positionner par rapport à de l'instrumentation de précision alors que ces capteurs à bas coût se généralisent ? Nous analysons de quelles technologies ces objets connectés sont issus et quelles tendances sont prévisibles. Nous illustrons notre propos par l'expérience acquise au sein de la plateforme Monitoring et Habitat Intelligent (Predis-MHI) à Grenoble

MOTS-CLÉS : Internet des Objets, Monitoring, Analyse de données

ABSTRACT. The Internet of Things (IoT) is synonymous of increase of the amount and accessibility of measurements. How is this impressive growth possible? How to position accurate scientific instrumentation as these low-cost sensors become more widespread? We analyze what technologies these IoT came from and what tendencies are predictable. We illustrate our comments on the experience acquired within the Monitoring and Intelligent Habitat platform (Predis-MHI) in Grenoble

KEYWORDS : Internet of Things, Monitoring, Data analysis.

1. INTRODUCTION

Les bâtiments sont de plus en plus monitorés, dans un simple but de suivi, de régulation, de sécurité, de diagnostic, pour aller jusqu'au pilotage intelligent. Mais deux choses viennent révolutionner cette approche maintenant devenue classique.

La première vient de la multiplication des objets connectés, qu'ils proviennent de la maison intelligente ou de la sécurité connectée, ainsi que des objets portés par les occupants, utilisés par exemple pour le « quantified self » ou la santé connectée. Grâce à l'intégration des capteurs physiques dans des filières de production de masse issues de la micro-électronique, un capteur numérique associé à un système de communication sans fil coûte moins de 2€¹. De plus, les technologies de récupération d'énergie permettent d'alimenter ces capteurs les rendant autonomes, faciles à installer, mais aussi sans intervention. L'interaction avec l'occupant (via le smartphone ou autre interface utilisateur) génère également des données riches sur leurs préférences. La tendance est donc à la multiplication de mesures au sein de l'habitat.

La deuxième vient de l'accès à ces données, car bien que provenant d'équipements hétérogènes, communicants dans des protocoles différents, ils bénéficient de concentrateurs (box domotique) permettant d'intégrer les différentes technologies de manière agnostique [Abram 2014]. Un nano-ordinateur (type *raspberry pi*) permettant de centraliser ces mesures, de les traiter et de les archiver localement coûte moins de 50€. Des solutions open sources ont depuis plusieurs années montré leur pertinence.

Le nombre et l'accessibilité de ces données ouvrent de nouvelles voies de recherche et de développement, en lien avec le métier de *Data Scientist* qui a progressé de 1500%² ces 3 dernières années. Il est ainsi possible d'exploiter des algorithmes ayant montré leur performance sur des données issues de simulation, des algorithmes « d'intelligence artificielle » permettant de construire [Chen 2017] ou recalibrer des modèles anticipatifs in situ [Nguyen Hong 2017].

¹ <https://www.fais-le-toi-meme.fr/fr/electronique/materiel/esp8266-arduino-wifi-2-euros>

² Source : France info

Le nombre et l'accessibilité de ces données nous permettent aussi d'envisager des changements radicaux dans la création de services et la mise à disposition d'outils au service du confort et de l'efficacité énergétique au sein des bâtiments. Grâce à la multiplication des capteurs, il est possible d'accéder à des grandeurs complexes à mesurer comme l'occupation par corrélation de multiples sources d'information, de réduire les incertitudes (e.g. redondance, valeur moyenne), d'accéder à des grandeurs distribuées spatialement (e.g. température), etc.

2. INTRODUCTION MASSIVE DE CAPTEURS

2.1. BILAN ET PROSPECTIVE DE L'IOT

La multiplication des objets connectés est un fait. Selon l'IDATE³ (Institut de l'audiovisuel et des télécommunications en Europe), il y aurait 11,2 milliards d'objets connectés dans le monde en 2017 contre 4 milliards en 2010. Les marchés qui exploitent ces objets connectés sont l'agriculture, l'industrie, l'automobile, la logistique, le transport, le commerce, le sport, la santé, et bien sûr le smart home et la smart city. Le taux de croissance est d'environ 10% par an, ce qui devrait conduire à un parc de 35 milliards d'unités connectées en 2030, 4 fois plus que la population mondiale.

D'une manière générale, les technologies de communication utilisées en IoT s'appuient sur les standards sans fil tels que Wifi et Bluetooth pour une communication courte distance, ce qui devrait rester également le cas dans les 10 prochaines années, malgré une consommation assez importante en raison des débits de données offerts (*Figure 1*). Les technologies bas débit et longue distance LPWA (Low-Power Wide-Area) telles que LoRa et Sigfox sont en forte progression et adressent très bien le domaine de la smart city. Mais c'est l'IoT cellulaire (via les normes nouvelles normes⁴ NB-IOT, LTE-M) qui devrait connaître la plus forte croissance avec plus de 55% par an d'ici 2030³.

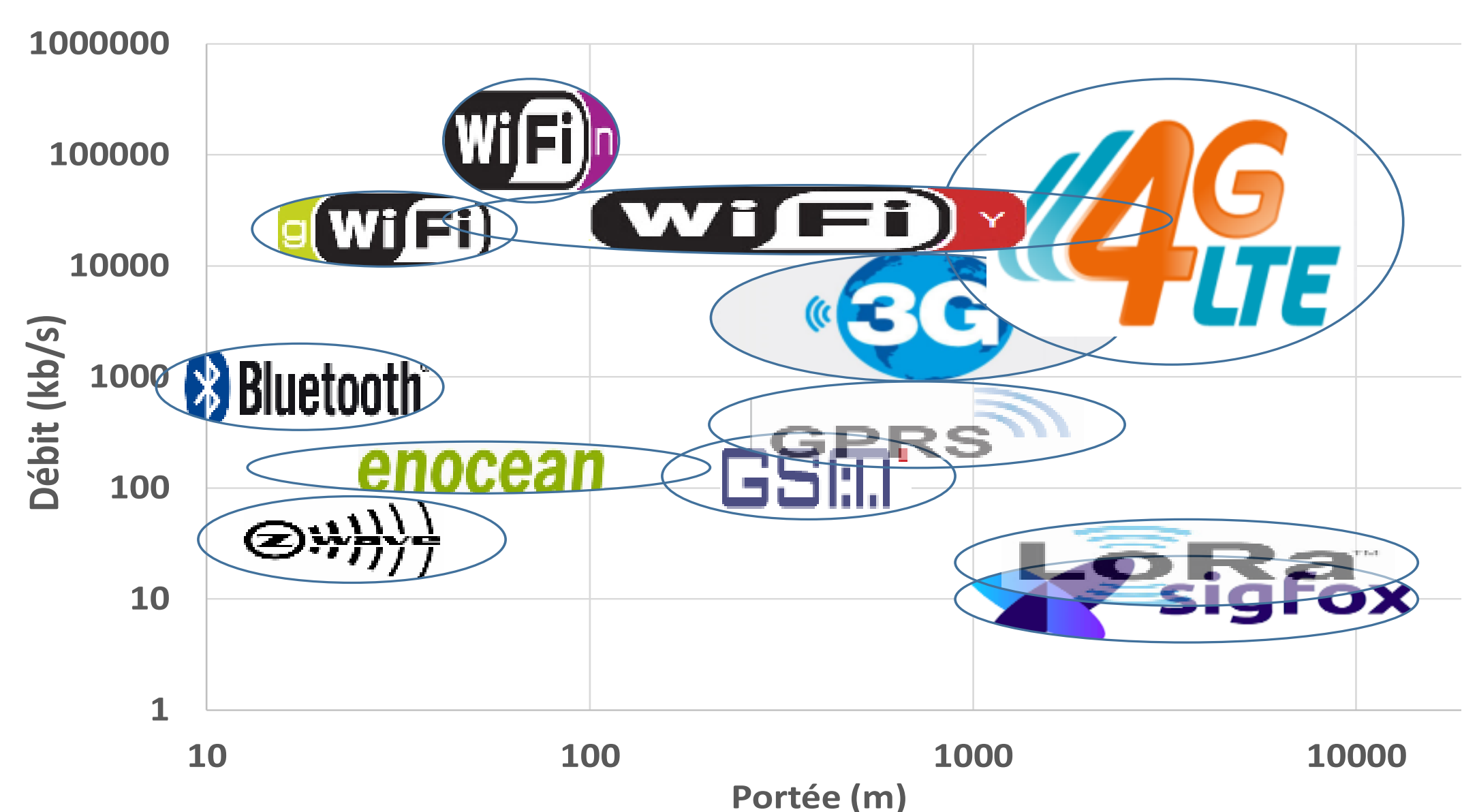


Figure 1: Portée/Débit des principaux protocoles RF

Dans cette course aux technologies, il est parfois difficile de cibler les technologies les mieux adaptées au domaine du Smart-Building. L'expérience que nous avons acquise par l'utilisation depuis une dizaine d'année de ces technologies dans le cadre de la plateforme de recherche et d'enseignement Predis-MHI⁵ (Monitoring et Habitat Intelligent), nous permet aujourd'hui de proposer quelques recommandations et des tendances vis-à-vis des objets connectés.

2.2. TECHNOLOGIES DE COMMUNICATION FILAIRES ET SANS FIL POUR LE SMART BUILDING

Le bâtiment « intelligent » s'appuie sur la remontée locale d'information et va donc plutôt cibler des solutions de communication de faible portée de type LAN (Local Area Network), voire WLAN (W pour Wireless). En effet, le « sans fil » est sans conteste la solution de l'IoT. Malgré tout, le bâtiment conserve les solutions classiques de GTB (Gestion Technique du Bâtiment), qui elles, sont encore majoritairement filaires car installées dès la phase de conception des bâtiments. On trouve dans le domaine industriel, commercial et tertiaire des protocoles « de terrain » tels que DALI (spécialisé dans l'éclairage), MODBUS (générique, simple et très répandu), KNX (générique mais dédié au petit tertiaire) ainsi que des protocoles de plus haut niveau tels que LON et BACNET pour la remontée des données dans une architecture centralisée pour des bâtiments relativement importants. Ces protocoles sont généralement ouverts et permettent l'interopérabilité entre différents systèmes via des passerelles. Dans les habitations, on retrouve du « sans fil », mais les solutions sont

³ <https://fr.idate.org/marche-iot-2018/>

⁴ <http://www.lemag-numerique.com/2016/10/nb-iot-nouvelle-norme-a-conquete-de-linternet-objets-9452>

⁵ <http://predis.grenoble-inp.fr/>

souvent propriétaires (DeltaDore avec X3D, Somfy avec io-homecontrol, etc.) et donc plus difficiles à faire interopérer avec d'autres solutions sans accord entre les fournisseurs de solutions. En parallèle de ces entreprises ayant pignon sur rue, le domaine de la domotique « libre » est en plein boom, en particulier grâce à l'IoT. Ainsi des solutions plus ouvertes sont disponibles, s'appuyant sur des protocoles tels que ZigBee, EnOcean ou Z-Wave. Ces deux dernières technologies sont très répandues en France et de nombreux équipements sont disponibles à des coûts plus abordables que les solutions complètes propriétaires. Elles restent malgré tout encore cher, plus de 50€ pour un équipement communiquant standard.

2.3. RECUPERATION D'ENERGIE

La solution EnOcean a particulièrement bénéficié du fait qu'elle intègre des solutions de récupération d'énergie permettant d'alimenter ses capteurs les rendant autonomes et sans intervention. Il s'agit par exemple de l'interrupteur EnOcean PTM210 avec un récupérateur ECO 200 (Figure 2) qui par une conversion mécano-magnétique va générer une impulsion d'énergie électrique suffisante pour alimenter l'émission et la réception d'un signal radio fréquence.

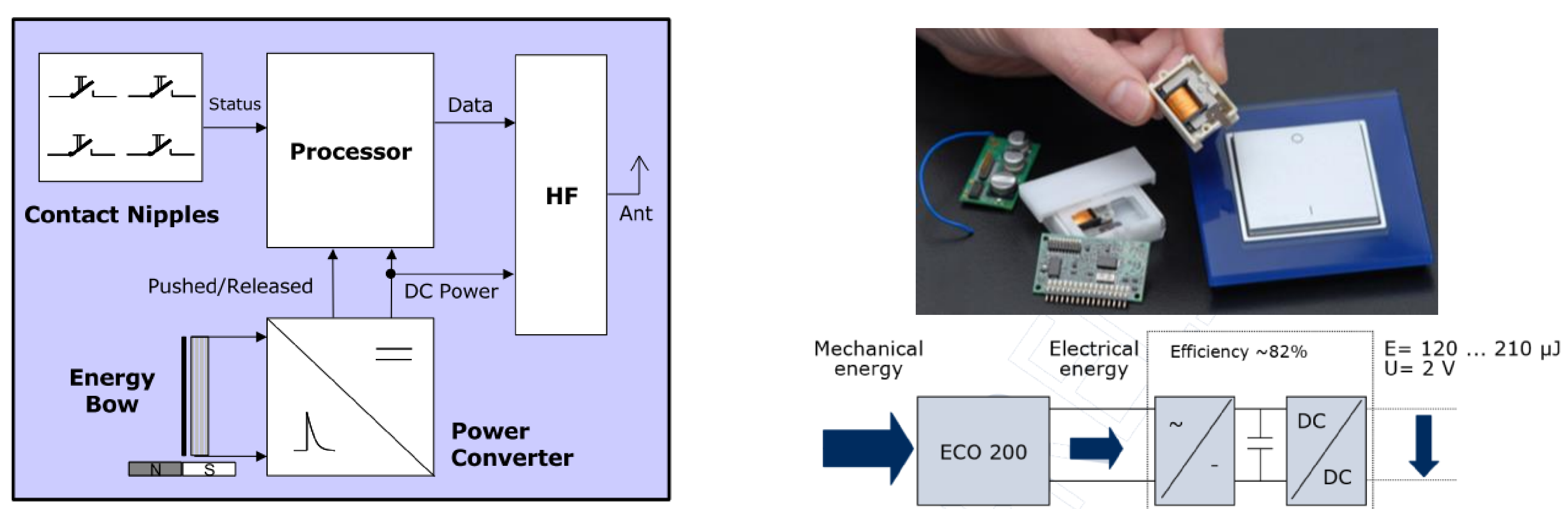


Figure 2: Récupération d'énergie mécanique EnOcean.

Pour le thermostat de radiateur EnOcean, l'effet Seebeck (inverse de l'effet Peltier) est utilisé pour transformer un gradient de température en tension électrique. Un module de conversion très basse tension (ECT 310) est alors nécessaire pour exploiter cette énergie pour transmettre le signal RF.

Dans ce domaine, la société Enerbee (www.enerbee.fr) issue du G2ELab, a développé une solution innovante de génération d'énergie à partir de tous types et vitesses de mouvements, avec comme application le confort et la qualité de l'air via l'aide au pilotage des systèmes HVAC.

Une récupération d'énergie plus classique est celle provenant du rayonnement lumineux par l'utilisation de cellules photovoltaïques intégrées au capteur. Il s'agit par exemple des mesures de température et humidité EnOcean (Figure 3) ou de l'anémomètre Z-Wave (Figure 4).

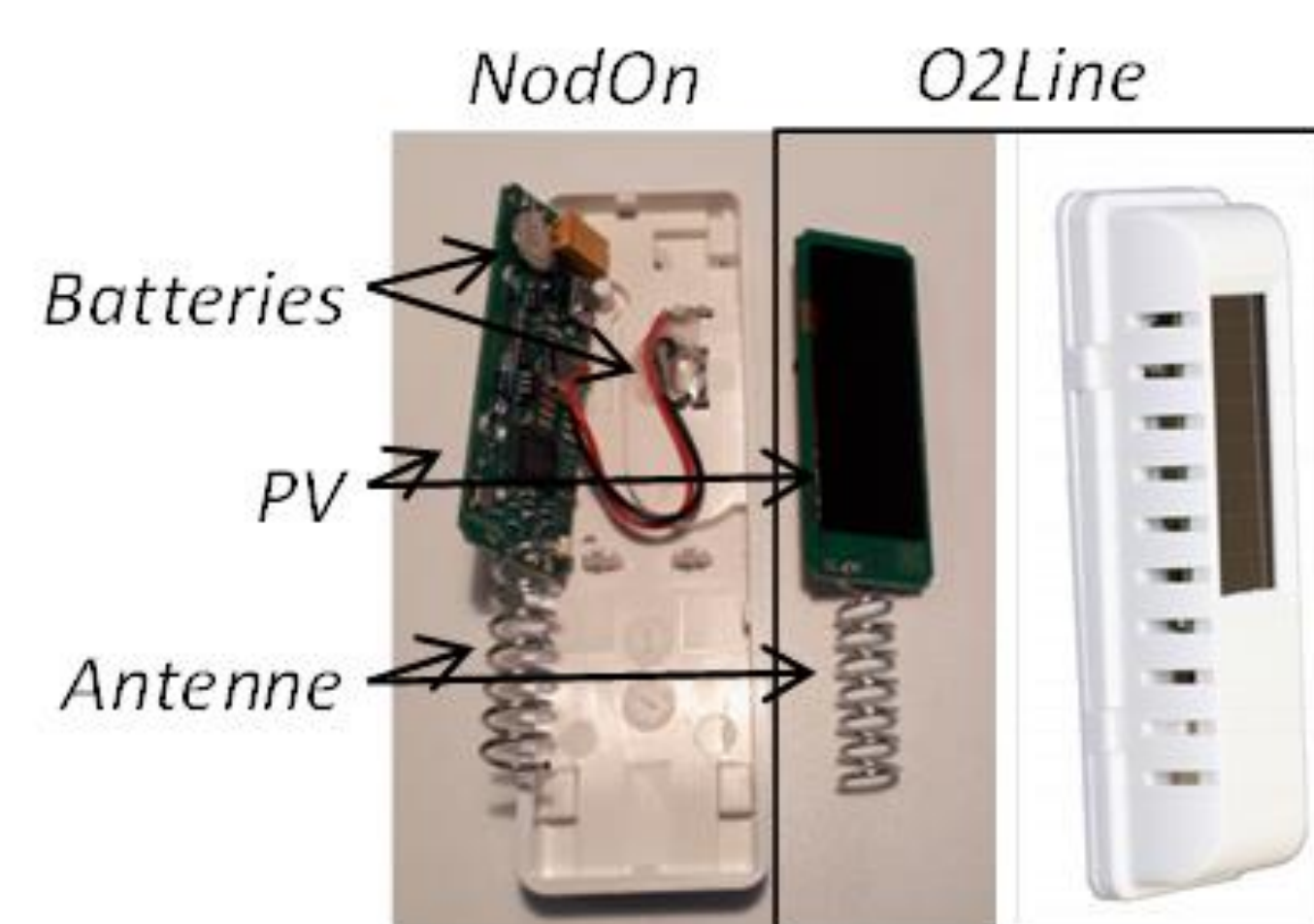


Figure 3: Température et humidité EnOcean - Photovoltaïque

Ces solutions d'alimentation sans batterie posent quelques difficultés sur le terrain. Concernant le capteur de température, il est nécessaire pour le modèle O2Line d'avoir une luminosité moyenne supérieure à 100Lux (soit > 300 Lux, 8h par jour). Or certaines zones des bâtiments sont particulièrement sombres comme les circulations. Ainsi, nous avons pu constater dans nos premières installations, des manques de données durant la nuit. C'est pourquoi nous recommandons d'utiliser des versions avec batteries comme avec le modèle NODON (Figure 3).

Des gestions intelligentes de l'énergie peuvent être mises en place comme c'est le cas du module anémomètre Z-Weather de POPP, avec une émission de donnée beaucoup plus réduite la nuit (Figure 4). De plus, pour limiter la quantité de données envoyées, la vitesse de vent est codée sur très peu de bits avec une mauvaise résolution de 1m/s. En réalité, il aurait été préférable de dimensionner la cellule PV et un stockage

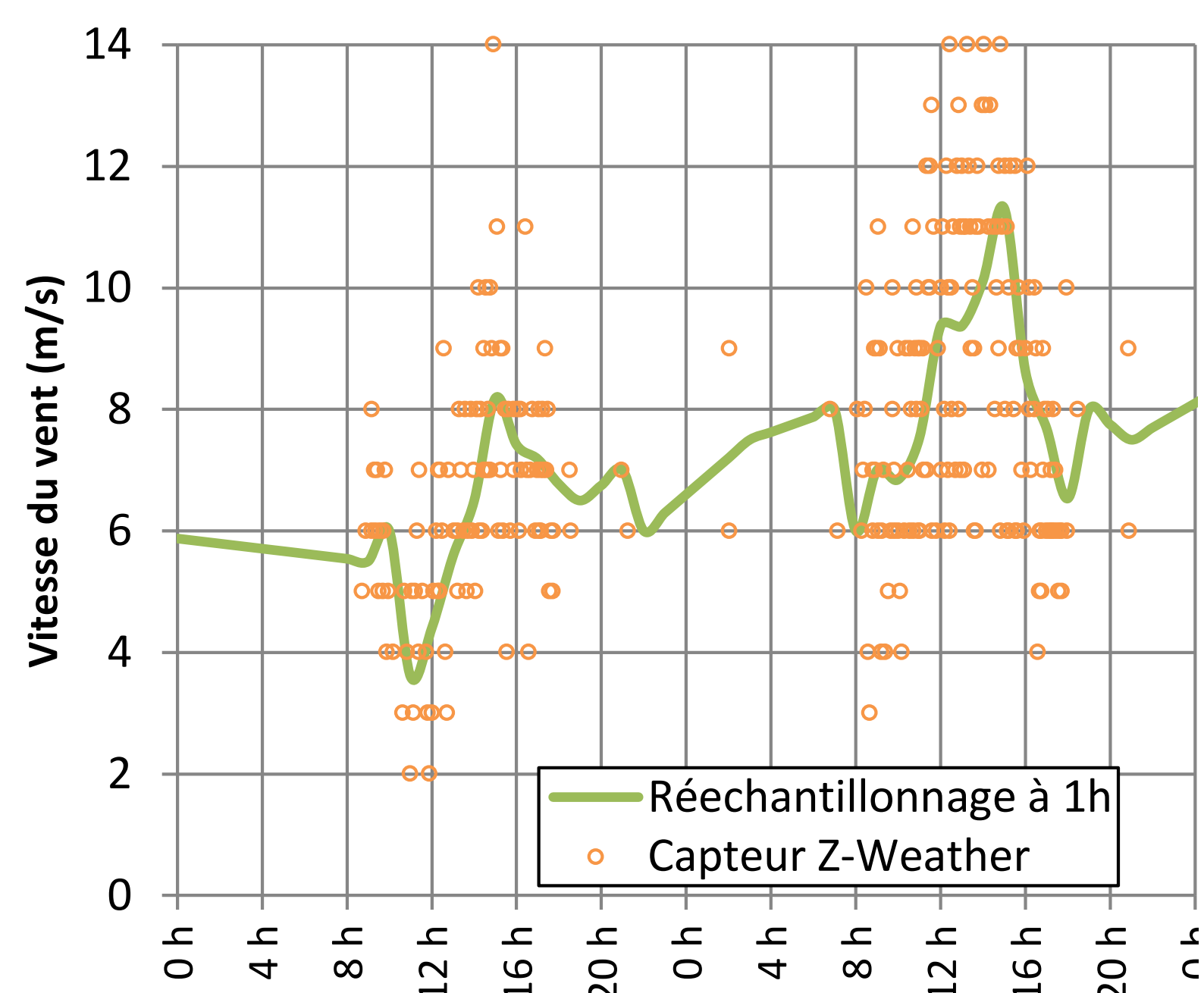


Figure 4: Mesures anémomètre reconstruction des données manquantes.

des piles. Par contre, il permet grâce à sa topologie maillée (Figure 5), d'étendre la portée des communications via des objets connectés (eg. prises *Fibaro Wall Plug*) servant de répéteur.

2.4. BLUETOOTH LOW ENERGY ET WIFI

Les deux solutions précédentes (EnOcean et Z-Wave) sont intéressantes dans le cadre d'un réseau de capteurs. D'un autre côté, les objets connectés ne sont pas nécessairement destinés à s'insérer dans un tel réseau, mais peuvent simplement être connectés à Internet via le Bluetooth vers le téléphone qui utilisera son réseau mobile (4G), ou via le Wifi vers la box domotique qui utilisera l'ADSL ou la fibre. Des solutions intégrant ce type de communication deviennent très abordables avec la montée en puissance de l'IoT et annoncent de faibles consommations au regard des débits offerts.

Par exemple, le NRF52 de Nordic Semiconductor (Figure 6) est basé sur un processeur ARM Cortex-M4 intégrant un transmetteur 2.4GHz permettant la communication en Bluetooth Low Energy (BLE), ainsi que le protocole Thread, annoncé comme le futur protocole pour l'IoT mais qui n'a pas encore décollé en raison d'une procédure de certification qui a tardée à se mettre en place.

De son côté, la société Chinoise Espressif propose l'ESP32 (environ 5€), une solution plus puissance (double coeur cadencé à 240MHz adossé à 4MB de mémoire flash) intégrant en plus du BLE, le Wifi et une puce cryptographique prenant en charge les dernières normes de sécurisation des données.



Figure 6: Puce nRF52 et son antenne de communication, voire de récupération d'énergie ambiante.

Les produits connectés Netatmo, société Française qui propose un thermostat connecté, une station météo, ainsi qu'un système de sécurité par reconnaissance de visage, utilisent ce principe de communication. Le produit est d'abord connecté en Bluetooth au téléphone, puis après sa configuration, il se connecte au wifi et transmet ses données au serveur de la société. Les données sont consultables par application smartphone, et par site web. La Figure 7 illustre l'interface web du thermostat avec une relancer à distance et des relances par apprentissage.

permettant d'assurer la transmission des mesures plus fréquemment car la reconstruction des données manquantes est de très mauvaise qualité.

Finalement, EnOcean est une solution intéressante au regard de sa faible consommation et son autonomie grâce à la récupération d'énergie. Z-Wave consomme plus d'énergie et nécessite une alimentation secteur ou un changement régulier

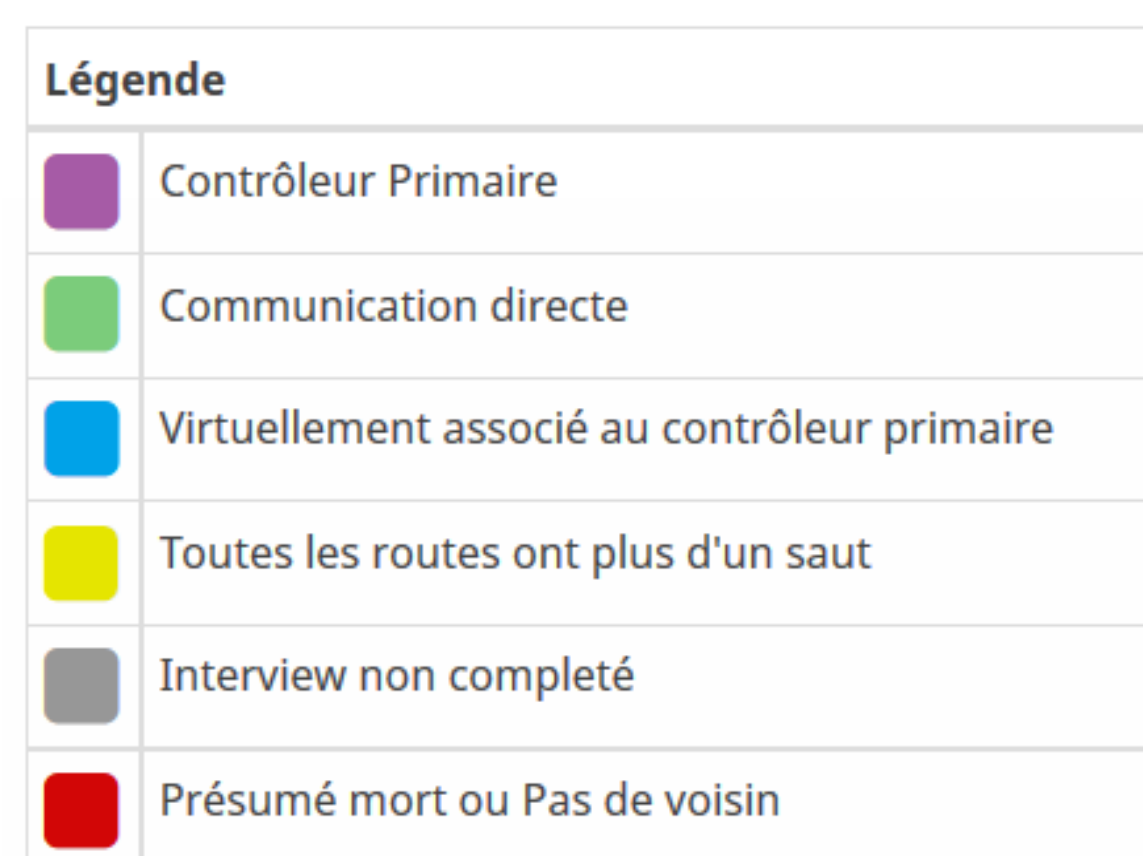
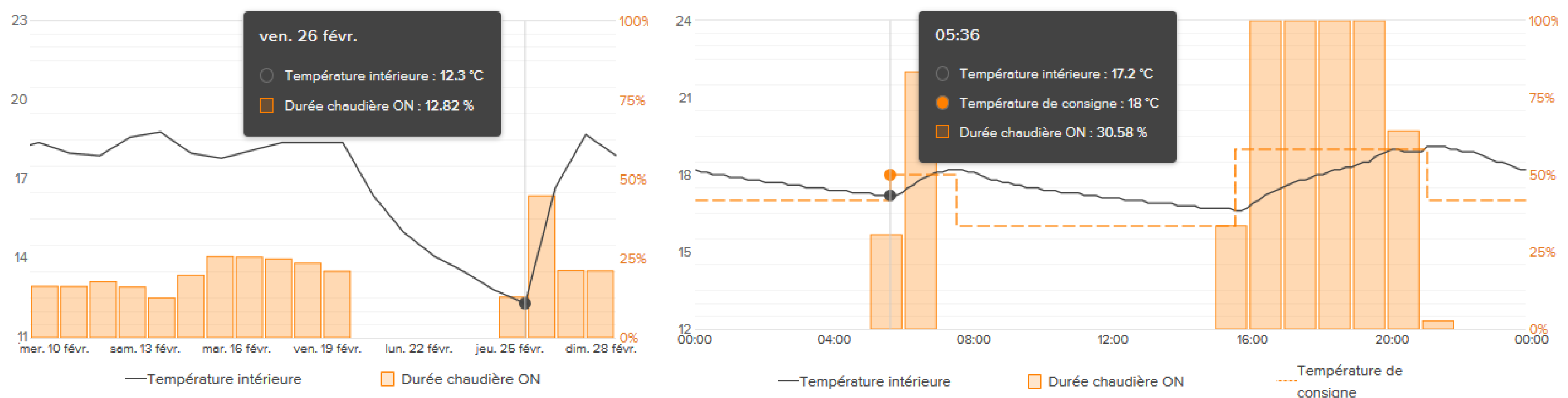


Figure 5: Maillage entre nœuds du réseau Z-Wave.



(a) sur 1 mois avec relance à distance au retour des congés (b) sur 1 journée avec relance par apprentissage
 Figure 7: Données du thermostat Netatmo consultées sur le serveur Internet

2.5. ACCÈS AUX DONNÉES CAPTEURS

Nous venons de voir que les données Netatmo sont consultables depuis un serveur distant. Les données sont remontées automatiquement depuis les capteurs en Wifi et sont accessibles tant que l'entreprise maintient le service. Mais les données sont aussi disponibles via des API (Application Programming Interface), la société propose d'ailleurs l'environnement Netatmo Connect (dev.netatmo.com) pour que chacun puisse développer des applications exploitant ces capteurs. Le propriétaire de l'objet connecté peut alors donner un accès à ses données pour une application tierce et bénéficier de nouveaux services.

Il est important de connaître les possibilités d'accès aux données des systèmes connectés qui apparaissent sur le marché. La première précaution concerne la propriété des données qui doit rester au propriétaire de l'objet connecté, et qui doit jouir de tous les droits, dont la suppression de celles-ci. Ensuite, la sécurisation des données, si celles-ci sont disponibles sur un serveur, elles doivent être accessibles par des accès sécurisés, ne pas être rendues publiques, et si des accès sont autorisés, connaître les traitements et objectifs de ces traitements.

Une autre architecture permet de conserver ses données localement avec la possibilité ou non de les exposer sur Internet. La difficulté est alors d'administrer le système d'information, mais de plus en plus de solutions apparaissent au grand public. On pourra citer Synology comme fournisseur de solution NAS (Network Attached Storage) très abordable et parfaitement à la portée de non informaticiens. Les objets connectés doivent alors être raccordés à ce concentrateur, qui doit donc communiquer dans l'ensemble des protocoles en présence, et disposer d'équipements physiques support de la communication. Classiquement, un module (carte d'extension ou clé USB) est nécessaire par protocole, d'où la nécessité de limiter le nombre de protocoles dans une même installation pour faciliter l'interopérabilité.

Ce concentrateur doit ensuite disposer des couches logicielles permettant de coder/décoder les trames de communication transmises vers/par les périphériques de communication. Cette couche peut être fournie avec le périphérique, disponible en open source (OpenZWave), ou réimplémentée dans des environnements spécifiques. C'est le cas par exemple avec 2 environnements libres très répandus (OpenHab et Jeedom⁶) où le driver EnOcean est réimplémenté (*EnOcean Binding pour OpenHab*, *EnOcean Plug'in pour JeeDom*). La fonctionnalité principale de ces environnements est d'intégrer les différentes technologies de manière agnostique [Abrams 2014] afin de les traiter par la suite de manière indépendante de la chaîne de communication. Ils permettent généralement d'interagir directement avec le système en lecture/écriture (capteur/actionneur), d'archiver les données dans des bases de données, et de les visualiser.

3. NOUVEAUX SERVICES AUX OCCUPANTS

Nous illustrons maintenant quelques nouveaux services aux occupants, en nous appuyant sur le bâtiment GreEn-ER (**G**renoble **E**nergie – **E**nseignement **R**cherche) et la plateforme Predis-MHI. GreEn-ER est un bâtiment qui accueille notamment le G2ELab et l'école d'ingénieur « Energie, Eau et Environnement » (Grenoble INP ENSE³). En quelques chiffres, il s'agit d'un bâtiment de 6 étages avec 4500 m², 2000 personnes accueillies, dont 1500 étudiants.

⁶ www.openhab.org / www.jeedom.com

3.1. LES SYSTEMES DE GESTION TECHNIQUE DU BATIMENT

La GTB (Gestion Technique du Bâtiment) est disponible de facto dans les bâtiments neufs, mais aussi dans les bâtiments rénovés. Elle agrège en particulier un ensemble plus ou moins important de capteurs et d'actionneurs au travers d'une supervision. La GTB de GreEn-ER est composée de 1125 points de mesures réalisés à la construction en 2015. En complément, des capteurs sans fil ont été ajoutés au fur et à mesure de nouveaux besoins, avec 2 architectures complémentaires, une solution libre et ouverte avec Jeedom pour les projets en cours de développement, et une solution VestaEnergy⁷, pour tester et déployer des solutions professionnelles intégrant de la gestion intelligente de l'énergie.

Afin de rendre ces solutions interopérables, nous avons développés des couplages par des web-services. Un web-service offre un moyen d'interagir avec des codes informatiques à un très haut niveau d'abstraction, indépendamment des systèmes d'exploitation, des langages de programmation, et de la localisation des équipements, à partir du moment où ils sont connectés à Internet. Cette technologie des web-services nous permet également d'être interopérables avec les modèles de simulation thermiques dynamiques et les moteurs d'optimisation [Delinchant 2013][COSIMPHY 2018].

3.2. EXPLOITATION DES DONNEES

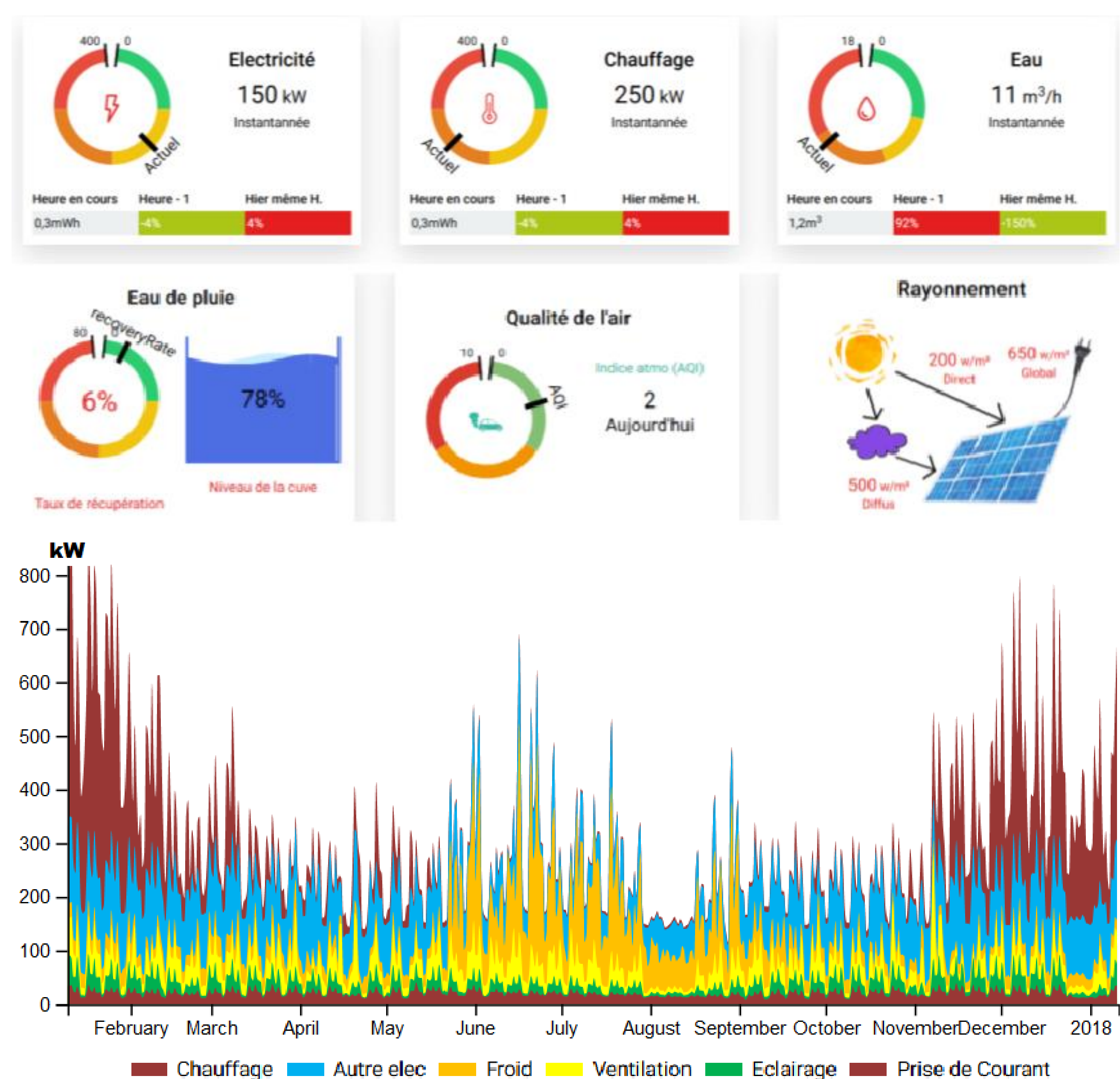
Les données sont accessibles depuis différents niveaux, depuis l'exploitant du bâtiment jusqu'aux occupants. Une application smart phone a été développée afin d'informer et d'interagir avec les occupants sur des notions liées à l'énergie, le confort ou l'environnement (

Figure 8). Cette approche qui vise à mettre l'occupant dans la boucle [Wurtz 2017] (via le smartphone ou autre interface utilisateur) est également une source de données sur les préférences des occupants.

La zone Predis MHI⁸ est un *Living Lab* de 600m² au sein de GreEn-ER dédiée à la recherche en énergétique des bâtiments [Delinchant 2016]. Elle est lourdement instrumentée et

préfigure ce que pourront être les quantités de données recueillies dans les bâtiments futurs. Dans une zone bureau, une quinzaine de grandeurs liées au confort et à l'énergie sont observables. L'analyse des données commence par la mise en correspondances des grandeurs entre elles [Nguyen Hung 2016].

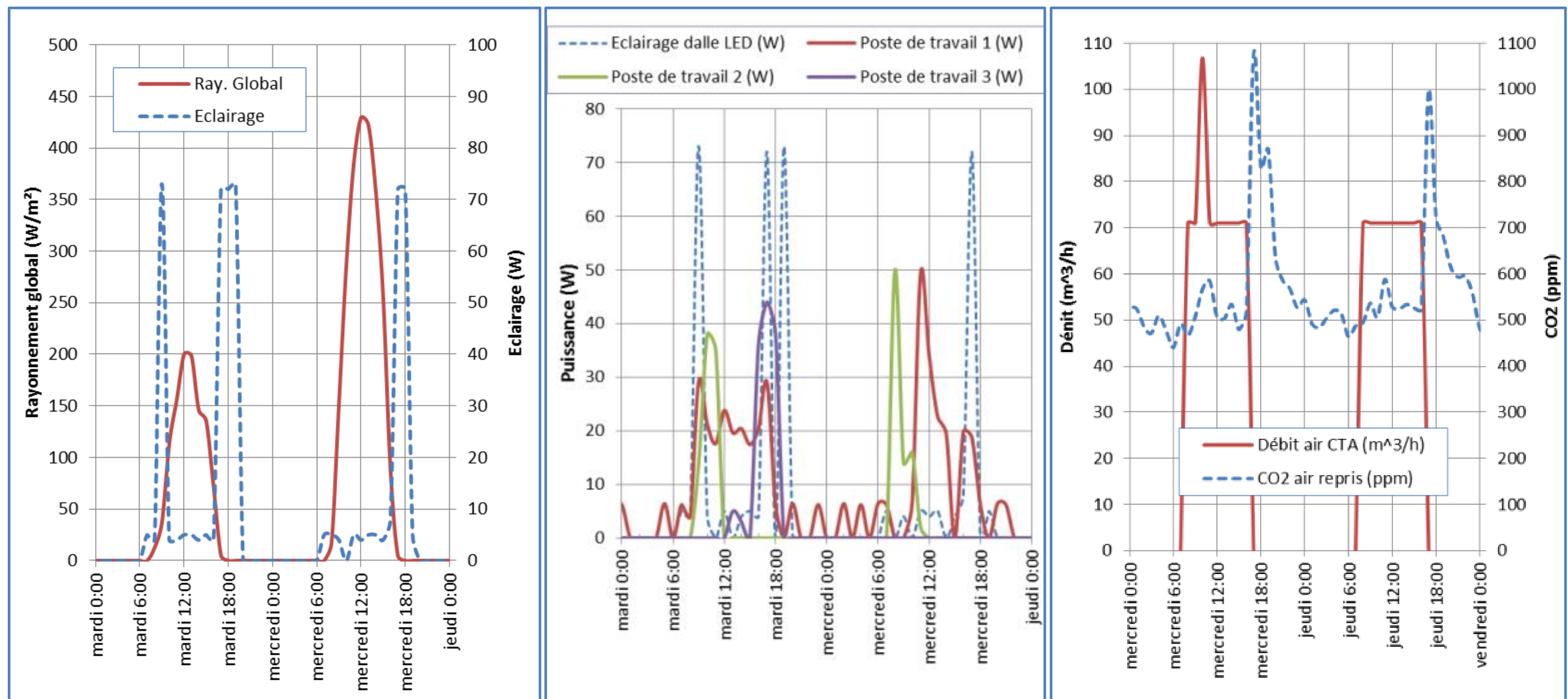
Les mesures tracées par des séries temporelles dans les 3 figures suivantes (Figure 9) nous informent en particulier sur l'occupation et les apports internes liés aux usages.



⁷ <https://www.vesta-system.fr/fr/produits/vestaenergy/gestion-previsionnelle/>

La société VestaSystem est issue des laboratoires G2ELab et G-SCOP

⁸ <http://predis.grenoble-inp.fr/smartbuilding>



(a) rayonnement / éclairage (b) consommations liées à l'occupation (c) ventilation et taux de CO₂
 Figure 9: Correlations des grandeurs mesurées dans un bureau de Predis-MHI

Le bilan thermique est obtenu via les mesures de températures et les apports thermiques (Figure 10).

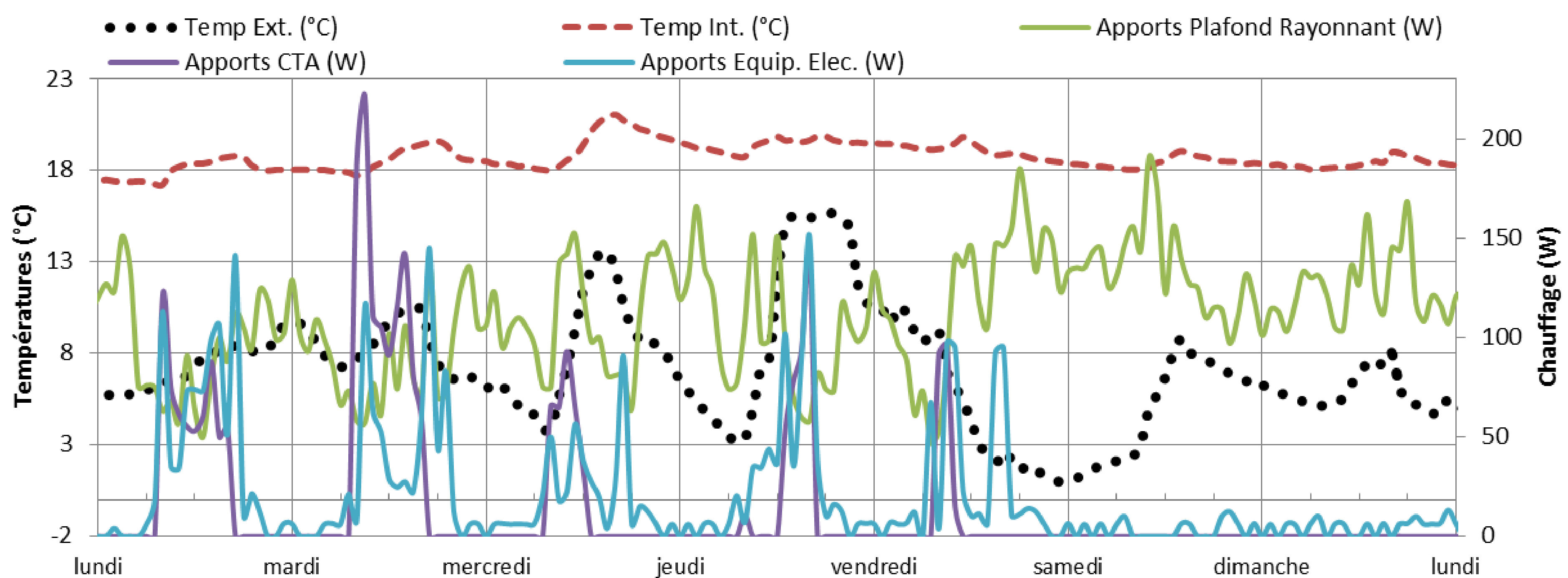


Figure 10: Bilan thermique du bureau (températures / chauffage) durant 1 semaine d'hiver.

Toutes ces mesures peuvent permettre de construire des indicateurs plus ou moins pertinents, en particulier par rapport au comportement des occupants et à leur présence [Amayri 2016]. Les capteurs embarqués sur les occupants eux même (Quantified self, Wearable devices) peuvent venir compléter ces informations jusqu'alors difficiles d'accès ou reconstruites et entachées d'incertitudes.

A partir d'informations reconstruites comme la présence, et un ensemble de mesure localisées dans chaque pièces, des modèles sont réalisables, soit par des algorithmes d'apprentissage de type « machine learning » [Achin 2017][Chen 2017] soit par des modèles physiques plus ou moins complexes, recalés en temps réel pour du pilotage anticipatifs in situ [Nguyen Quan 2017].

Outre ces mesures qui peuvent fournir une information très riche à des services de gestion du confort et de l'énergie, il apparait que la multiplication des mesures dans bâtiment, grâce à l'IoT peut conduire à de la redondance d'information. Cette redondance doit permettre en particulier de limiter les incertitudes de mesures issues d'équipements peu chers et non calibrés en réalisant une moyenne. Elle permet également de réduire les risques de perte de données auxquels les systèmes de monitoring sont parfois sujets. Il est ainsi possible dans les figures suivantes de comparer les mesures effectuées sur la consommation d'un poste de travail (Figure 11a), ou les températures à différents lieux du bureau (Figure 11b).

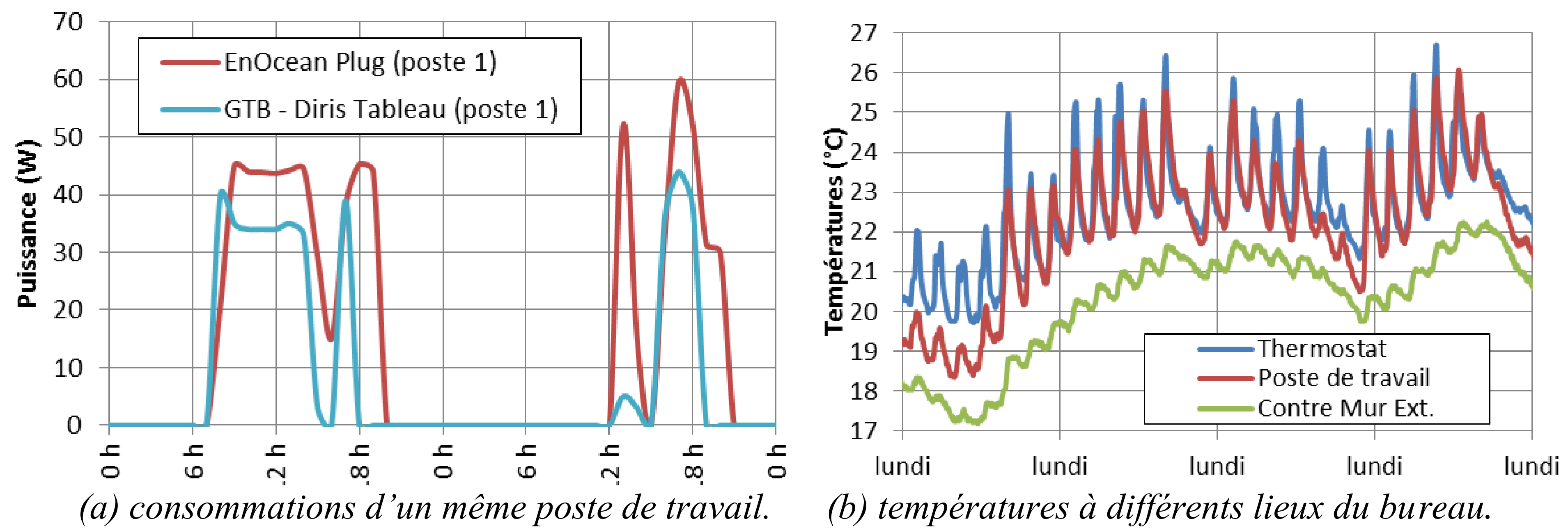


Figure 11: Exploitation des redondances de mesure

4. CONCLUSIONS

Nous faisons le constat d'une forte croissance du nombre de mesures accessibles en temps réel au sein des bâtiments et adossées aux occupants. Cette disponibilité est due aux technologies de transmission et d'alimentation de capteurs distribués, performantes énergétiquement, et de moins en moins cher. Bien que de nombreuses solutions technologiques hétérogènes perdurent, il est de plus en plus facile de les concentrer et de les historiser dans un but d'analyse. Les solutions locales ou distribuées d'accès aux données offrent chacune des avantages et inconvénients, et doivent garantir le respect de la propriété et de l'usage de ces données. Des services aux occupants et aux exploitants des bâtiments peuvent alors être développés, basés sur la mise en commun de ces données, leur analyse et la construction de valeur ajoutée.

5. BIBLIOGRAPHIE

- Abras Shadi, Calmant Thomas, Ploix Stephane, Delinchant Benoit, Wurtz Frederic, Mahendra Pratap SINGH, 2014 «Power Management of Laptops Batteries in Dynamic Heterogeneous Environments Using iPOPO », IBPSA, 20 - 21 mai 2014, Arras
- Amayri Manar, Arora Abhay, Ploix Stephane, Bandhyopadyay Sanghamitra, Ngo Quoc-Dung, Badarla Venkata Ramana, 2016 "Estimating occupancy in heterogeneous sensor environment", Energy and Buildings, Volume 129, 2016, Pages 46-58,
- Chen Yize, Shi Yuanyuan, Zhang Baosen, 2017 "Modeling and Optimization of Complex Building Energy Systems with Deep Neural Networks", Asilomar Conference 2017
- COSIMPFI: J-B Videau, B Delinchant, A Raad, L Cornez, R Wrona, M Thorel, E Bozonnet, S Bailhache, G Sibiude, « Vers une cosimulation multi-physique interactive – le projet COSIMPFI », IBPSA 2018
- Delinchant B., P.Y. Gibello, F. Verdière, F. Wurtz, 2013 "Cloud computing services for the design and optimal management of buildings", IBPSA 2013, Chambéry 2013.
- Delinchant B., Wurtz F., Ploix S., Schanen J.-L. and Marechal Y. 2016. "GreEn-ER Living Lab - A Green Building with Energy Aware Occupants". SmartGreen, Rome 2016
- Nguyen Hung 2016 "Data collection for improved forecasting of the building management system at GreEn-ER", Bachelor Thesis, University of Hanoi, 2016
- Nguyen Quan, Audrey Le-Mounier, Van-Binh Dinh, Benoit Delinchant, Stéphane Ploix, Frédéric Wurtz. 2017 « Meta-Optimization and Scattering Parameters Analysis for Improving On Site Building Model Identification for Optimal Operation ». IPBSA, 7-9 August 2017, California, USA
- Wurtz F., Delinchant B. "Smart-Buildings" integrated in "Smart-Grids": a key challenge for the energy transition by using physical models and optimisation with a "human in the loop" approach, C.R. Physics (2017).

E2VENT : un module de façade active pour la rénovation de bâtiments résidentiels. Présentation du système intégré de stockage de chaleur.

Antoine Dugué¹, Paul Bonnamy¹, Alizée Navarro¹, Denis Bruneau²

¹ **Nobatek/INEF4, 64600, Anglet, France**

² **GRECCAU (EA 7482), F-33405 Talence, France**

*adugue@nobatek.inef4.fr

RESUME. Dans le cadre du projet H2020 E2VENT, un module de façade ventilée pour la rénovation de bâtiments résidentiels existants est développé. Il intègre dans son épaisseur d'isolant un système de renouvellement d'air avec échangeur double flux et un système de stockage de chaleur à base de matériaux à changement de phase appelé LHTES ici présenté. Après une phase de conception par itération s'appuyant notamment sur de la modélisation paramétrique, des prototypes ont été fabriqués, assemblés et testés en laboratoire. La méthode de conception, le design définitif du système et les essais en laboratoire réalisés en 2018, ici présentés, mettent en avant la performance énergétique du système.

MOTS-CLÉS : rénovation, MCP, stockage de chaleur

ABSTRACT. A large share of the suburban multi-storey residential building stock was built in the 60's-70's, and are characterized by very high energy consumption, low air quality due to poor ventilation, and low architectural value. In this context, the European project E2VENT developed a modular and adaptable ventilated façade retrofitting system that integrates two energy efficient HVAC systems in its insulation layer; one for the air renewal and the other one for the energy storage. This paper first presents the concept of the E2VENT module, its architecture and how it has been designed. Then the presentation focuses on the LHTES system, presenting its working principle, its thermal model and how it is designed in order to allow a daily thermal storage. The latest prototypes, assembled and tested in a laboratory and installed on the demo building in Burgos (Spain) are shown and the experimental protocol carried out for the energy performance evaluation presented and discussed.

KEYWORDS : Building façade retrofitting, PCM, Thermal energy storage, façade integration

1. INTRODUCTION

Alors que les nouveaux bâtiments peuvent être construits avec des niveaux de performance élevés, ce sont les bâtiments les plus anciens qui représentent la grande majorité du parc de bâtiments et qui sont principalement à faible efficacité énergétique et donc ceux qui nécessitent des travaux de rénovation. Le projet H2020 E2VENT vise le développement d'un module de façade ventilée pour la rénovation des bâtiments résidentiels. Les bâtiments visés sont caractérisés par une mauvaise isolation ainsi qu'une mauvaise qualité de l'air intérieur due à un renouvellement d'air mal maîtrisé et une esthétique de façade à améliorer. En plus du bardage extérieur en matériaux composites et de la lame d'air associée, le système E2VENT intègre plusieurs systèmes énergétiques dans l'épaisseur d'isolant :

- Un Smart Heat Recovery Unit (SMHRU) qui assure le renouvellement de l'air tout en limitant les pertes de chaleur associés à l'aide d'un échangeur à double flux.

- Un Latent Heat Thermal Energy Storage System (LHTES), système de stockage de chaleur à base de matériaux à changement de phase (PCM) permet le rafraîchissement semi passif
- Un système de pilotage qui contrôle les appareils en temps réel pour la maximisation de la performance globale
- Un système d'ancrage efficace qui limite les ponts thermiques et permet une installation facile

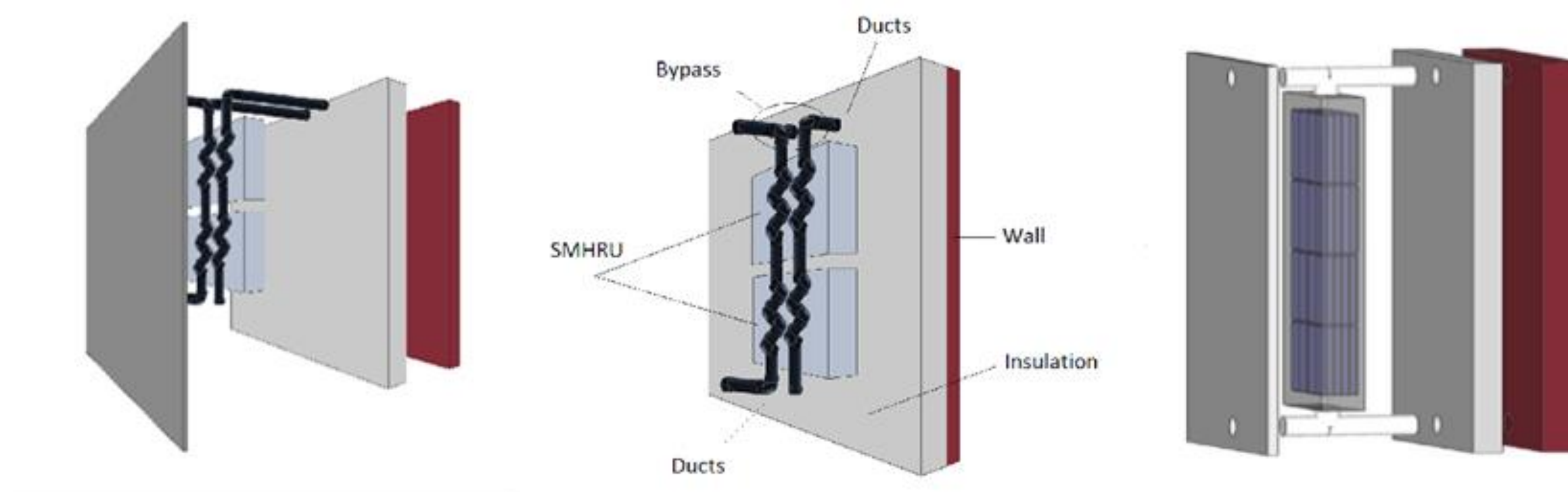


Figure 1 : Présentation du concept E2VENT. Gauche : module complet. Centre : SMHRU. Droite : LHTES

Le système de renouvellement d'air (SMHRU) fournira un renouvellement d'air dont le débit est déterminé par la réglementation et ensuite modulé par des capteurs CO₂ et d'humidité relative caractérisant la qualité de l'air intérieur. Le LHTES n'est donc pas conçu pour le renouvellement de l'air, mais seulement pour stocker l'énergie potentielle externe afin de l'utiliser pour le rafraîchissement. Par conséquent, il peut être vu comme un système complémentaire avec des performances élevées pour le chauffage et le refroidissement, visant en particulier à réduire les charges de pointe.

2. PRESENTATION DU LHTES

2.1. CONCEPT DE L'UTILISATION DE PCM POUR LE RAFRAICHISSEMENT

L'idée d'un système de stockage de chaleur latente est d'utiliser la basse température d'air extérieur la nuit pour cristalliser le PCM ; puis la journée, quand la température d'air intérieur est supérieure à la température de fusion, alors décharger le froid stocké dans les zones thermiques associées.

En 2003, une installation expérimentale d'un appareil LHTES a été construite à Beijing [1] et a été capable de fournir 400W - 600W pour 150 kg de PCM, le Coefficient de Performance (COP) global pouvait atteindre temporairement 40. Pour le free cooling dans un climat continental, il a été montré [5] qu'une température de fusion entre 20 et 22 ° C était optimale. Un tel système de refroidissement par air utilisant des PCM a été développé et installé dans les prototypes Napevomo et Sumbiosi des Solar Decathlon présentés par à Madrid en 2010 et 2012. Ce système de refroidissement d'air a été intégré à la maison sous le plancher, visible sur la figure 2. Les auteurs ont ensuite réalisé un certain nombre d'essais [3] et un modèle énergétique détaillé a été développé [4].

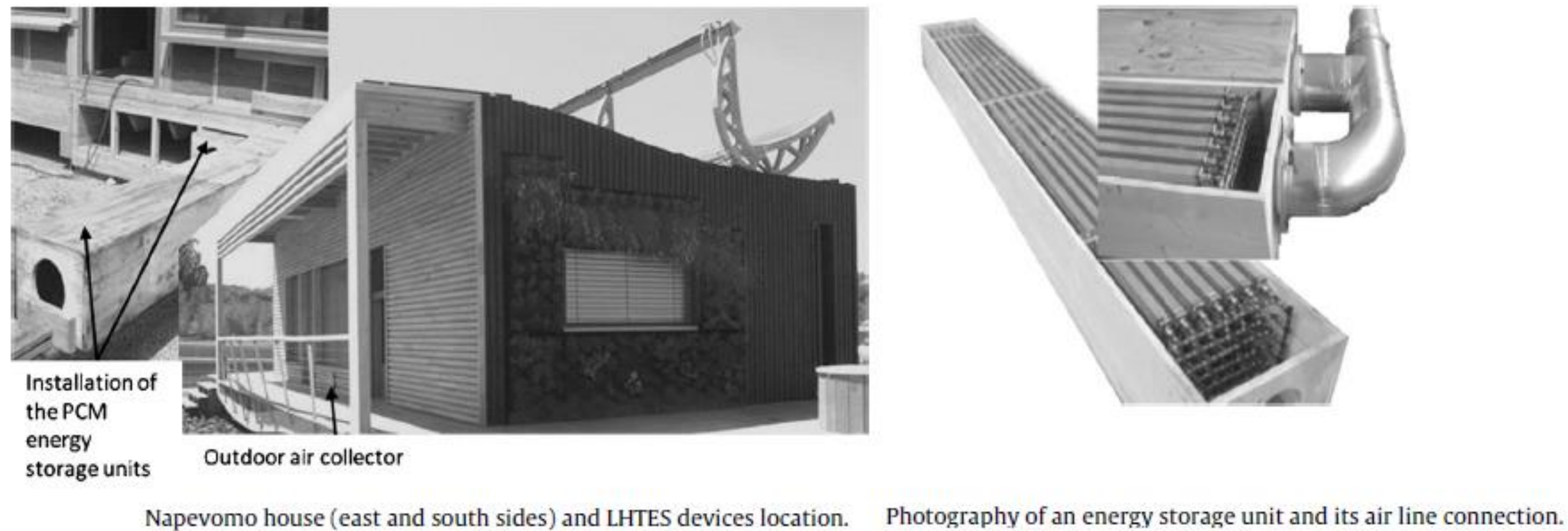


Figure 2 : Vue du prototype de LHTES dans Napévomo

L'objectif du projet E2VENT concernant le LHTES est de le placer dans la façade tout en maintenant son efficacité et d'améliorer son pilotage et en assurant une adaptabilité pour qu'il soit utilisé dans différentes régions d'Europe. Les critères liés à l'intégration dans la façade, à l'acceptation sociale et à la maintenance sont aussi importants que les critères techniques tels que l'efficacité globale et la couverture des besoins de refroidissement.

2.2. LE CONCEPT DU LHTES

Le LHTES est placé dans l'épaisseur de la couche d'isolant, et relié à la zone thermique associée par deux connexions, et à l'air extérieur avec deux autres connexions. Le boîtier du système est en matériau composite Etalbond et les PCM sont encapsulés dans des tubes en aluminium, éléments visibles sur la figure 3.

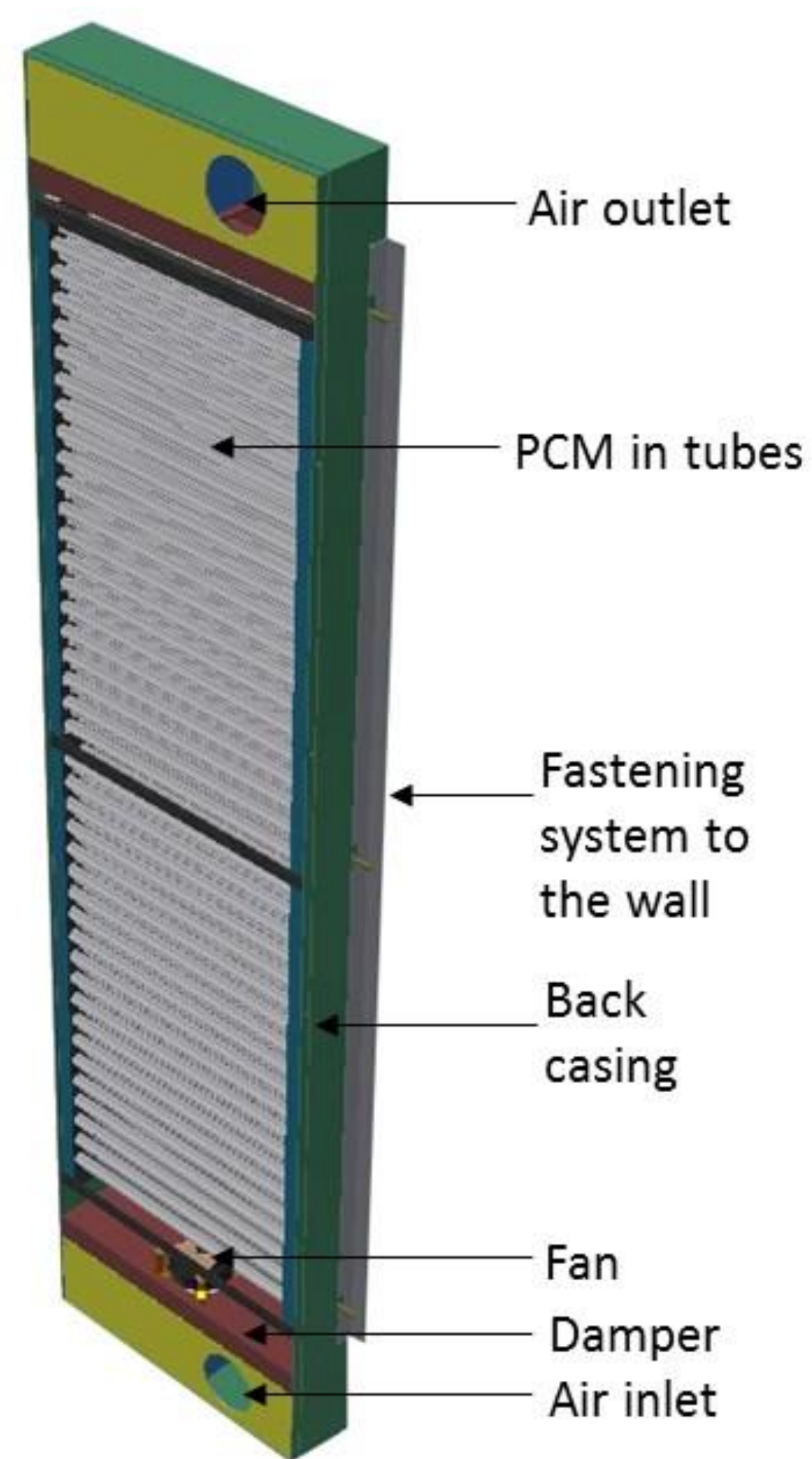


Figure 3 : Illustration des composants du système LHTES.

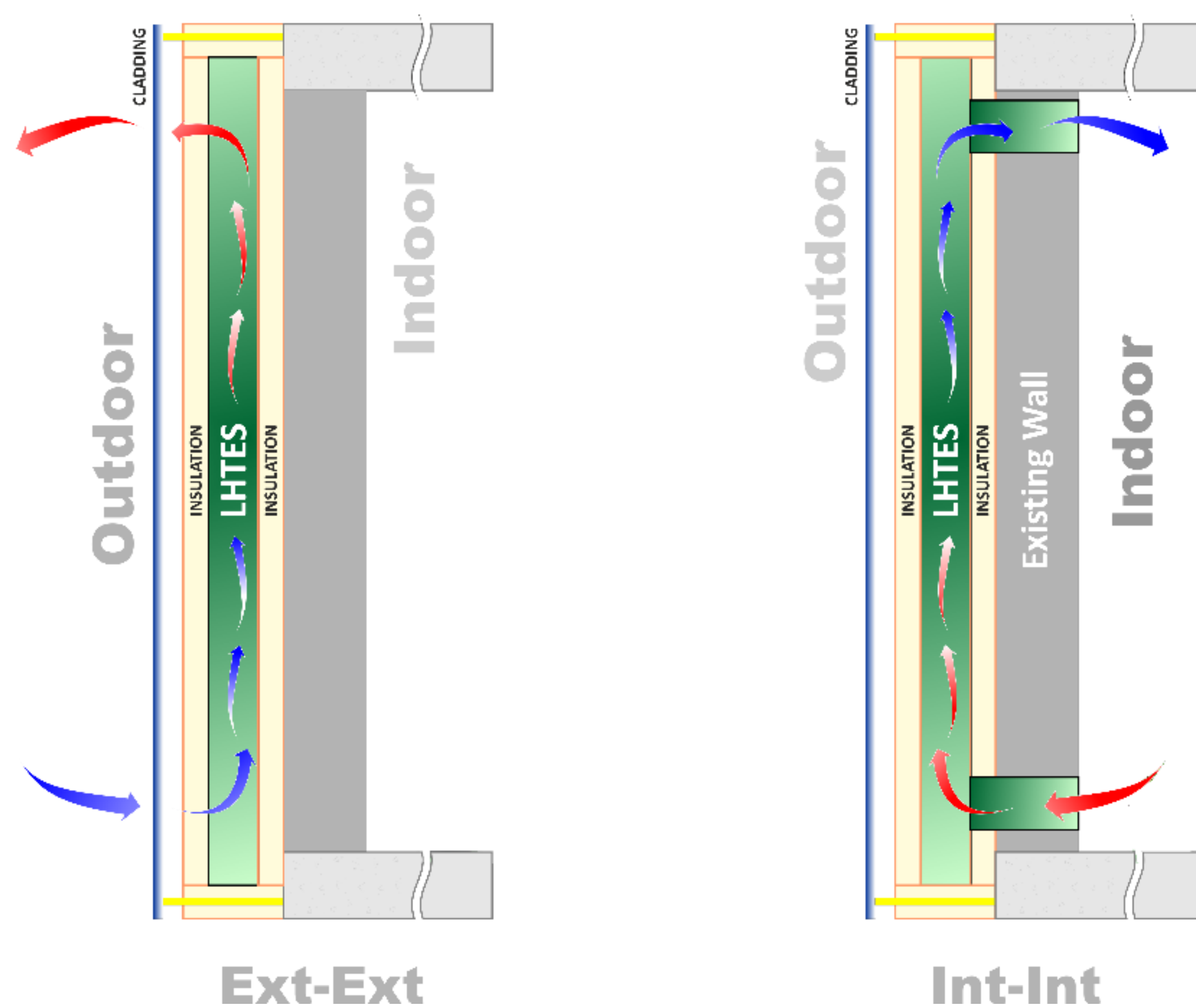


Figure 4 : Illustration de l'intégration du LHTES dans le mur et de ses 2 modes de fonctionnement

Le LHTES vise à stocker l'énergie pendant la nuit froide et à la décharger pendant la journée afin de refroidir la zone thermique associée, nécessitant alors trois modes de fonctionnement illustrés sur la figure 4, et présentés ici:

- EXT - EXT: qui correspond à la charge du système. L'air est prélevé de l'extérieur ou de la cavité d'air, traverse l'échangeur PCM / air et est renvoyé vers l'extérieur.

- INT - INT: correspond à la décharge du système. L'air intérieur est aspiré, circule dans l'échangeur à PCM du LHTES et est renvoyé dans le bâtiment. Le registre associé au ventilateur (figure 3) permet de passer de EXT EXT à INT INT

- Éteint: pas de mouvement d'air, le clapet permet d'assurer l'étanchéité

3. DESIGN ET DIMENSIONNEMENT DU LHTES

Une analyse du marché potentiel, des réglementations et des pratiques a été réalisée afin de définir le cahier des charges du système. La taille de la boîte est définie en fonction de considérations pratiques. Les supports pour l'ancrage du bardage limitent la largeur et le LHTES utilisera la hauteur entre deux étages pour être éventuellement fixé aux dalles bétons plus à même de tenir mécaniquement le système que les murs extérieurs. L'épaisseur maximale du système est définie à 16 cm de sorte que le LHTES peut être placé dans la couche d'isolant rapporté (ici, nous considérons 20 cm de laine minérale). Des couches d'isolant supplémentaires de 2 cm sont placées sur les faces arrière et avant de la boîte pour une isolation thermique mais aussi acoustique. Le débit du mode EXT - EXT peut être considéré sans limite au début, mais il est essentiel de limiter le débit INT - INT car il peut induire un niveau de bruit élevé et donc un inconfort.

3.1. TYPES DE PCM ET D'ENCAPSULATIONS

Les PCM commerciaux pris en référence pour les calculs sont les RT21, RT25 et RT28 de Rubitherm. Leurs caractéristiques sont données dans le tableau 1. Il existe même des paraffines biosourcées comme celle développée par Enerciel.

	Rubitherm RT21	Rubitherm RT25	Rubitherm RT28
Chaleur latente (J/kg)	180000	218000	235000
Densité liquide (kg/m ³)	770	770	770
Capacité thermique (J/kg/K)	2000	2000	2000
Conductivité (W/m/K)	0.6	0.2	0.2
Température de fusion (°C)	19-23	22-25	26.5-28.5

Tableau 1 : Présentation des caractéristiques des différents types de PCM

Trois encapsulations différentes du PCM ont été considérées pour l'échangeur de chaleur. Les plaques rectangulaires fabriquées par Rubitherm, ou les tubes remplis de PCM qui sont soit placés en ligne ou en quinconce comme on peut le voir sur la figure 6. Les tubes auront une plus grande surface pour l'échange de chaleur mais aussi des pertes de charge plus élevées qui doivent être compensé par le ventilateur.



Figure 5 : Photo des trois types d'encapsulation de PCM. Tubes en quinconce, alignés et plaques.

3.2. MODELE ENERGETIQUE

Des modèles énergétiques décrivant les différents flux de chaleur dans le système - un assez simple basé sur le calcul du NUT et un autre plus détaillés - ont été développés et présentés dans [2, 4] et utilisés pour calculer l'énergie stockable maximale et la puissance thermique. Nous présentons ici comment ces modèles ont été utilisés pour comparer le potentiel des différents types de PCM et les types d'encapsulation, puis pour l'analyse du dimensionnement du système en fonction de sa géométrie et du débit d'air du ventilateur.

3.2.1. Résultats: analyse pour le choix de l'encapsulation

L'objectif était de comparer les efficacités des trois échangeurs de chaleur calculées avec le modèle simple. Les résultats sont évalués en fonction des critères suivants:

- Compacité: le volume de PCM sur le volume total de l'échangeur de chaleur
- Stockage d'énergie disponible: la quantité de stockage d'énergie thermique en utilisant RT25
- Pertes de pression: les pertes d'échangeur de chaleur sont calculées sur la base de la formule Idel'cik, et des valeurs standard pour les conduits, les amortisseurs et les ventilateurs sont ajoutées
- Efficacité de l'échangeur de chaleur: calculée avec la méthode NUT
- Puissance thermique moyenne: trouvée en considérant une entrée de température de 5°C au-dessus de la température PCM

	Tubes alignés	Tubes en quinconce	Plaques
Compacité	31 %	37 %	38%
Masse de PCM	32 kg	39 kg	40.5 kg
Capacité de stockage	2.1 kWh	2.5 kWh	2.6 kWh
Débit d'air	200 m ³ /h	200 m ³ /h	200 m ³ /h
Pertes de pression	121 Pa	135 Pa	42 Pa
Efficacité HX	1.0	1.0	0.82
Puissance moyenne en considérant 5°C de variation de température	318 W	318 W	261 W

Tableau 2 : Présentation de la comparaison des géométries d'échangeurs considérés

Les résultats montrent que l'échangeur de chaleur à plaques et l'échangeur à tubes en quinconces ont une compacité plus élevée que les tubes en ligne et permettent ainsi un plus grand stockage d'énergie. Les pertes de pression de la configuration avec tubes sont plus élevées en raison de la trajectoire plus complexe de l'air ; la puissance thermique moyenne est plus grande pour les configurations avec tubes grâce à la plus grande zone d'échange de chaleur par convection. Pour cette raison, nous avons décidé d'utiliser l'échangeur à tubes en quinconce comme type d'encapsulation. La chaleur totale stockée et la puissance maximale sont limitées et ne suffiraient pas pour un appartement entier. Il est décidé, pour ce premier prototype, que le système LHTES est conçu pour une pièce principale telle qu'un salon de 25 à 35 m².

3.2.2. Résultats: analyse pour le choix de l'encapsulation

Une étude paramétrique a été réalisée afin de déterminer les paramètres les plus appropriés pour un salon de 35 m² à Paris. L'appartement fictif est de 70 m² et rénové avec une couche d'isolation de 20 cm ajouté au mur de béton existant. Le renouvellement d'air est de l'ordre de 0,7-0,9 ACH et la température de consigne pour le refroidissement est de 26 ° C. Une simulation thermique dynamique de l'appartement a été exécutée avec Energyplus. La température de l'air intérieur et les besoins de

refroidissement sont utilisés dans le modèle dynamique simplifié afin de déterminer l'efficacité du LHTES et la couverture des besoins par le système.

Les paramètres évalués sont le type de PCM, le débit d'air, la géométrie globale et la masse de PCM associée. Les critères sont le taux de couverture, la puissance de refroidissement moyenne et les pertes de charge. Les résultats des scénarios les plus intéressants apparaissent dans le tableau 3.

Cas n°	PCM	Débit (m ³ /h)	Largeur x Hauteur	Masse de PCM	Taux de couverture	Puissance rafraich moyenne (W)	Pertes de charge (Pa)
1	RT21	150	0.6 x 1.8	48	42	280	70
2	RT25	150	0.6 x 1.8	48	40	250	70
3	RT21	200	0.6 x 1.8	48	47	340	115
4	RT25	200	0.6 x 1.8	48	46	320	115
5	RT21	200	0.6 x 2.2	59	53	360	135
6	RT25	200	0.6 x 2.2	59	50	320	135

Tableau 3 : Présentation des résultats de l'étude paramétrique

Les résultats montrent que, dans le cas du climat de Paris pour un appartement avec une surchauffe potentielle en été, parmi tous les cas testés, le RT21 est plus approprié que le RT25. Les températures nocturnes apparaissent suffisantes pour régénérer ce PCM. Malgré cela, le système LHTES couvrirait seulement 50% du besoin de refroidissement. La couverture augmente avec le débit d'air, mais le niveau de bruit associé doit être évalué pour éviter toute nuisance acoustique pour les occupants. Avec une boîte plus grande, la masse globale de PCM augmente et le taux de couverture avec, soulignant le besoin d'un stockage potentiel d'énergie plus important. Mais l'intégration serait alors plus complexe, l'espace étant limité.

4. ANALYSE EXPERIMENTALE

Le design validé intègre des tubes en quinconces remplis de RT21 dans une boîte de 2,5 * 0,63 * 0,16 m³ qui présente sur ses faces avant et arrière 2 cm d'isolant permettant de l'intégrer dans une couche isolante de 20 cm. Le système a été fabriqué par ELVAL, partenaire industriel du projet, puis assemblé et testé en laboratoire (figure 6) avant d'installer deux modules sur le bâtiment pilote à Burgos, en Espagne. Nous présentons ici le protocole expérimental et les résultats des mesures.

4.1. PROTOCOLE EXPERIMENTAL

Les paramètres mesurés pour caractériser les performances du LHTES sont :

- Températures d'entrée et de sortie d'air dans le système ($T_{a,in,EXT}$; $T_{a,out,EXT}$; $T_{a,in,INT}$; $T_{a,ext,INT}$)
- Températures sur les surfaces des tubes ($T_{x,y}$): Des thermocouples ont été installés pour enregistrer les températures des tubes (3 hauteurs, 3 largeurs, 3 profondeurs pour un total de 27 thermocouples installés sur la figure) pour permettre de qualifier l'homogénéité des transferts

Une série de cycles de solidification et de fusion des PCM dans le LHTES a été réalisée afin d'évaluer sa performance et de valider les modèles énergétiques développés. Afin de contrôler la température et le débit d'air soufflé, un ventilateur et une résistance thermique ont été connectés à l'entrée externe du LHTES. Le flux d'air était de 130 m³/h. L'état d'équilibre a été atteint en faisant souffler l'air à une température fixe pendant plusieurs heures (ici 30°C sur la figure 8), puis le

thermostat a été baissée à 15°C. L'objectif est d'évaluer l'évolution de la chaleur stockée et la quantité d'énergie totale stockée. De même, des cycles de solidification ont été réalisés, mais non présentés ici.



Figure 6: Photo du LHTES partiellement installé sur le banc d'essai avec les thermocouples.

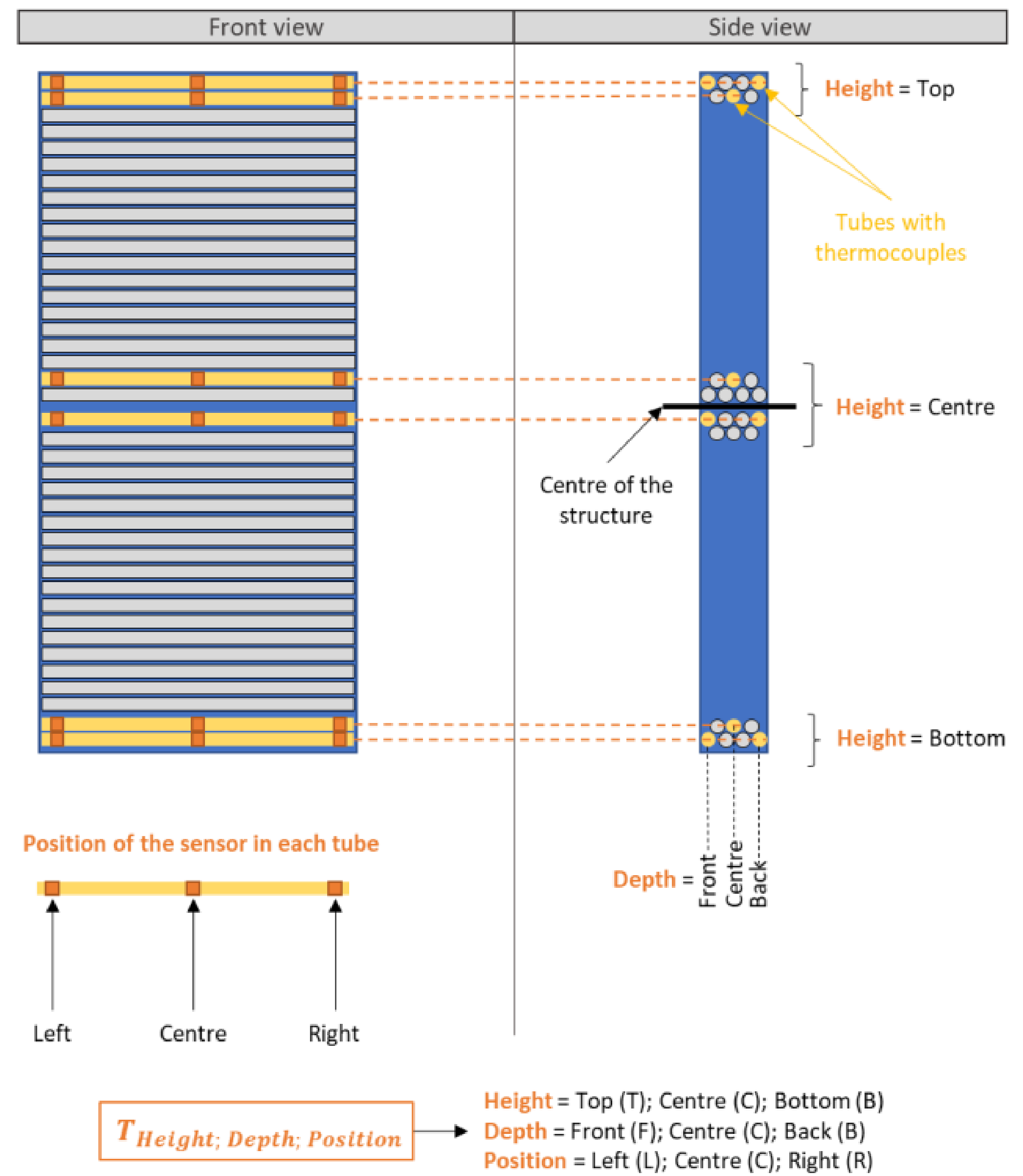


Figure 7: Emplacement des thermocouples installés sur le LHTES

L'évolution des températures et le flux de chaleur calculé sont présentés dans les deux figures suivantes. De la figure 8, on voit que le système a stocké de la chaleur pendant 7 heures. Les températures constantes à la fin permettent de calculer la résistance thermique associée aux pertes de chaleur à travers l'enveloppe isolée de la boîte. L'évolution des flux de chaleur calculés montre que la puissance maximale atteint 500W, et qu'elle diminue régulièrement pour une moyenne de 300W pendant le cycle complet.

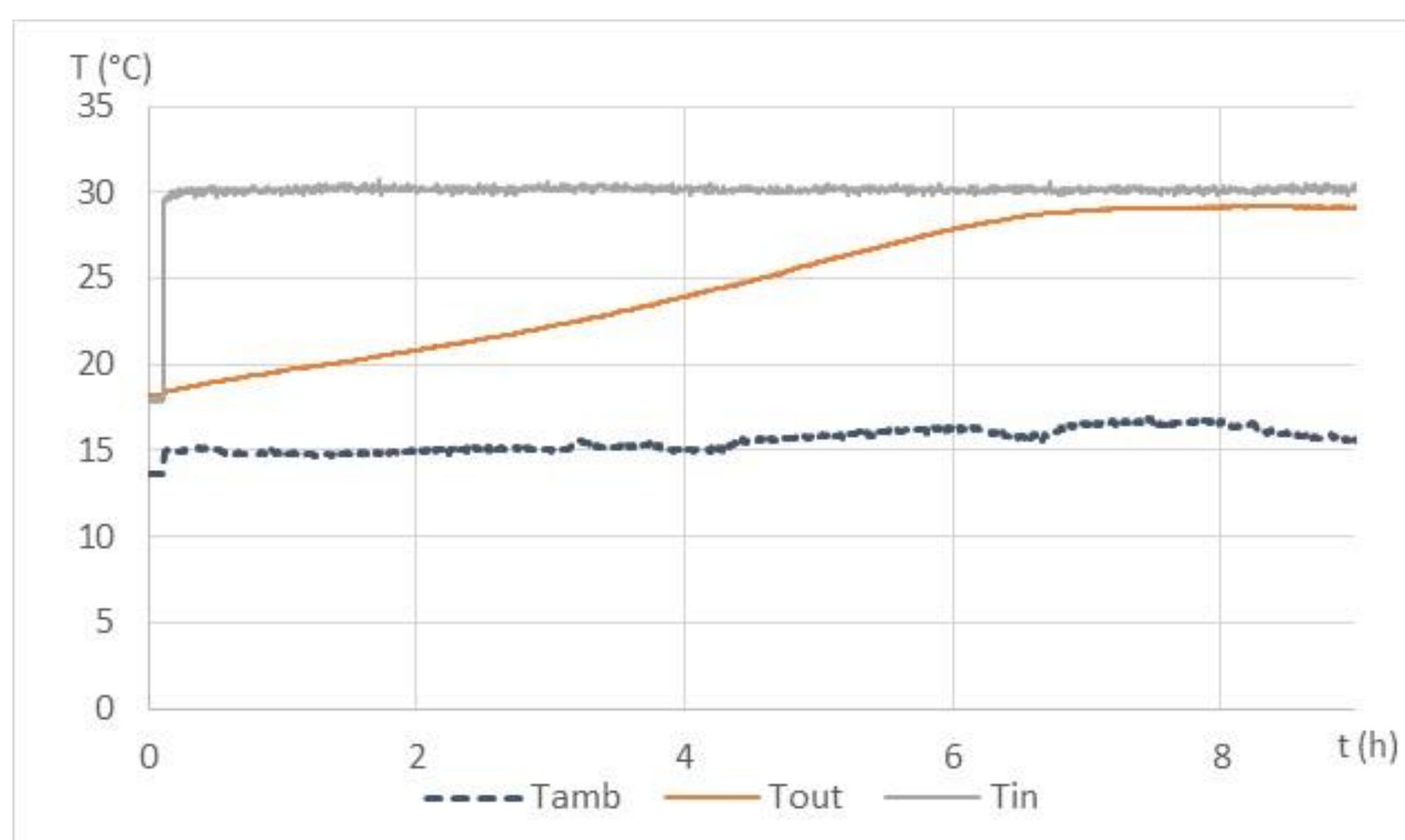


Figure 8: Evolution de T_{in} , T_{out} and T_{amb} pendant un cycle de fonte

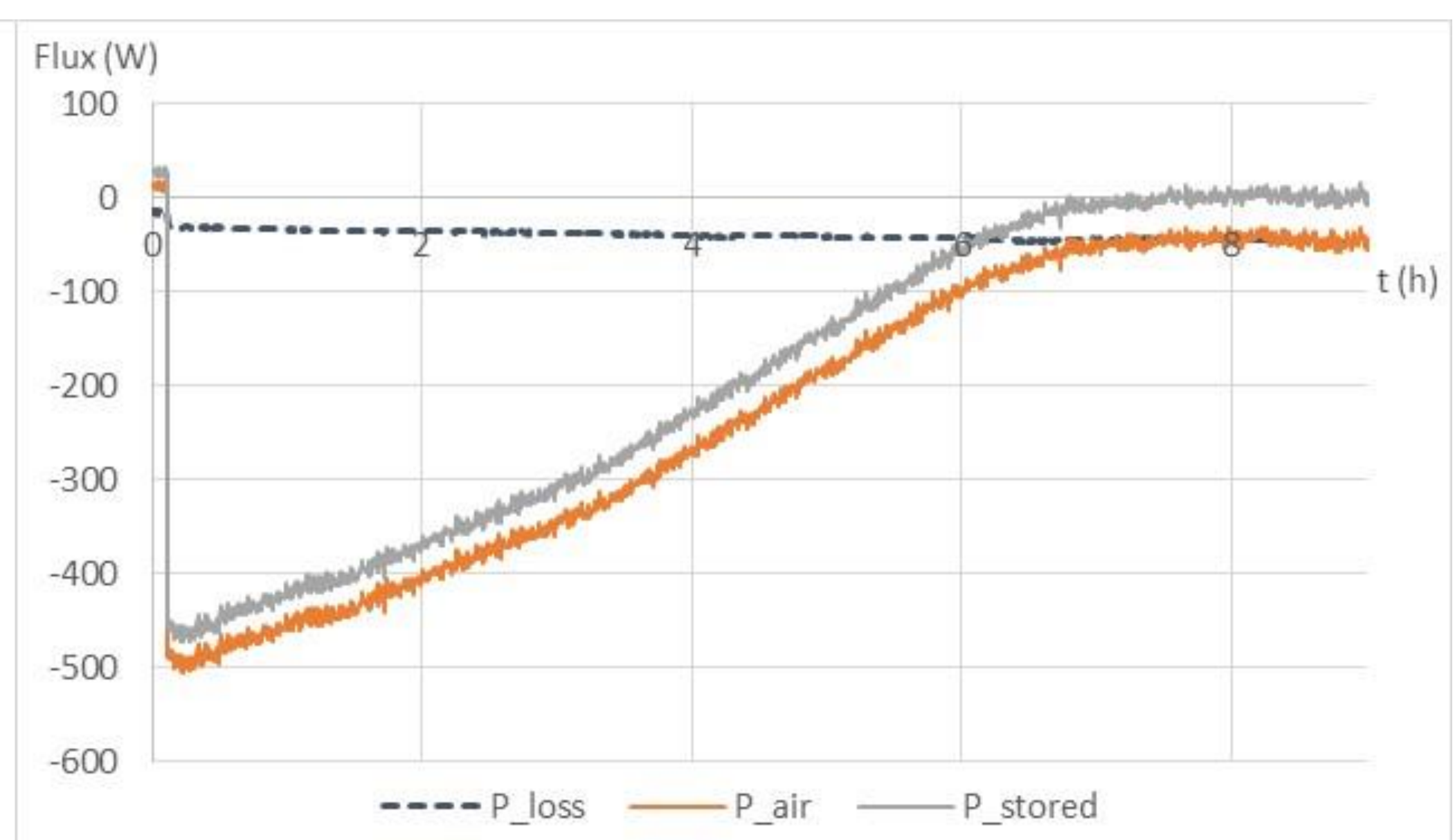


Figure 9: Evolution des flux de chaleur calculés: Pertes par enveloppe (P_{loss}), bilan sur l'air (P_{air}) et le flux stocké résultant (P_{stored}).

Compte tenu des propriétés thermiques des matériaux du LHTES, l'énergie totale estimée (latente et sensible dans le PCM et l'aluminium) est de 1816 Wh. L'énergie globale stockée mesurée est de 1710 Wh, soit 6% de moins. La puissance consommée par le ventilateur étant de 27 W, le COP calculé pour le système complet est de 9.

4.2. INSTALLATION SUR LES SITES PILOTES



Figure 10: Installation du LHTES sur le site pilote à Burgos (gauche et centre) et résultat final (droite)

2 systèmes LHTES ont été installés sur le site pilote de Burgos, en Espagne. Il est connecté à une salle informatique et servira de dispositif de refroidissement. Le processus d'installation a permis d'améliorer le design, et les mesures en cours permettront d'évaluer l'efficacité d'un prototype installé dans des conditions réelles. Notamment, le débit d'air mesuré était plus faible que prévu, ce qui pourrait être dû à plus de pertes de pression et à une qualité d'installation moindre.

5. CONCLUSION

Dans le cadre du projet E2VENT, un système de stockage d'énergie thermique latente a été développé pour être installé dans la couche d'isoant d'un module de rénovation de façade. En 3 ans, à partir du concept, des prototypes ont été fabriqués et testés pour validation, pour obtenir une version consolidée installée sur un bâtiment pilote à Burgos, en Espagne avec ses performances en cours d'analyse. Malgré des résultats positifs (COP mesuré élevé, un bon fonctionnement et une certaine fiabilité) des limites persistent : la difficulté pour l'installation et sa maintenance ou le fait que le design actuel ne permet pas une facile industrialisation. Des développements supplémentaires sont alors nécessaires pour qu'un tel système atteigne le marché.

Remerciements

Ce travail a été développé dans le cadre du projet «E2VENT: Energy Efficient Ventilated Façades» financé dans le cadre Horizon 2020 de l'Union européenne, projet n° 637261. <http://e2vent.eu/>

Reference

- Arkar, C.; Medved, S. Free cooling of a building using PCM heat storage integrated into the ventilation system. *Solar Energy*, (2007) vol. 81, n° 9, p. 1078–1087.
- Dugué, A., Raji, S., Bonnamy, P., & Bruneau, D. E2VENT: an energy efficient ventilated façade retrofitting system. Presentation of the embedded LHTES system. *Procedia Environmental Sciences*, (2017), 38, 121–129.
- Rouault, F., Bruneau, D., Sébastien, P., & Lopez, J. Experimental investigation and modelling of a low temperature PCM thermal energy exchange and storage system. *Energy and Buildings*, (2014) n°83, pp 96–107.
- Rouault F; Bruneau D; Sebastian P; Lopez J. Numerical modelling of tube bundle thermal energy storage for free-cooling of buildings. *Applied Energy*. (2013), vol. 111, p. 1099–1106
- Yanbing, Kang; Yi, Jiang; Yinping, Zhang. Modeling and experimental study on an innovative passive cooling system—NVP system. *Energy and Buildings*, (2003) vol. 35, n° 4, p. 417–425.

Incertitude de simulation à l'échelle du quartier : comparaison de deux modèles et analyse de sensibilité

Loïc Frayssinet*^{1,5}, Thomas Berthou², Bruno Duplessis², Jean-Philippe Tavella³, Frédéric Kuznik^{1,5}, Jean-Luc Hubert^{4,5}, Jean-Jacques Roux^{1,5}

¹ Univ Lyon CNRS, INSA-Lyon, Université Claude Bernard Lyon 1, CETHIL UMR 5008, F-69621, Villeurbanne, France

² MINES ParisTech, PSL Research University, CES – Centre Efficacité énergétique des Systèmes, 60 Bd St Michel, 75006 Paris, France

³ EDF Lab Paris Saclay – Département MIRE, 91120 Palaiseau, France
RISEGrid – Institut commun EDF – CentraleSupélec

⁴ EDF R&D – Département TREE, Avenue des renardières – Ecuelles, 77250 Moret sur Loing et Orvanne, France

⁵ BHEE – Laboratoire commun CETHIL – EDF R&D

*loic.frayssinet@insa-lyon.fr

RESUME. La modélisation de la demande énergétique des bâtiments à l'échelle de la ville permet d'évaluer les stratégies de maîtrise des consommations énergétiques. A cette échelle, le manque de données détaillées et le coût numérique nécessitent de faire des hypothèses et de simplifier les modèles, ce qui rend la modélisation incertaine. Cependant l'impact des choix de modélisation sur la courbe de charge n'est pratiquement jamais analysé. De telles analyses sont menées en confrontant deux outils de modélisation et en étudiant spécifiquement l'impact de certaines simplifications courantes. Il est ainsi mis en évidence que la prise en compte des espaces non chauffés est cruciale pour une bonne modélisation des surfaces déperditives et que les simplifications courantes ont relativement peu d'impact sur le besoin annuel mais qu'elles peuvent causer des déformations de la courbe de charge localement importante.

MOTS-CLÉS : modélisation énergétique quartier bottom-up, analyse de sensibilité, courbe de charge.

ABSTRACT. Building energy models at city scale aim to evaluate energy management strategies. At this scale, the lack of detailed data and the computational cost imply to make some assumptions and to simplify the models, leading to uncertain modelling. However, the impact of the modelling choices on the load curve are nearly never analysed. Such analysis are carried on based on tools comparison and on some usual simplifications studies. It is highlighted that it is crucial to model un-heated spaces for a good estimation of the heat loss area, and that the impact of the usual simplifications on the annual energy needs is low but can be locally high for the load curve.

KEYWORDS: bottom-up district energy model, sensitivity analysis, power curve.

1. INTRODUCTION

Le secteur du bâtiment est identifié, à l'échelle européenne et nationale, comme un secteur clé dans le cadre de la transition énergétique. En effet, il recèle un important potentiel de réduction des consommations énergétiques et des émissions de gaz à effet de serre (rénovation, intégration d'énergies renouvelables, etc.). Ce potentiel est d'autant plus intéressant que, globalement, ce secteur est

responsable d'une part majeure de ces consommations et émissions. L'échelle du quartier revêt un intérêt particulier en offrant la possibilité de mutualiser les systèmes énergétiques (réseaux de chaleur, unités de production, etc.) et de réduire leur capacité globale grâce au foisonnement. Des outils de simulations dédiés, tels que EnviBatE (Gros, Bozonnet, et Inard 2014), DIMOSIM (Riederer et al. 2015) et SMART-E (Berthou et al. 2015), ont été développés afin d'évaluer les stratégies de maîtrise des consommations énergétiques, telle que la gestion dynamique de la courbe de charge (effacement, déplacement, etc.) ou la modification de caractéristiques des bâtiments ou des systèmes énergétiques (rénovation). Toutefois, bien que ces outils ambitionnent de représenter des courbes de charges, pour la plupart, ils ont seulement été validés par rapport à la consommation annuelle (Perez et al. 2015), la plupart du temps en raison de l'absence de données et de mesures adéquates sur site. On est alors en mesure de se questionner sur l'influence des choix de modélisation, sur la courbe de charge simulée, d'autant que les simplifications sont nombreuses pour réduire les temps de calcul d'une part et pour faire face au manque de données d'autre part. Afin d'illustrer les incertitudes globales liées au paramétrage et à la forme des modèles, une première étape d'inter-comparaison de modélisations d'un quartier réel est réalisée « à l'aveugle » à l'aide de deux outils de simulation énergétique de quartier (MoDEM et Smart-E) et par deux laboratoires différents sans concertation préalable concernant le paramétrage. Dans un second temps, une analyse de sensibilité des modèles thermiques est réalisée afin d'isoler les incertitudes liées uniquement aux hypothèses de simplification des modèles thermiques.

2. OUTILS UTILISES

L'influence des choix de modélisation est mise en évidence par une inter-comparaison entre deux outils de simulation énergétique de quartiers, Smart-E et MoDEM, et par l'utilisation d'une spécificité de ce dernier, à savoir, la possibilité de faire varier le niveau de modélisation. Ces outils sont présentés ci-dessous.

2.1. SMART-E

Smart-E (Berthou et al. 2015) est une plateforme de simulation qui permet de représenter l'ensemble des consommations d'énergie liées aux logements à l'échelle du quartier jusqu'à l'échelle de la région. Elle s'appuie sur des modèles physiques et statistiques *bottom-up* qui peuvent être paramétrés automatiquement à partir des grandes bases de données qui décrivent le territoire français (recensement de la population, données des systèmes d'informations géographiques (SIG), etc.). Les besoins de chauffage sont calculés à partir de modèles RC bi-zones pour chaque logement. Les scénarios d'usages et les gains internes sont issus d'un modèle de comportement qui s'adapte aux spécificités des occupants : activité, âge, statut d'occupation. La géométrie des bâtiments est représentée très simplement par des parallélépipèdes orientés de manière probabiliste, les SIG n'étant utilisés à ce jour que pour le calcul des masques solaires proches liés aux bâtiments environnants.

2.2. MoDEM

MoDEM (pour *Modular District Energy Model*) est une suite d'outils développée au sein du laboratoire commun « Bâtiment à Haute Efficacité Énergétique » (BHEE, 2018) afin de quantifier l'impact des choix de modélisation sur les besoins en chauffage et climatisation, pour des périodes d'échantillonnage allant de l'heure à l'année, et de l'échelle du bâtiment à celle du quartier. Il permet de générer automatiquement des modèles énergétiques de quartier *bottom-up* à partir de données géométriques issues de systèmes d'informations géographiques (SIG), suivant différents choix de

modélisation, et de les simuler. Il s'agit de *micro-simulation*, dans le sens où chaque bâtiment du quartier est modélisé de façon explicite avec des modèles de type boîte-blanche.

L'ensemble de la chaîne d'outil est orchestré avec Python. Les modèles de bâtiments sont construits à partir de la bibliothèque Modelica BuildSysPro, développée par EDF R&D (Schumann et al. 2016). A l'échelle du quartier, étant donné le nombre de bâtiments considérés, le nombre de variantes de modélisation testées et afin de réduire les temps de calcul, les simulations des modèles de bâtiments sont distribuées à l'aide de l'outil DACCOSIM (Galtier et al. 2015), basé sur le standard FMI et développé par l'institut RISEGrid (EDF – CentraleSupélec)¹.

3. COMPARAISON INTER-MODELES

3.1. CAS D'ETUDE

Un quartier d'immeubles collectifs parisien d'environ 900 logements construits dans les années 1930 a été choisi pour l'inter-comparaison. Ce quartier a été sélectionné car son architecture est homogène (année de construction, matériaux utilisés, hauteur sous plafond,...) ce qui permet de réduire l'effort de modélisation, de plus il présente une certaine complexité dans les formes des bâtiments (notamment les vis-à-vis), ce qui permet de questionner la nécessité d'une représentation complexe de la forme des bâtiments lors d'une simulation à l'échelle quartier. La figure 1a présente une vue aérienne du quartier modélisé issue de la base de données BD TOPO de l'Institut National de l'information géographique et forestière (IGN).

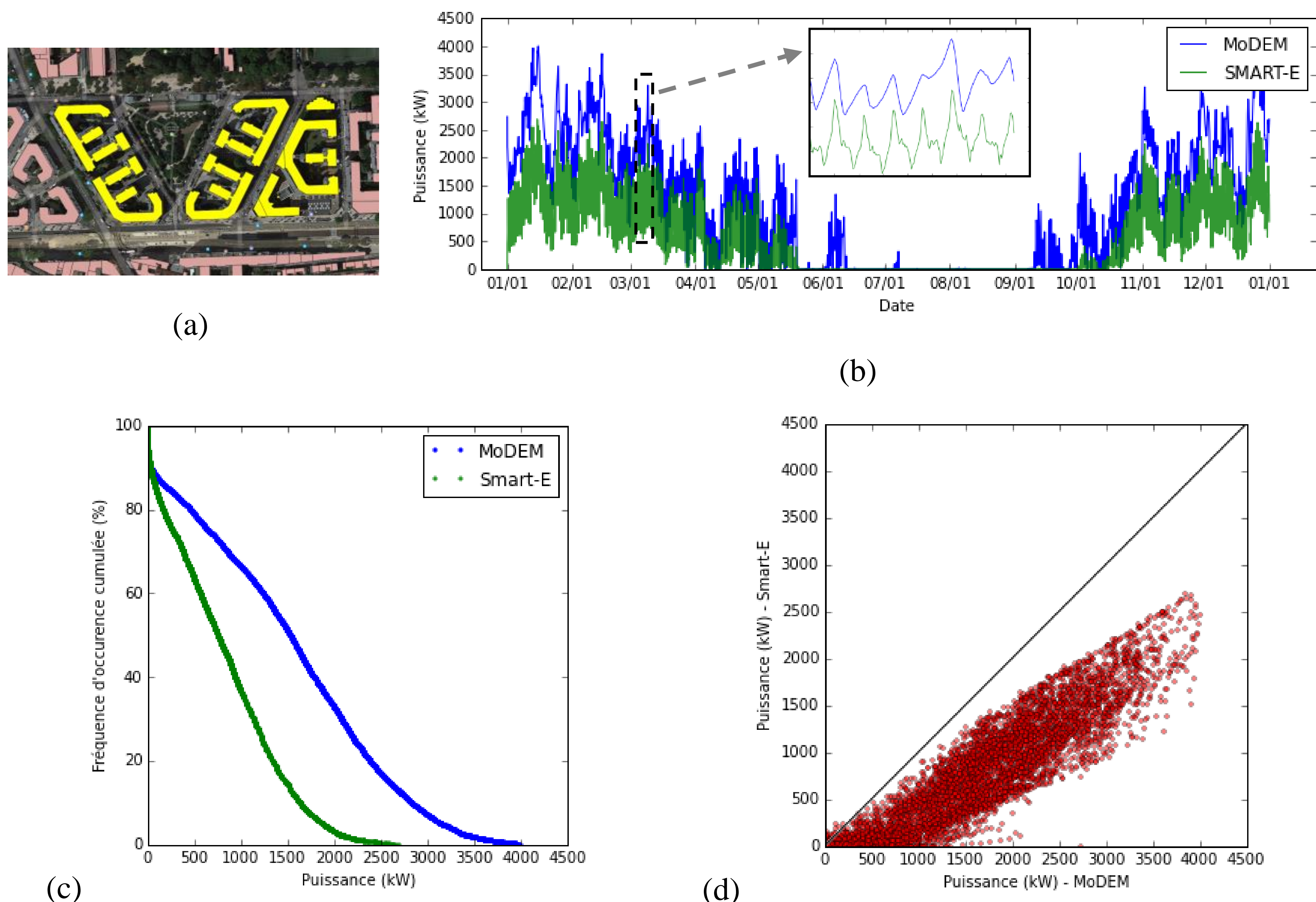


Figure 1 : (a) vue aérienne du quartier modélisé (en jaune) et des masques proches (en rose) et comparaison temporelle (b), en cumulé (c) et point par point (d) des courbes de charge.

¹ Disponible à l'adresse suivante : <https://sourcesup.renater.fr/daccosim>

3.2. RESULTATS DE LA SIMULATION A L'AVEUGLE

La sortie des modèles analysée est le besoin total de chauffage de l'ensemble des bâtiments à l'échelle du quartier (les systèmes énergétiques ne sont pas modélisés). En termes de besoin annuel sur la période de chauffage, un écart important est observé entre les deux outils de modélisation : le besoin calculé par MoDEM (8220 MWh) est presque 2 fois plus important que celui calculé par SMART-E (4414 MWh). Concernant les courbes de charge (figure 2b), leurs variations temporelles sont globalement cohérentes, mais on retrouve approximativement le même écart sur les appels de puissance calculés heure par heure. L'écart entre les deux approches n'est pas constant, des variations plus rapides sont présentes dans Smart-E, ce qui entraîne une certaine dispersion dans la comparaison point par point (figure 2c).

Les écarts étant relativement importants, la partie suivante cherche à en déterminer les raisons, en confrontant les choix de modélisation faits dans chacun des outils.

4. INFLUENCE DES CHOIX DE MODELISATION SUR LA COURBE DE CHARGE

4.1. INCERTITUDES LIEES AUX OUTILS DE SIMULATION

Le paramétrage des outils est détaillé dans le tableau 1. Précisons que le fichier météo utilisé dans les deux simulations est identique (Paris Montsouris, METEONORM).

On observe d'importantes disparités concernant les surfaces prises en compte, les surfaces déperditives dans MoDEM sont 1,4 fois plus grandes que celles utilisées dans Smart-E. Ces écarts s'expliquent principalement par la prise en compte des formes complexes issues directement du SIG dans MoDEM alors que Smart-E utilise une représentation simplifiée des formes urbaines selon une approche statistique. De plus, les espaces non-chauffés ne sont pas pris en compte dans MoDEM contrairement à SMART-E, ce qui réduit de fait les surfaces déperditives de ce dernier. Il serait possible d'ajouter des zones non-chauffées dans le modèle MoDEM, de façon forfaitaire étant donné que ces données ne sont pas présentes dans le SIG, mais le positionnement de ces zones aurait une forte influence sur la puissance comme l'indique l'étude de l'influence du zonage réalisée par Frayssinet et al. (2017). La modélisation des espaces non-chauffés est donc essentielle pour fiabiliser les résultats, aussi bien pour les besoins annuels qu'instantanés.

Les propriétés thermiques estimées par les deux outils sont relativement proches. En combinant ces écarts avec ceux sur les surfaces, on obtient donc un ratio semblable (1,4) entre les coefficients de déperdition thermique des parois. Enfin, en ajoutant le renouvellement d'air, les déperditions statiques liées au modèle MoDEM sont surestimées d'un facteur 1,5 par rapport à Smart-E. L'écart restant s'explique certainement par les apports internes (flux solaires transmis compris) 2 fois plus importants dans Smart-E (hypothèses différentes et non prise en compte des ombres d'un bâtiment sur lui-même). Notons par ailleurs que ramenées à la surface habitée, les estimations de consommations annuelles sont plutôt proches. L'écart entre les deux outils s'explique donc bien plus par la modélisation des espaces non-chauffés que par les différences de paramétrage (ceux-ci étant par ailleurs relativement proches).

4.2. INCERTITUDES LIEES AUX MODELES THERMIQUES

Les modèles thermiques de bâtiment utilisés à l'échelle du quartier reposent souvent sur certaines simplifications, bien souvent implicites, concernant, entre autres, la modélisation de la conduction et de l'inertie (modèles RC notamment), ainsi que la méthode de prise en compte des sollicitations météorologiques extérieures.

Hypothèse de modélisation (valeurs moyennes à l'échelle du quartier)	MoDEM	Smart-E
Modélisation des échanges thermiques entre zones	Bâtiments mono-zones, échanges entre parois mitoyennes	2 zones par logement, pas d'échange thermique entre logements
Orientation des parois	Orientation réelle	Distribution probabiliste
Température de consigne (°C)	19	19,6 (+ un réduit de nuit)
Surface habitable (m ²)	77 514 déduite de la volumétrie	47 432 (hors espaces communs) déduite du nombre de logements
Surface non chauffée (%)	0	7
Surface déperditive verticale (m ²)	50 657	36 960
Surface vitrée (%)	18	19
Surface de toit (m ²)	10 734	9 647
U des vitres (W/(m ² .K))	2,8	3,1
U des murs verticaux (W/(m ² .K))	1,7	1,82
U des toits (W/(m ² .K))	3,2	1,6
Coeff. de déperdition global (W/K)	145 376	102 872
Taux de renouvellement d'air (vol/h)	0,5	0,45
Volume chauffé (m ³)	208 326	131 945
Gains internes (kWh/(m ² .an) [*])	36,8	71,8
Gains solaires (kWh/(m ² .an) [*])	14,4	32,4
Besoin de chauffage annuel (MWh/an)	8 220	4 414
Besoins unitaires de chauffage (kWh/(m ² .an) [*])	106	93

*par rapport à la surface habitable

Tableau 1 : Comparaison du paramétrage des outils de simulation.

Les effets sur la courbe de charges de certains choix de modélisation ont été analysés grâce à l'outil MoDEM en confrontant les résultats obtenus en faisant varier une à une les hypothèses de modélisation autour du modèle de référence utilisé précédemment (tableau 2). Les espaces non chauffés n'ont pas été ajoutés, car on s'intéresse à l'impact relatif des simplifications du modèle d'enveloppe sur les besoins.

L'analyse de l'impact d'une variation de modélisation sur la courbe de charge a été analysée à l'aide des indicateurs suivant : la différence moyenne (*Mean*), la déviation moyenne (*R. Mean*), l'écart-type (*Std.*) et les différences extrémales entre les deux courbes de charge (*Min. & Max.*). Un dernier indicateur (*Δfcum*) quantifie l'écart entre les niveaux de puissance pour lesquels 20% des occurrences de

puissances sont supérieures (en se basant sur les courbes cumulées de puissance, cf. figure 1c). Les différences sont calculées de la façon suivante : modèle modifié – modèle de référence.

	Hypothèses analysées	Référence	Modification
<i>Cond</i>	Résolution du maillage des parois pour le problème conductif ²	Résolution détaillée	Résolution grossière
<i>IntInertia</i>	Prise en compte d'inertie interne	Inertie forfaitaire	Pas d'inertie
<i>TrDistrib</i>	Distribution des apports solaires transmis par les vitrages	Absorbés par le plancher	Absorbés par toutes les parois internes au prorata de leur surface
<i>TConvi</i>	Modélisation de la température interne pour les échanges sensibles globaux	Température d'air	Température opérative
<i>Conv</i>	Modélisation des échanges convectifs externes	Coefficient d'échange convectif constant	Dépendant du vent
<i>Rad</i>	Modélisation des échanges radiatifs externes	Modèle linéarisé	Modèle en température à la puissance 4 (loi de Stephan-Boltzmann).

Tableau 2 : Modification des hypothèses de modélisation.

Ces indicateurs permettent d'avoir un large spectre d'analyse, à la fois temporel, depuis l'effet sur les besoins annuels (*Mean*) jusqu'à l'effet instantané (*Min. & Max.*), et relatif à différents objectifs de simulations (identification des cibles à rénover, dimensionnement des systèmes énergétiques, gestion dynamique de la courbe de charge, etc.). Pour faciliter les comparaisons et avoir un ordre de grandeur, des valeurs relatives des indicateurs ont été retenues : la référence correspond à la puissance moyenne (calculée uniquement sur la période de chauffage).

On observe (figure 2) que les effets des hypothèses de modélisation sur la demande annuelle sont faibles (inférieures à 10%, excepté pour *TConvi* environ égal à 20%), alors qu'ils peuvent être très importants à certains instants (jusqu'à 60%), notamment pour la modélisation du coefficient convectif interne et externe, ainsi que pour l'inertie interne. On met ainsi en évidence que bien que les simplifications couramment utilisées se justifient pour le calcul des besoins annuels, leur impact n'est généralement pas négligeable sur les appels de puissance. Notamment, les simplifications de la conduction dans l'enveloppe, souvent utilisées à l'échelle du quartier, peuvent causer des écarts ponctuels de 25%.

4.3. INCERTITUDES LIÉES AUX INTERACTIONS

A l'échelle du quartier, plusieurs interactions entre les bâtiments sont à prendre en considération. Les couplages indirects liés au micro-climat ne sont pas pris en compte ici. La même méthodologie que précédemment est utilisée (figure 3) pour les modifications détaillées dans le tableau 3.

² La méthode utilisée est détaillée dans (Frayssinet et al. 2017).

Intéractions analysées		Référence	Modification
<i>Solar</i>	Flux solaires	Masquage et inter-réflexions	Directement issus du fichier météo Non modélisé :
<i>RadCoupling</i>	Echanges radiatifs entre bâtiments	Modélisé	température radiative de l'environnement urbain égale à la température d'air extérieur
<i>Adiab</i>	Murs mitoyens	Continuité thermique	Adiabatiques

Tableau 3 : Modification de la modélisations des interactions.

On observe qu'ignorer les masques solaires et les réflexions conduit à une diminution notable des besoins annuels (10%) et instantanés (jusqu'à 40%), due à une surestimation des apports solaires, sans que cela n'influe notablement sur la courbe de charge cumulée.

L'approximation de la température de surface des bâtiments voisins ne cause qu'une légère surestimation de la courbe de charge (< 5%, dû à des déperditions radiatives légèrement plus importantes, étant données que l'air est généralement plus froid que les parois). Le découplage des bâtiments mitoyens ne conduit à aucune différence notable (notamment parce que les températures de consigne sont identiques dans les bâtiments et donc que les écarts surviennent uniquement hors période de chauffe, sur des parois mitoyennes relativement peu nombreuses).

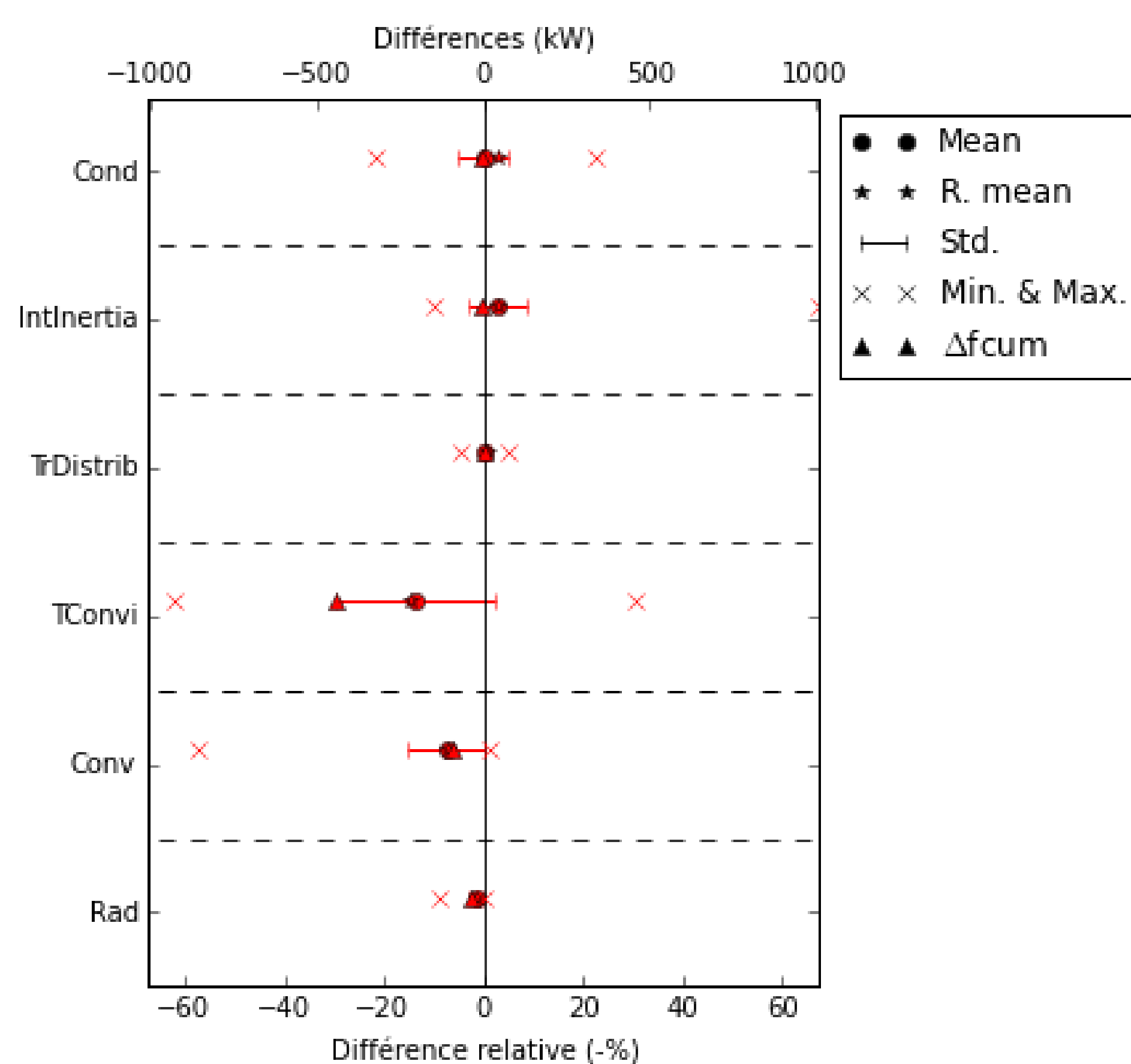


Figure 2 : Effets des hypothèses de modélisation.

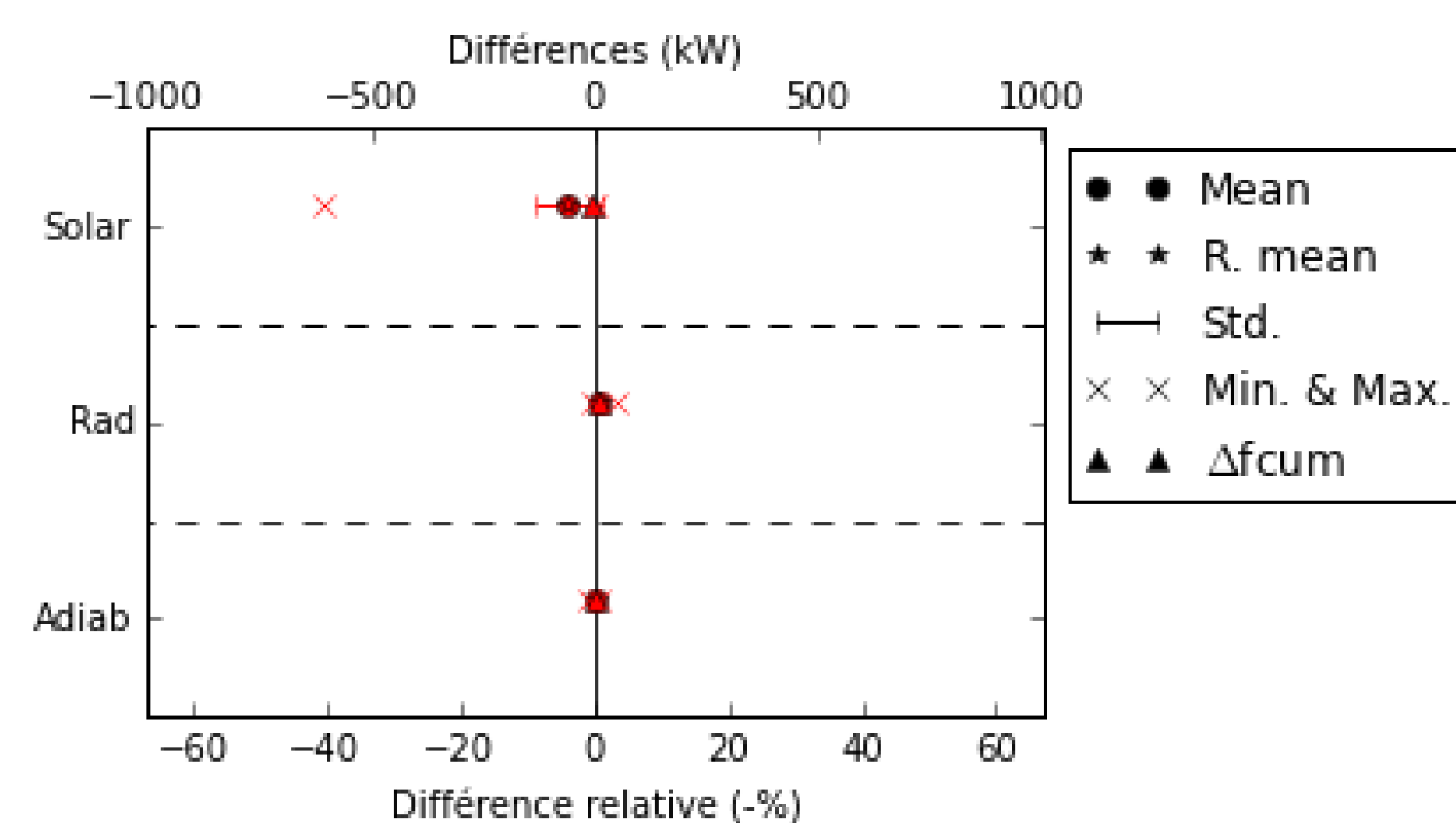


Figure 3 : Effets des interactions.

5. BILAN ET DISCUSSION

Les conclusions résultantes de cette étude sont évidemment relatives au cas d'étude retenu, et ne peuvent être généralisées. Dans notre cas, on observe que les couplages thermiques entre les modèles de bâtiments sont faibles, et donc que les simulations de ces derniers semblent pouvoir être réalisées de façon indépendante (le calcul des flux solaires étant un prétraitement), ce qui faciliterait leur

parallélisation et permettrait de diminuer fortement le temps de calcul ou d'augmenter le niveau de détail des modèles. La parallélisation se justifie donc pleinement à l'échelle du quartier.

Ensuite, il a été mis en évidence que les hypothèses de modélisation classiquement utilisées pour les modèles de bâtiment sont bien valables lorsque l'on s'intéresse aux besoins annuels, mais peuvent causer des déviations importantes localement sur la courbe de charge. Pour réduire ces dernières, et fiabiliser les modèles vis-à-vis de la courbe de charge, il est nécessaire d'obtenir des informations sur la structure intérieure du bâtiment (découpage, position des murs intérieurs, etc.), afin de pouvoir affiner les modèles (inertie interne, distribution du flux solaire transmis, échanges radiatifs internes, etc.). La comparaison inter-modèles a illustré ce point en montrant que l'estimation des besoins annuels peut facilement converger, moyennant la prise en compte d'une géométrie semblable. Ceci est moins évident pour le calcul de la courbe de charge qui est plus sensible aux simplifications.

La méthode de modélisation des surfaces extérieures du bâtiment est donc cruciale, mais elle n'est pas évidente a priori : la connaissance de l'enveloppe extérieure ne suffit pas et doit aussi être complétée par des informations concernant le découpage interne (espaces non chauffés notamment) afin d'obtenir des résultats fiables. Cette problématique amène aussi à la question suivante : peut-on s'affranchir de la géométrie réelle détaillée au profit d'une géométrie moyenne représentative en profitant de l'échelle agrégée du quartier ? La surface globale importe pour les déperditions, tandis que l'orientation influence sur les phénomènes liés aux apports solaires. Dans quelles mesures ces derniers peuvent-ils être globalisés ? Ces questions feront l'objet de prochains travaux.

6. BIBLIOGRAPHIE

- Berthou, Thomas, Bruno Duplessis, Philippe Rivière, Pascal Stabat, Damien Casetta, et Dominique Marchio. 2015. « Smart-E: A Tool for Energy Demand Simulation and Optimization at the City Scale ». In *14th International Conference of IBPSA*. Hyderabad, India.
- BHEE, http://cethyl.insa-lyon.fr/uploads/Docs_PDF/plaquettecethyl-LaboCommun.pdf, consulté en 2018.
- Frayssinet, Loïc, Frédéric Kuznik, Jean-Luc Hubert, Maya Milliez, et Jean-Jacques Roux. 2017. « Adaptation of building envelope models for energy simulation at district scale ». *Energy Procedia* 122: 307–312.
- Galtier, Virginie, Stéphane Vialle, Cherifa Dad, Jean-Philippe Tavella, Jean-Philippe Lam-Yee-Mui, et Gilles Plessis. 2015. « FMI-based distributed multi-simulation with DACCOSIM ». In *Proceedings of the Symposium on Theory of Modeling & Simulation: DEVS Integrative M&S Symposium*, 39–46. Society for Computer Simulation International.
- 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>.
- Perez, Nicolas, Peter Riederer, Christian Inard, et Vincent Partenay. 2015. « Thermal Building Modeling Adapted to District Energy Simulation ». In *14th International Conference of IBPSA*. Hyderabad, India.
- Riederer, Peter, Vincent Partenay, Nicolas Perez, Christophe Nocito, Romain Trigance, et Thierry Guiot. 2015. « Development of A simulation Platform For The Evaluation Of District Energy System Performance ». In *14th International Conference of IBPSA*, 2499–2506. Hyderabad, India.
- Schumann, Mathieu, Benoit Charrier, Gilles Plessis, et Bénédicte Wall-Ribot. 2016. « BuildSysPro : une bibliothèque Modelica open-source pour l'énergétique des bâtiments et des quartiers ». In *Conférence IBPSA France*. Marne-la-Vallée.

Simulation des besoins énergétiques à l'échelle de la ville : Une méthodologie de modélisation adaptée

GARCIA PEREZ, Martin (1); KIM, Eui-Jong (2); ROUX, Jean-Jacques (1) *

Organisation(s):

1: Université de Lyon, CNRS, INSA-Lyon, CETHIL, UMR5008, F-69621, Villeurbanne, France;

2: Department of Architectural Engineering, College of Engineering, Inha University, Incheon 22212, South Korea;

***jean-jacques.roux@insa-lyon.fr**

RESUME. La simulation de la demande d'énergie à l'échelle de la ville ou du quartier est un champ de recherches en plein développement et les applications en termes d'ingénierie (gestion de réseaux de chaleur, photovoltaïque et partage d'énergie ...) mais aussi en termes de planification et de gestion pour les collectivités et autres métropoles, sont nombreuses. Ce travail vise donc à contribuer au développement des méthodes et des outils de simulation appliqués aux territoires urbains qui sont différents des outils qui sont centrés sur le comportement d'un bâtiment précis en site urbain. La méthodologie décrite consiste en une décomposition de la ville en quartiers, chaque quartier étant représenté par un ensemble de bâtiments. Les modèles d'état représentant chaque bâtiment sont assemblés et agrégés pour représenter le quartier. Les modèles d'état représentant les quartiers sont à leur tour assemblés et agrégés pour représenter la ville. Il est nécessaire d'adopter une structure bien particulière des modèles d'état pour que ces opérations d'assemblage soient possibles. Cette procédure d'agrégation et de réduction est décrite et les résultats obtenus sur de grands territoires sont présentés et montrent l'efficacité de la méthode.

MOTS-CLÉS : Besoins énergétiques, échelle de la ville, modèles d'état réduits, modèles analogiques.

ABSTRACT. The simulation of the energy demand at the city or the district level is a research area under full development. The applications in terms of engineering (management of heating networks, photovoltaic and shares energy...) but also in terms of planning and management for the communities and other metropolises, are numerous. This work thus aims at contributing to the development of the methods and the tools for simulation applied to the urban territories. These tools are necessary different from the tools which are centered on the behavior of a precise building in urban site. Described methodology consists of a decomposition of the city in districts, each district being represented by a set of buildings. The electric analog models representing each building are assembled in a state model and then reduced to represent the district. These state models representing the districts are assembled and reduced to represent the town. It is necessary to adopt a quite particular structure of the state models so that these operations of assembly are possible. This procedure is described, the results got on large territories are presented and show the effectiveness of the method.

KEYWORDS : energy needs, whole city scale, reduced state models, electric analog models

1. INTRODUCTION

La simulation de la demande d'énergie à l'échelle de la ville ou du quartier est un champ de recherches en plein développement (Christoph F. Reinhart et al., 2016). Les applications en termes d'ingénierie (gestion de réseaux de chaleur, photovoltaïque et partage d'énergie ...), de confort et de qualité de l'air à l'extérieur ou à l'intérieur des bâtiments, mais aussi en termes de planification et de gestion pour les collectivités et autres métropoles, sont nombreuses. De multiples codes de simulations

ont été développés en visant une bonne représentation des grandeurs observées, nécessaires à l'analyse et la bonne compréhension pour l'un des objectifs cité plus haut (J.H. Kämpf, 2007), (E.-J. Kim, 2014, 2015), (L. Frayssinet, 2017, 2018).

La représentation de la ville ou d'un quartier pose également le problème de la connaissance des données nécessaires pour effectuer les simulations de manière pertinente et donc de la définition au préalable de la problématique à laquelle ces simulations vont devoir répondre (Sousa Monteiro C, 2017).

L'objectif visé dans cet article est plutôt de décrire la méthodologie utilisée pour la construction d'un modèle utilisable à l'échelle de la ville ou à l'échelle du quartier, de chaque bâtiment voire de chaque étage si cela est nécessaire. Le choix s'est porté ici sur la représentation de chaque bâtiment par un modèle électrique analogique. L'intérêt de ce type de représentation tient au fait que, si le modèle est bien choisi, il est possible d'avoir une interprétation physique des nœuds du modèle et en particulier pour l'injection des flux solaires en surface extérieure ou intérieure. De nombreuses représentations simplifiées ont été proposées (G. Fraisse, 2002), (J.-J.Roux, 1984), (L.Laret, 1980). Nous nous sommes basés pour ces travaux sur une des représentations simplifiées les plus simples, mais la méthodologie présentée est parfaitement adaptable sans difficultés à des modèles d'ordre plus élevés (N. Perez, 2017).

Chaque bâtiment étant représenté par un modèle RC, la représentation d'état de ces modèles (dont le vecteur des sollicitations a une forme particulière) sont agrégés en un grand système afin de représenter le quartier. Ce modèle d'état est réduit et dans un deuxième temps les modèles réduits des quartiers sont agrégés pour représenter la ville. Ce dernier modèle d'état est à son tour réduit. Nous donnons, dans la suite de ce texte, le détail de la construction de cette procédure de double réduction et d'agrégation des matrices ainsi que les résultats obtenus sur des exemples en termes de précision et de temps de calcul.

2. METHODOLOGIE GENERALE

Dans le contexte urbain, le nombre important de bâtiments fait que la taille totale du système d'équations à résoudre augmente très rapidement et entraîne des coûts de calcul élevés et cela même en utilisant des modèles analogiques très simplifiés. Cela concerne effectivement les temps de calcul mais aussi les problèmes de mémoire liés à la taille des matrices mises en jeu dans la résolution. Le processus de réductions multiples, illustré à la figure 1, combine la sous-structuration et les techniques de réduction des modèles d'état en plusieurs étapes, évitant la création d'un grand système d'équations algèbro-différentielles, tout en préservant une bonne précision sur les résultats.

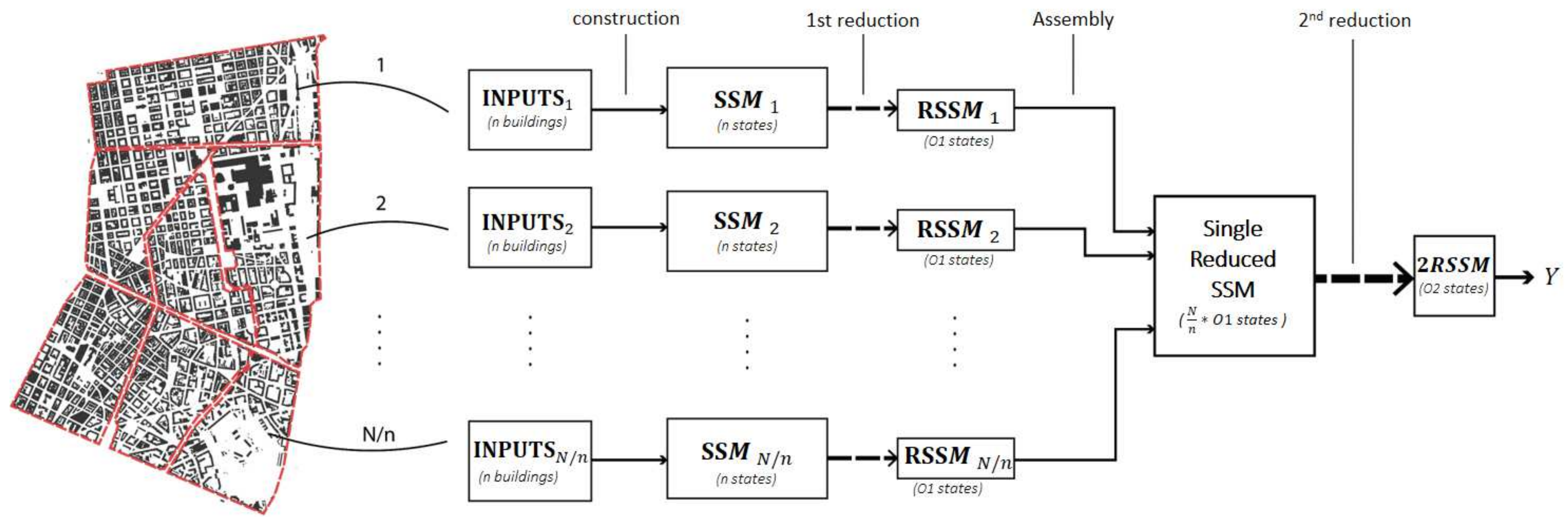


Figure 1: Double reduction's computation scheme

Dans le cas d'une double réduction (2 étapes) comme celle abordée dans cet article, l'ensemble des N bâtiments constituant une ville est divisé en sous-groupes de n bâtiments, constituant des quartiers. En utilisant les données provenant des SIG (Système d'information Géographique) et définissant les bâtiments, chaque quartier est modélisé par un système d'état matriciel (construction) et celui-ci est réduit (première réduction). Ensuite, les modèles d'état de chaque quartier sont assemblés dans un modèle d'état global qui est à nouveau réduit (deuxième réduction) pour obtenir un modèle réduit de l'ensemble de la ville (des N bâtiments). Le processus d'assemblage et réduction des modèles est expliqué par la suite.

3. MODELE ANALOGIQUE RETENU

Les modèles RC analogiques, largement utilisés dans la modélisation thermique à toute échelle, permettent de décrire le comportement dynamique des besoins énergétiques dans chacun des bâtiments (voire de chaque zone d'un bâtiment). Cette approche permet de générer des modèles avec un niveau de détail préétabli et des coûts de modélisation associées à sa précision. Dans le cas de cette présentation, des modèles 3R2C à deux états (figure 2) ont été utilisés (G. Fraisse et al., 2002), mais la méthodologie resterait identique avec des modèles d'ordre supérieur. L'important pour que ce qui est détaillé dans la suite de l'article reste valable est que l'on puisse mettre le modèle sous la forme d'un modèle d'état et que le vecteur des sollicitations soit commun à tous les bâtiments.

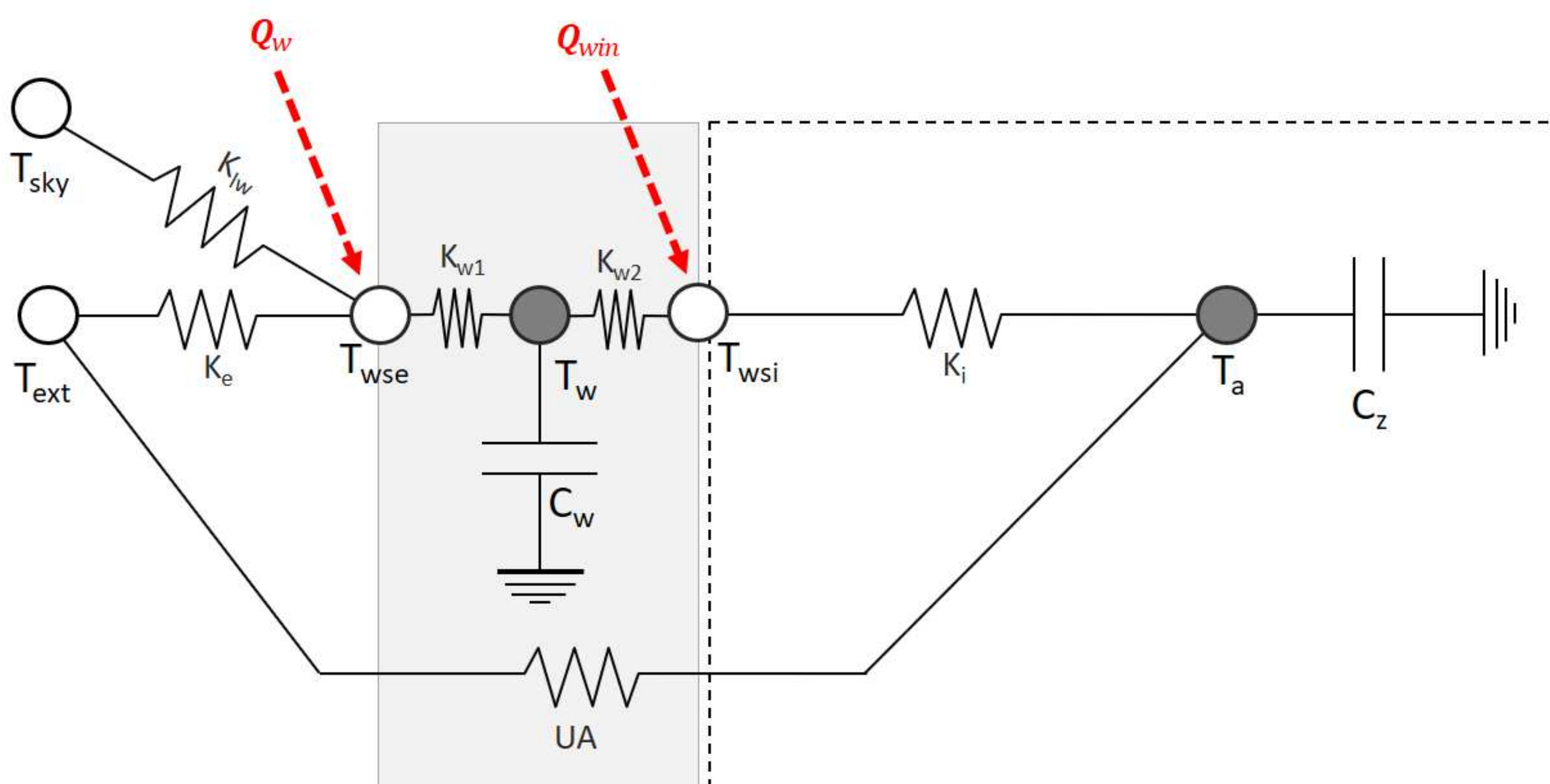


Figure 2 : Modèle analogique 3R2C

Afin d'appliquer les techniques de réduction des modèles d'état, les systèmes sont supposés être linéaires et invariants (E.-J. Kim et al., 2014, J.H. Kämpf et al., 2007). De plus, afin de définir un vecteur de sollicitations U général identique pour tous les bâtiments, les flux solaires incidents sont projetés sur 8 orientations cardinales (figure 3). Un modèle R7C4 (N. Perez, 2015), voire d'ordre plus élevé, aurait pu être utilisé et n'aurait pas nui à la généralité du propos, les matrices auraient tout simplement été de tailles plus importantes.

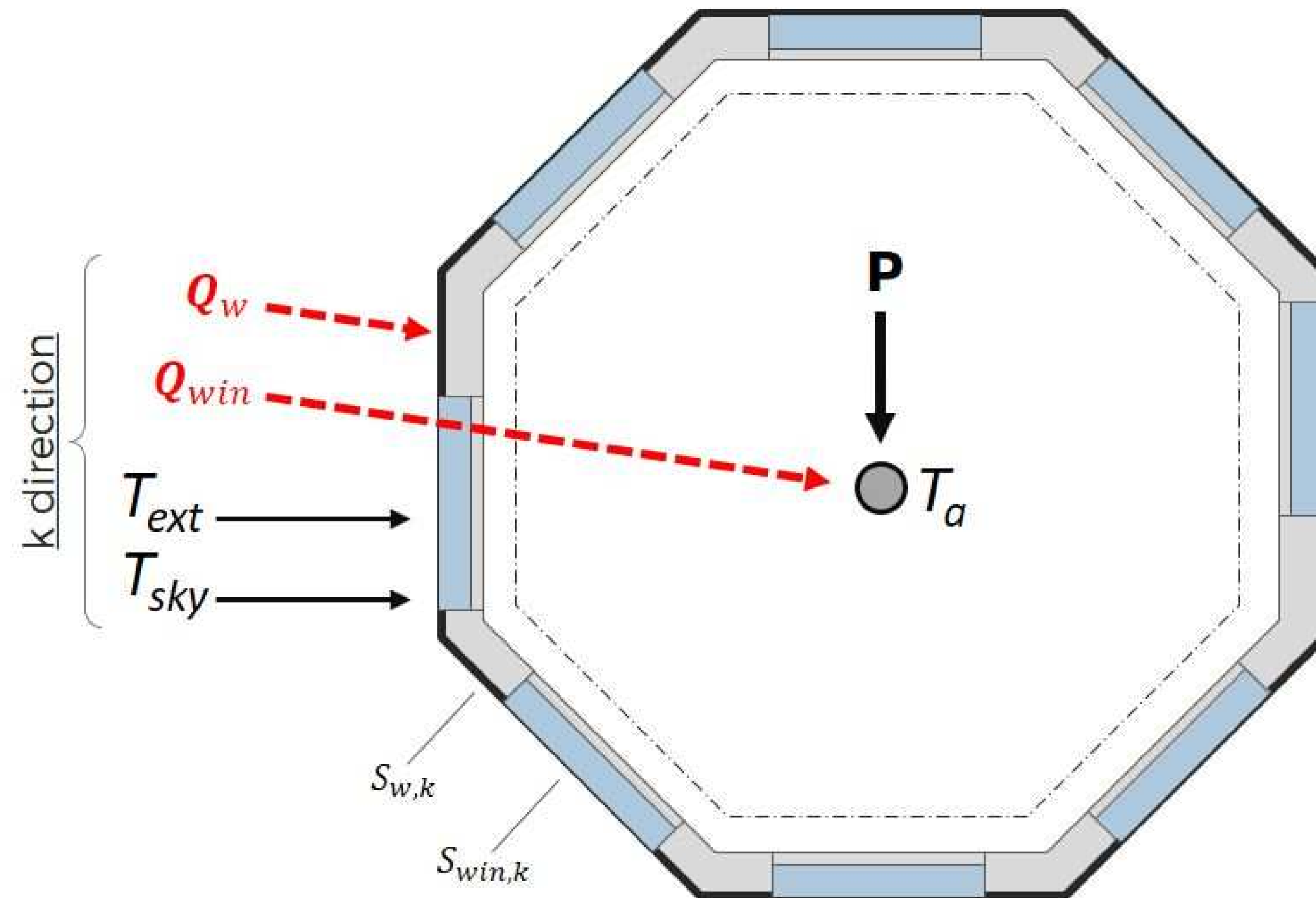


Figure 3 : Modèle analogique 3R2C

Le modèle d'état associé à un bâtiment « k », découlant du modèle analogique de la figure 2, est présenté dans l'équation 1 :

$$\begin{aligned}
 \begin{bmatrix} c_w & 0 \\ 0 & c_a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{T}_w \\ \dot{T}_a \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} -K_{w1} - K_{w2} + K_1 K_{w1} - K_{21} K_{w2} & K_{21} K_i \\ K_{22} K_{w2} & -K_i - UA + K_{22} K_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_w \\ T_a \end{bmatrix} \\
 &+ \begin{bmatrix} K_1 K_E & K_1 K_{LW} & \phi_{w,N} & \dots & \phi_{w,NW} & \phi_{w,T} & 0 \\ UA & 0 & \phi_{a,N} & \dots & \phi_{a,NW} & \phi_{a,T} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{EXT} \\ T_{SKY} \\ \phi_N \\ \vdots \\ \phi_{NW} \\ \phi_T \\ Q \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_w \\ T_a \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} [b_1] & 0 \\ [b_2] & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [u_1] \\ q \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{1}$$

Dans le cas particulier où la température intérieure T_a est considérée, constante et égale dans tous les bâtiments ($T_a = T_{set} =$ Température de régulation), cela induit la disparition d'une équation différentielle dans (1). Cette hypothèse est ici liée à l'objectif de calculer les besoins annuels ou horaires. Nous obtenons alors l'équation (2) :

$$\begin{cases} c_w \dot{T}_w = a_{11} T_w + (b_1 | a_{12}) \left\{ \frac{u_1}{T_{set}} \right\} \\ q = (-a_{21}) T_w + (-b_2 | a_{22}) \left\{ \frac{u_1}{T_{set}} \right\} \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} c_k \dot{T}(t) = a_k T(t) + b_k U \\ Y_k = q_k = j_k T(t) + d_k U \end{cases} \tag{2}$$

4. MODELISATION D'UN QUARTIER

Pour chaque quartier « i » (groupe de n bâtiments), le modèle associé est construit par assemblage des n modèles RC des bâtiments. Cela consiste à les agréger en une expression matricielle équivalente à la globalité des bâtiments constituant le quartier, sous la forme du modèle d'état établi en (3) :

$$\left\{ \begin{array}{l} \begin{bmatrix} c_1 & & & \\ & c_2 & & \\ & & \ddots & \\ & & & c_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{T}_1 \\ \dot{T}_2 \\ \vdots \\ \dot{T}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 & & & \\ & a_2 & & \\ & & \ddots & \\ & & & a_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ \vdots \\ T_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_1^{1,1} & b_1^{1,2} & \dots & b_1^{1,12} \\ b_2^{1,1} & b_2^{1,2} & \dots & b_2^{1,12} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ b_n^{1,1} & b_n^{1,2} & \dots & b_n^{1,12} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{EXT} \\ T_{SKY} \\ \varphi_N \\ \vdots \\ \varphi_{NW} \\ \varphi_T \\ T_{set} \end{bmatrix} \\ \\ [Y] = \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ \vdots \\ q_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} j_1 & & & \\ & j_2 & & \\ & & \ddots & \\ & & & j_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ \vdots \\ T_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} d_1^{1,1} & d_1^{1,2} & \dots & d_1^{1,12} \\ d_2^{1,1} & d_2^{1,2} & \dots & d_2^{1,12} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ d_n^{1,1} & d_n^{1,2} & \dots & d_n^{1,12} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{EXT} \\ T_{SKY} \\ \varphi_N \\ \vdots \\ \varphi_{NW} \\ \varphi_T \\ T_{set} \end{bmatrix} \end{array} \right. \quad (3)$$

La deuxième équation matricielle $[Y]$ représente l'ensemble des grandeurs observées, ici les besoins énergétique à pas de temps horaires pour chaque bâtiment.

Pour chaque quartier, le système d'état est agrégé, puis réduit en série (4). Dans cette publication, la méthode de Moore (B Moore, 1981), ayant montré satisfaction en termes de stabilité et de précision (E.-J. Kim, 2014), a été utilisée afin réduire le système (3) à un ordre O_I , ce qui implique un processus en deux étapes : un changement de base (diagonalisation et base « équilibrée ») et réduction (grammiens d'observabilité et de commandabilité).

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{T} = A_i T + B_i U \\ Y = C_i T + D_i U \end{array} \right. \xrightarrow{\text{Changement de base}} \left\{ \begin{array}{l} \dot{X} = A_i' X + B_i' U \\ \tilde{Y} = C_i' X + D_i' U \end{array} \right. \xrightarrow{\text{Reduction}} \left\{ \begin{array}{l} \dot{X} = A_{R,i} X + B_{R,i} U \\ \tilde{Y} = C_{R,i} X + D_{R,i} U \end{array} \right. \quad (4)$$

5. MODELISATION D'UNE VILLE

L'obtention du modèle de la ville se fait par agrégation des modèles réduits des quartiers de manière analogue à celle vu en (4). Après assemblage, celui-ci est réduit par la méthode de Moore en produisant un modèle final, qui peut aussi s'exprimer sous la forme d'un modèle d'état (5) qui, dans ce travail, est d'ordre 1:

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{X} = A_{2R} X + B_{2R} U \\ Y = Q_{t,2R} = C'_{2R} X + D'_{2R} U \end{array} \right. \quad (5)$$

6. RESULTATS

Les résultats présentés dans cet article ont été obtenus avec le logiciel Matlab 2017a et un ordinateur Lenovo Thinkpad P50 : Intel(R) Core (TM) i7-6820HQ @2.70GHz, 32GB RAM DDR4.

Les paramètres d'entrées utilisées pour la représentation de la ville reposent sur des données réelles. D'autre part, les données climatiques sont celles de la ville d'Incheon en Corée du Sud.

Les modèles comparés dans cette section sont un modèle de référence (noté *REF*) constituant une solution bâtiment par bâtiment des N systèmes RC et un modèle doublement réduit (noté *2R*) avec $n=200$, et des ordres de réductions respectifs $O_1=2$ et $O_2=2$.

6.1. TEMPS DE CALCUL

L'étude des temps de calcul dans la simulation annuelle de la puissance horaire du système pour différentes tailles de villes montre une remarquable diminution des couts de calcul. Le modèle étudié présente une vitesse qui est jusqu'à 1600 fois plus faible que celle du modèle de référence (Tableau 1). Ainsi, le comportement de la réduction du temps de calcul du modèle réduit est exponentiel.

Nombre de bâtiments (N)	1,000	5,000	10,000	50,000	100,000	500,000	1,000,000
Modèle référence(s) ([h])	41.6 (~0.01 h)	1426.7 (~0.40 h)	2664.3 (~0.74 h)	13292.1 (~3.70 h)	27062.2 (~7.50 h)	135500.4 (~38 h)	2710305.1 (~753 h)
Modèle réduit [s] (fois plus rapide)	1.2 (~35)	2.16 (~660)	1.9 (~1400)	8.29 (~1600)	17.44 (~1500)	332.57 (~410)	2146.4 (~1200)

Tableau 1 : Comparaison des temps de calcul

Plus précisément, pour chacune des étapes de modélisation, nous observons que la réduction est le processus qui nécessite le temps de calcul le plus important, tandis que la résolution du système réduit est, contrairement au modèle de référence, très rapide (Figure 4) :

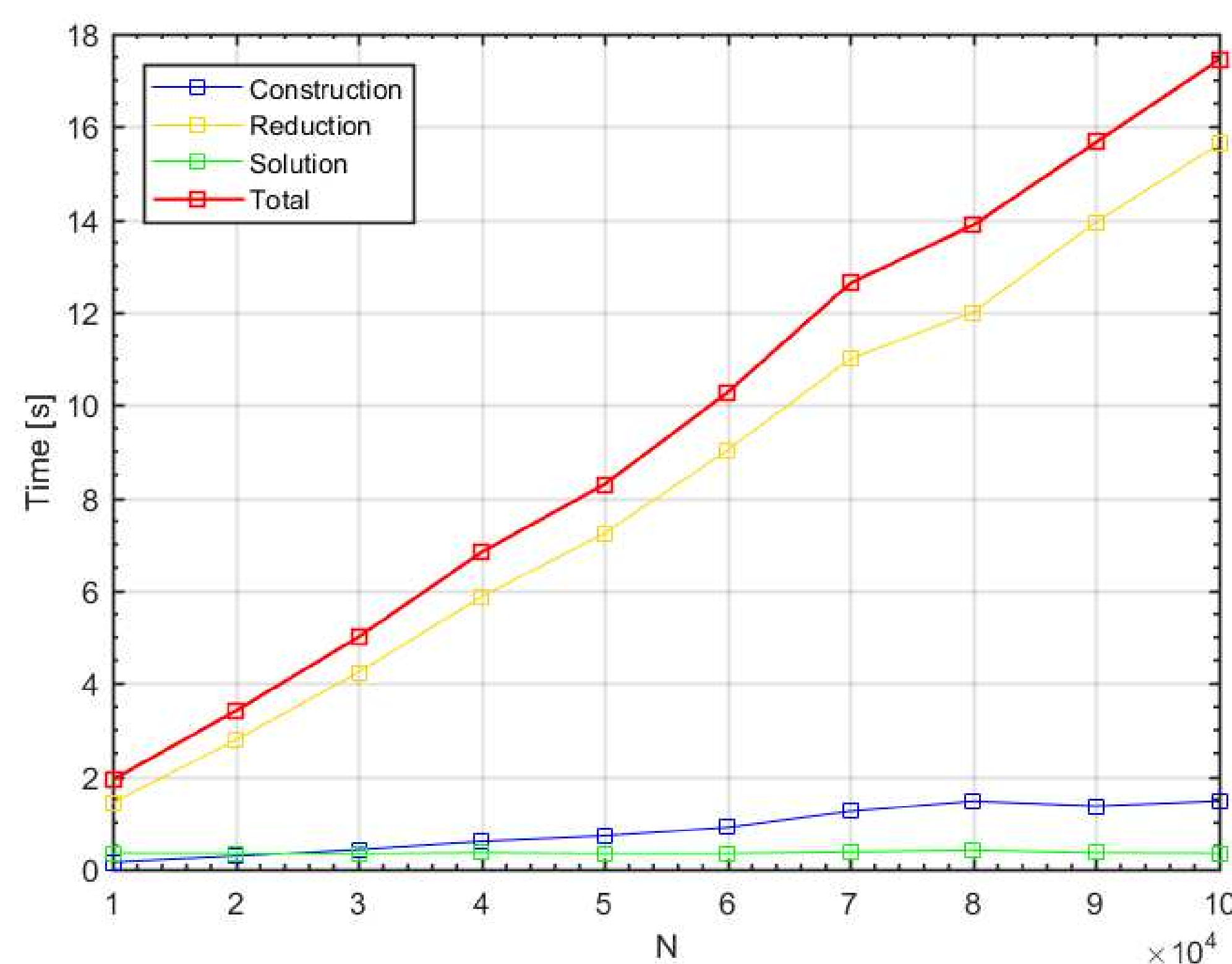
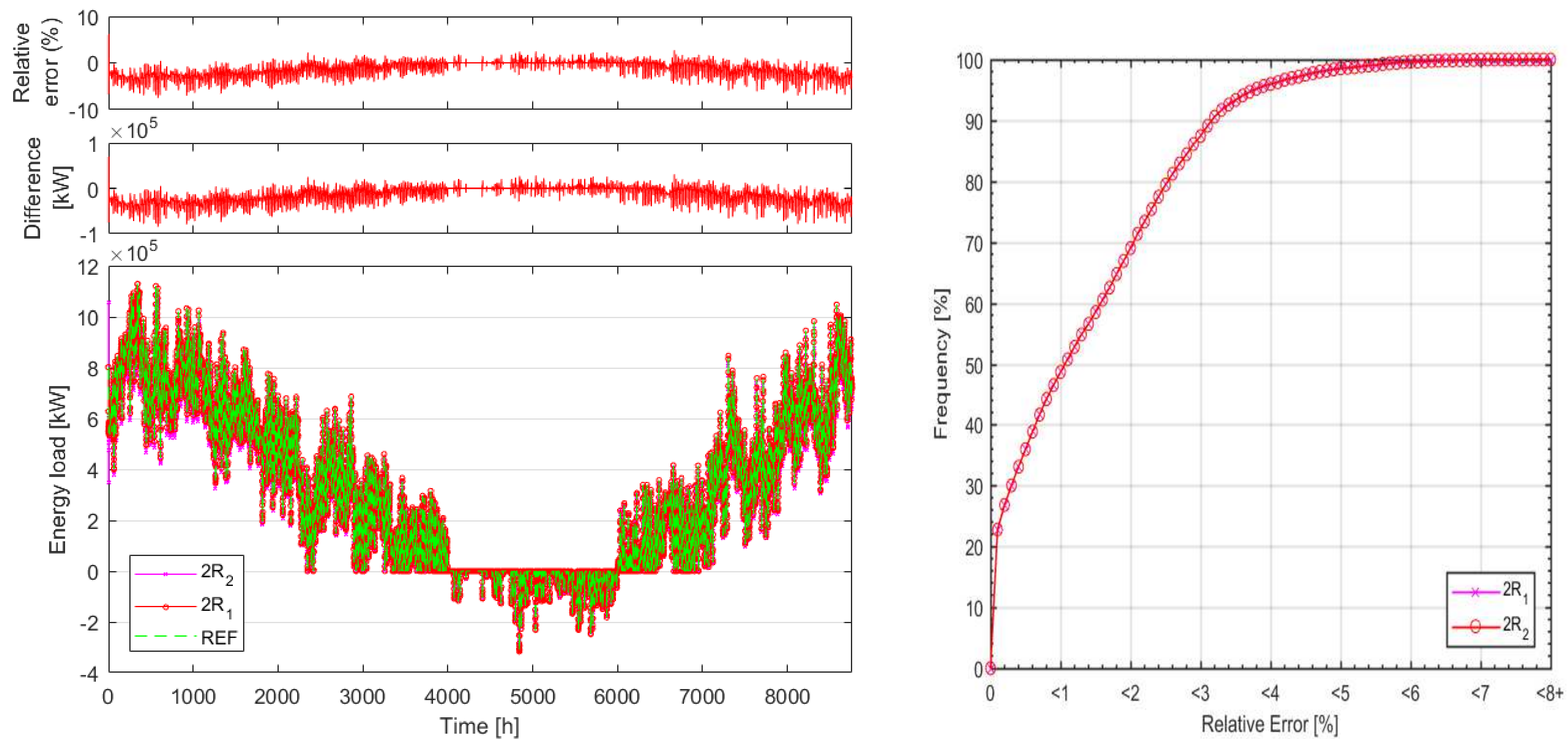


Figure 4 : Répartition temps de calcul dans la modélisation

6.2. MODELISATION DES BESOINS

Concernant la simulation annuelle de la puissance horaire, les résultats obtenus pour une ville de $N=100,000$ bâtiments est illustré en Figure 5a. L'erreur relative horaire reste inférieure à 8% pour toute l'année, tandis que pour 90% des points elle reste inférieure à 3% (Figure 5b).



(a)

(b)

Figure 5 : Puissance annuelle et erreur relative ($N=100,000$; $n=200$)

De la même manière, un zoom sur les résultats est présenté en Figure 6, montrant un comportement dynamique similaire pour les deux modèles de référence et après réduction. Comme montré précédemment, 90% du temps les écarts ne dépassent pas 3% et au maximum de 8%. Les modèles réduits produits sont donc acceptables en « appel de puissance » pour des utilisations à pas de temps horaire.

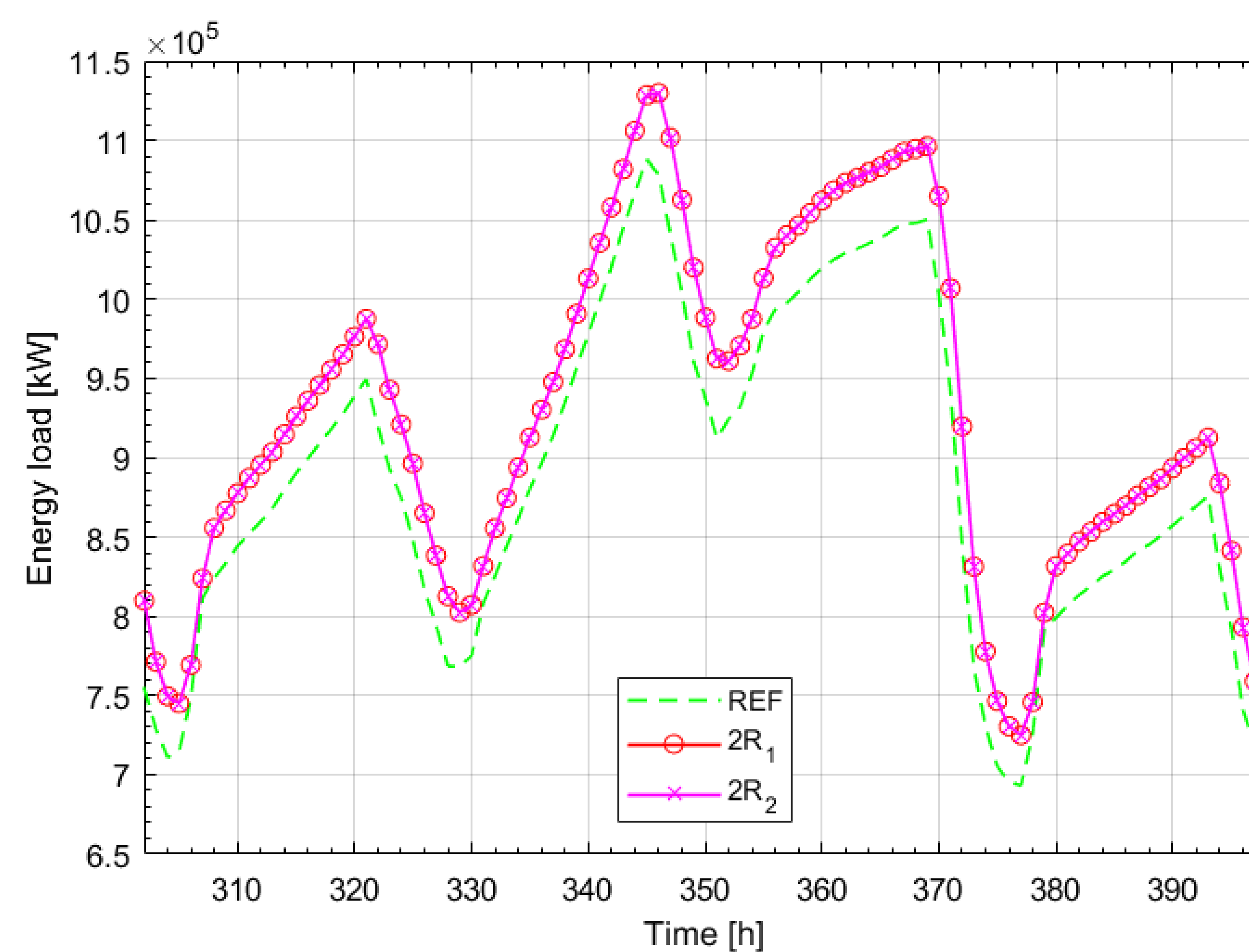


Figure 6 : Zoom sur puissance annuelle et erreur

7. CONCLUSION

La croissance et la montée en complexité des systèmes urbains ainsi que la nécessité d'une gestion efficace des ressources fait de la modélisation à l'échelle de la ville un sujet de recherche actuel important. Dans cet article, une nouvelle méthodologie de construction d'un modèle permettant l'analyse des besoins énergétiques et/ou autorisant l'étude de la gestion à ces échelles (ville, quartier, bâtiment) est proposée. Les résultats montrent globalement un bon comportement du modèle en termes de précision et vitesse de construction ou de simulation, que ce soit à l'échelle de l'année

(consommation) ou à pas de temps horaire. Ainsi, la méthodologie proposée, réalisé en multiples étapes en utilisant la sous-structuration (bâtiment, quartier, ville), montre sa capacité d'adaptation à des systèmes de toute taille et la possibilité de calcul, d'analyse de gestion à ces différentes échelles. Le modèle ici proposé a été envisagé principalement pour son application dans des modèles prédictifs des consommations horaires, bâtiment par bâtiment ou quartier par quartier, voire pour un système urbain complet. Il est également possible de l'utiliser pour la modélisation et la simulation de réseaux de chaleur urbains en le couplant à d'autres outils. Ainsi, de manière plus large, les faibles coûts de calcul associés et la possibilité de couplage avec d'autres modèles offre la possibilité de son utilisation dans des process de management, d'optimisation voire de « design urbain ».

8. BIBLIOGRAPHIE

Christoph F.Reinhart, Carlos Cerezo Davila, “Urban building energy modeling – A review of a nascent field”, *Building and Environment* (2016), ISSN: 0360-1323, Vol: 97, Page: 196-202

E.-J. Kim, G. Plessis, J-L. Huber, J-J. Roux, “Urban energy simulation: simplification and reduction of building envelope models”, *Energy and Buildings* 84 (2014) 193-202.

E.-J. Kim, X He, J-J Roux, K Johannes, F Kuznik. “Is it possible to use a single reduced model for a number of buildings in urban energy simulation?” *14th Conference of International Building Performance Simulation Association, Hyderabad, India, Dec. 7-9, 2015.*

L. Frayssinet, F. Kuznik, J.-L. Hubert, M. Milliez, J.-J. Roux, J.-J., “Adaptation of building envelope models for energy simulation at district scale”, *Energy Procedia* (2017), volume 122, September 2017, Pages 307-312

L. Frayssinet, L. Merlier, F. Kuznik, J.-L. Hubert, M. Milliez, J.-J. Roux, , “Modeling the heating and cooling energy demand of urban buildings at city scale”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (2018), 81, pp. 2318-2327

J.H. Kämpf, D. Robinson. “A simplified thermal model to support analysis of urban resource flows”, *Energy and Building*, 39 (2007) pp.445-453

Sousa Monteiro C, Pina A, Cerezo C, Reinhart C, Ferrao P. The use of multi-detail building archetypes in urban energy modelling. *Energy Procedia*, 111 (2017) 817-825.

G. Fraisse, C Viardot, O Lafabrie, G Achard. Development of simplified and accurate buildings model based on electrical analogy. *Energy and Buildings*, 34 (2002) 1017-1031

J.-J.Roux, "Proposition de modèles simplifiés pour l'étude du comportement thermique des bâtiments", 25 avril 1984, *Thèse*, INSA Lyon.

L.Laret, « Contribution au développement des modèles mathématiques du comportement thermique transitoire de structure d'habitation », *thèse de docteur en Sciences Appliquées*, Liège, 1980

B. Moore, Principal Component Analysis in Linear Systems: Controllability, Observability, and Model Reduction, *IEEE Transactions on Automatic Control*, VOL. AC-26, N° 1, February 1981.

N. Perez, P. Riederer, C. Inard, V. Partenay, Thermal Building Modelling Adapted To District Energy Simulation, *14th Conference of International Building Performance Simulation Association, Hyderabad, India, Dec. 7-9, 2015*

Influence of PMV-based control on energy consumption and thermal comfort during heating period in a highly glazed room

Abed Al-Waheed Hawila^{*1}, Abdelatif Merabtine^{2,3}, Mahdi Chemkhi^{2,4}, Rachid Bennacer⁵, Nadège Troussier¹

¹ ICD-CREIDD, UMR CNRS 6281, University of Technology of Troyes, 12 rue Marie Curie, CS 42060, 10004, Troyes Cedex, France

² EPF School of Engineering, 2 rue Fernand Sastre, 10430, Rosières-Prés-Troyes, France

³ Laboratory of Thermomechanical, GRESPI, SFR Condorcet FR CNRS 341, Université de Reims Champagne-Ardenne, Campus Moulin de la Housse, 51687 Reims Cedex, France

⁴ ICD-LASMIS, UMR CNRS 6281, University of Technology of Troyes, 12 rue Marie Curie, CS 42060, 10004, Troyes Cedex, France

⁵ ENS-Cachan, LMT, CNRS, Université Paris Saclay, 61 avenue du Président Wilson, 94235 Cachan, France

* abed_al_waheed.hawila@utt.fr

RÉSUMÉ. Dans ce travail, un nouveau type de régulation du chauffage basé sur une consigne PMV (Vote Moyen prédit) associé à un bâtiment existant comportant un local fortement vitré a été étudié. Un modèle numérique du nouveau régulateur a été développé dans l'environnement Modelica (Dymola®) et couplé au modèle global du local vitré précédemment validé par les mesures expérimentales. Les simulations numériques réalisées sur la période de chauffe ont montré la fiabilité de la régulation PMV au regard du confort thermique procuré et de la performance énergétique comparé à une régulation basée sur la température de consigne. Une étude paramétrique a ensuite été réalisée pour analyser l'impact du type et de la surface du vitrage sur le besoin énergétique du local étudié. Afin de tenir compte de l'ensemble des paramètres effectuant la performance énergétique, un plan d'expérience utilisant un plan factoriel complet (32 simulations) a également été développé pour étudier l'impact de l'ensemble des paramètres physiques et géométriques afin d'identifier la combinaison optimale dans notre cas de figure. Il s'est avéré que le besoin énergétique d'un local fortement vitré dépend considérablement de la température moyenne radiative, de l'activité humaine et du type d'habillement. Un méta-modèle statistique polynomial pourrait donc être généré et utilisé en tant qu'outil d'aide à la décision afin d'améliorer l'efficacité énergétique dans des locaux géométriquement similaires.

MOTS-CLÉS: confort thermique, besoin énergétique, local vitré.

ABSTRACT. This paper investigates the energy saving potential of a PMV-based thermal comfort control in a highly glazed room during the heating period. For the analysis, a PMV-based thermal comfort controller model is implemented in a validated Dymola® model to carry out the simulations. The results show that, PMV-based control provides consistent thermal comfort as well as energy-saving improvement. A parametric study is performed to investigate the effect of glass façades area and type on thermal comfort and energy saving. The results show that both thermal comfort and energy-savings could be improved under adequate glass façade configuration. Finally, a sensitivity study using the Design of Experiment (DoE) method is performed to study the effect of different parameters on the energy consumption in a PMV-based controlled space. Results demonstrate that energy consumption is highly sensitive to the metabolic rate, the mean radiant temperature and the clothing insulation more than those of the other parameters.

KEYWORDS: thermal comfort, energy saving, highly glazed room.

1. INTRODUCTION

The building sector is one of the largest energy end-use sectors, accounting for 44.5% of the total energy consumption in France. About 68% of this energy consumption is used for HVAC systems (Belaïd 2017), which aim at providing acceptable thermal comfort for buildings occupants. This concern has led to put some regulations aiming to limit the energy use in the building sector. Concurrently, the primary objective of buildings must be providing a comfortable environment for the people, since they spend 80-90% of the day indoors (U.S Department of Labor 2012). Therefore, it is necessary that energy efficient buildings be designed such that a tradeoff between energy saving and occupants comfort is achieved (Castilla et al. 2013). Thermal comfort is defined as ‘the condition of the mind in which satisfaction is expressed with the thermal environment’ (ASHRAE 2010). Among all the standard thermal comfort indices, Fanger’s Predicted Mean Vote (PMV) and Percentage of Persons Dissatisfied (PPD) are the most applicable indices that can be used to evaluate the thermal comfort within a space and to quantify its value (Enescu 2017). In the last two decades, numerous works have been conducted to develop and analyze several thermal comfort control schemes in the emphasis to reduce the energy use in the building sector while maintaining a comfortable indoor environment for buildings occupants’. One approach is based on PMV determination, where an advanced control scheme is used to adjust the controlled variable, such as room temperature and relative humidity, so that the user-defined PMV is maintained (Xu et al. 2017; Ruano et al. 2016). The other approach is based on the inverse calculation of the PMV. This approach was rarely addressed in the literature (Kang et al. 2010; Hwang and Shu 2011). Kang et al. (2010) proposed a PMV-based thermal comfort control that uses the inverse calculation of the PMV index to adjust the set-point room temperature of the existing thermostatic controller according to a user-defined PMV and changes in the indoor climate. Based on their findings, thermal comfort control provides energy saving effect as well as consistent thermal comfort. Hwang and Shu (2011) examined the effect of changing the annual cooling load through the building envelope on the energy-saving potential of the PMV-based control. The results show that the energy-saving potential in a PMV-based controlled space decreases with high annual cooling load through building envelopes. The above studies were conducted with the focus on the case of cooling season. Nevertheless, no study was found in the literature investigating the energy-saving potential of a thermal comfort-control, based on the inverse calculation of the PMV index, throughout the heating period in a highly glazed room for the European climate.

The aim of this study is to investigate the energy saving potential of a PMV-based thermal comfort control during the heating period. This study focused on a room with two external glass façades where the Mean Radiant Temperature (MRT) is highly affected by changes in solar radiation and the outdoor temperature and thus affecting the thermal comfort. For the analysis, a comparative building simulation study between conventional thermostatic control and PMV-based control is performed. This addresses the energy-saving effect in a PMV-based controlled space and confirms the advantages of such control approach to provide more adequate thermal comfort. Moreover, a parametric study is performed to investigate the reliability of such controller under different glass façades configurations. Eventually, a sensitivity study using the Design of Experiment (DoE) method is performed to study the effect of occupants and environmental parameters as well as the most influential parameters on the energy consumption in a PMV-based comfort controlled space.

2. MATERIALS AND METHODS

2.1. CASE STUDY

The considered building of this study is an existing engineering school located in Troyes, France. The building was designed to meet the low energy consumption building and the French standards (MEDDE 2011). In the south-east part of the ground floor of the building, a room called “Foyer” has been selected for this study. This room is a confidential place in which students meet to eat, rest, and do activities. It has two fully glazed external façades, south and east oriented (Fig. 1).



Figure 1 : The Foyer

For the analysis, a numerical model was developed using Dymola[®] to carry out the simulations. The developed model was validated by comparing the obtained results of the room temperature and relative humidity with the results obtained from an experimental study performed to the same case study (Makondo et al. 2015). This last was carried out to calculate and analyze the PMV and PPD indices. The environmental parameters were measured using multifunctional sensor, while the metabolic rate (MR) and the clothing insulation (CI) were assumed to be 70 W.m^{-2} (1.2 met), representing sedentary activity, and $0.155 \text{ K.m}^2.\text{W}^{-1}$ (1 clo), representing typical winter clothing, respectively. PMV and PPD were calculated using the formulas presented in ISO 7730 (ISO 2005). Further information about the model development and validation process can be found in (Hawila, Merabtine, and Troussier 2017).

2.2. PMV-BASED THERMAL COMFORT CONTROL

Kang et al. (2010) suggested a PMV-based thermal comfort control approach based on PMV inverse calculation, instead of a fixed temperature thermostatic control. Such control approach aims to maintain the user defined PMV by adjusting the room temperature with respect to the changes in other parameters affecting the indoor thermal comfort, mainly the MRT due to the presence of glazing walls. This concept is briefly summarized in Equation (1),

$$T_a = f(PMV, MRT, CI, MR, RH, AV), \quad (1)$$

where T_a represent the air temperature (K), RH is the relative humidity (%), and AV is the air velocity (m.s^{-1}). PMV index, MR and CI are user-defined parameters provided as an input to the controller, while MRT, RH and AV are measured parameters from the studied space.

A comparative building simulation study between the PMV-based control and conventional set-point control was carried out. The aim is to investigate the characteristics of occupants’ thermal comfort and energy consumption in the PMV-based comfort controlled case. The room temperature of the Foyer was generally set at $20 \text{ }^\circ\text{C}$ during the heating season. However, the new French standards recommend that the room temperature set-point should be $19 \text{ }^\circ\text{C}$. On the other hand, the European

standards recommend the set-points of 19 °C, 20 °C and 21 °C to meet the criteria of classes I, II and III, respectively (Cen 2007). In this regards, the room temperature set-point in the thermostatic-control was set to 19 °C, 20 °C and 21 °C. On the other hand, the PMV index was set to -0.5 in the PMV-based comfort controlled case.

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1. COMPARATIVE STUDY BETWEEN THERMOSTATIC-CONTROL AND COMFORT-CONTROL

Fig. 2 shows the frequency of the PMV index, defined as the fraction of time during which the values of the PMV outcome within a specified range limits, and energy consumption of both the thermostatic control and the comfort control for the entire heating period (1st October – 15th April). The results show that, the PMV index in the thermostatic control at set-points of 19 °C, 20°C and 21°C was outside the acceptable comfort range of $-0.5 \leq PMV \leq +0.5$ about 80%, 68%, and 9% of the studied period, respectively. However, about 3.5% of the PMV index was outside the acceptable comfort range of $-0.5 \leq PMV \leq +0.5$ in the thermal comfort control throughout the entire heating period. These results show that the thermostatic control at a set-point of 21 °C, and the comfort control at a set-point of PMV -0.5 offered a better thermal comfort. On the contrary, the energy consumption results show that the thermostatic control at set-point of 19 °C consumed the least heating energy followed by the thermostatic control at set-points of 20 °C and 21 °C, respectively. Moreover, the amount of energy consumption by the comfort control was found equivalent to that of set-point 20 °C, and allowed about 10 % reduction of energy consumption compared to that of set-point 21 °C. These results could be attributed to the highly glazed envelope, which results in large cold surfaces during cold outdoor climatic conditions, leading to decreased MRT, thus low PMV values at the set-points of 19°C and 20°C. In addition, at the set-point of 21°C the higher set-point temperature recuperated the decrease in the MRT and maintained the PMV value within the acceptable range, but the cold surfaces lead to more heat loss through the building envelope, thus more heating energy consumption. While in the comfort-control the room temperature is predominantly determined by the MRT, thus the variations in the MRT lead to less heating energy under intense solar radiations and more heating under cold outdoor climates while maintaining thermally comfortable environment. Therefore, the results show that PMV-based thermal comfort controller is a reasonable solution to neutralize the trade-off between thermal comfort and energy savings.

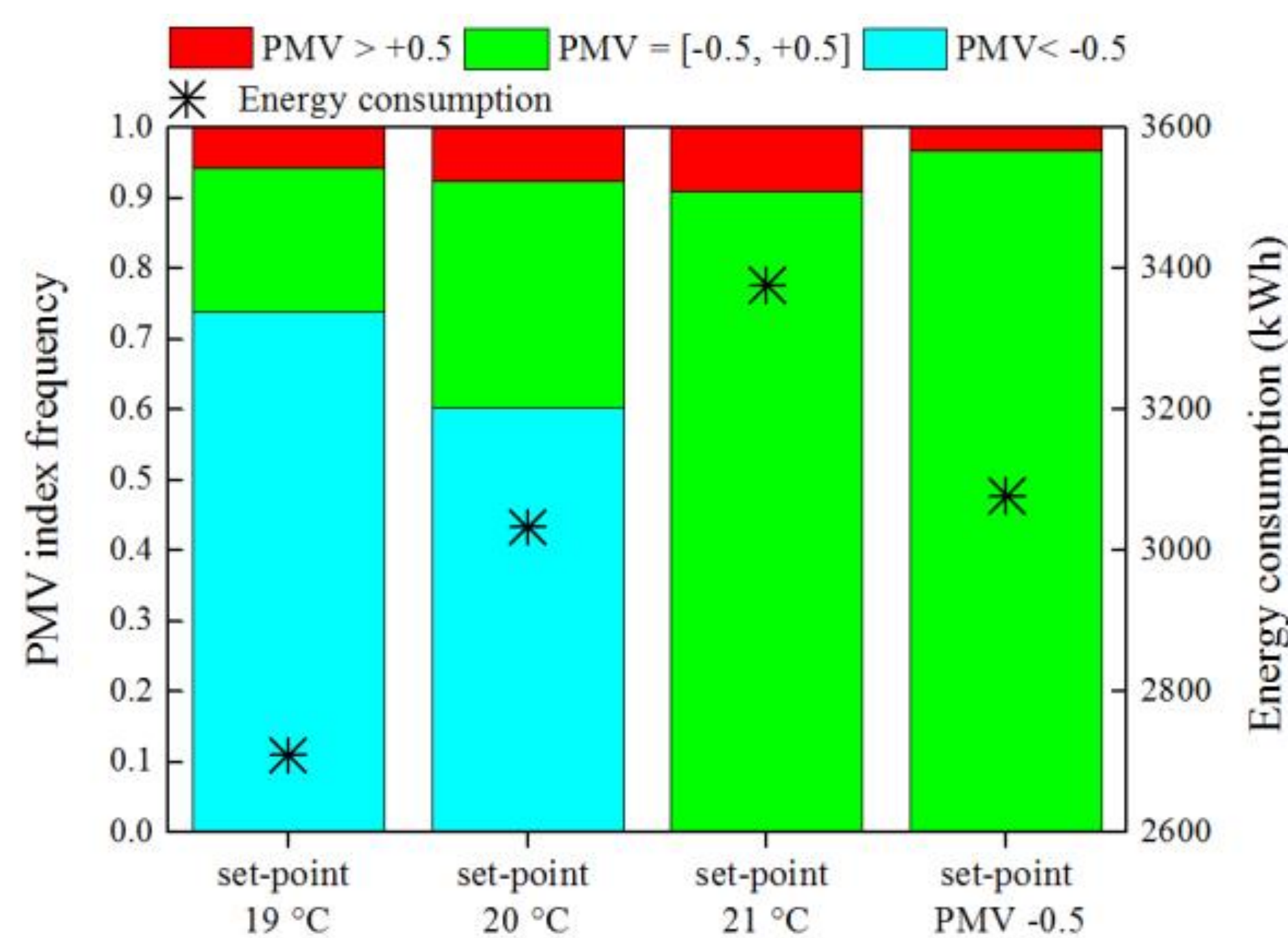


Figure 2: PMV index frequency and total heating energy consumption during a heating period

3.2. PARAMETRIC STUDY

In the following section, the effect of glass façades configuration on the thermal comfort and energy consumption was investigated. A case with triple glazing low-e, and another case with 16 % Window to Floor Ratio (WFR), the minimum required by the French standards (MEDDE 2011), were studied.

The results reported in Fig. 3a show that, the PMV index in the thermostatic control at set-points of 19°C, 20°C and 21°C was outside the recommended comfort range about 80%, 64%, and 7.9%, respectively, throughout the investigated period. However, about 1.9% of the PMV index was outside the acceptable comfort range in the thermal comfort control. In addition, changing the glazing type to triple low-e glazing allows about 18 % reduction of energy consumption compared to the base case in all the studied cases. The results reported in Fig. 3b show that, the PMV index in the thermostatic control at set-points of 19 °C and 20°C was below the acceptable comfort range of $-0.5 \leq PMV \leq +0.5$ about 95.4 % and 62 %, respectively, throughout the investigated period. While, the PMV index was maintained within the comfort range limits throughout the heating period in the thermostatic control at a set-point of 21 °C and in the comfort-control. Moreover, decreasing the glazing area to 16% WFR allows about 25% reduction of energy consumption compared to the base case in all the studied cases.

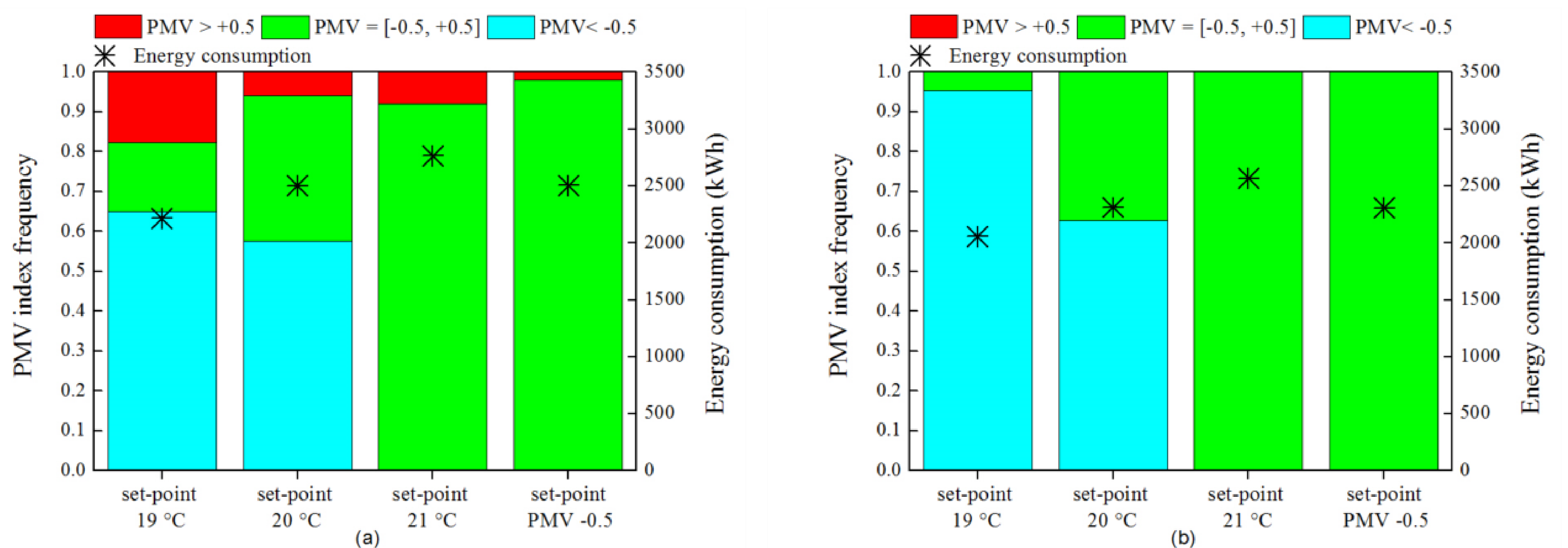


Figure 3: PMV index frequency and total heating energy consumption during a heating period, using triple low-e glazing (a), and for 16% WFR (b).

The results show that decreasing the glazing area alleviates the high PMV index values in all the studied cases. Since less glazing area implies less hot surfaces area under intense solar radiation, allowing a decrease in the mean radiant temperature, thus decreasing the PMV values. On the other hand, changing the glazing type to triple low-e did not prevent exceeding of the upper comfort level of +0.5, since changing the glazing type did not reduce the large hot surfaces area. Moreover, changing the glazing type or decreasing the glazing area, results in improved thermal resistance of the external walls, allowing the reduced transmission heat loss, thus improving the heating energy consumption. Based on these results, for the set-point of 21°C and the comfort-control reducing the glazing area coupled with a triple low-e glazing could lead to an optimum improvement in both thermal comfort and energy consumption. However, for the set-points of 19°C and 20°C it is not the case, variation of both parameters at the same time is needed in order to obtain an optimum combination.

One can notice that, under different glazing type and glazing area, the thermal comfort control offered better thermal comfort than thermostatic control at set-points of 19°C and 20 °C and

equivalent to that offered by the set-point of 21 °C. In addition, the amount of energy consumption by the comfort controlled case was found to be equivalent to that consumed by thermostatic controlled at set-point of 20 °C and allows about 10 % reduction of energy consumption compared to that of set-point of 21 °C. As a result, it is clear that the thermal comfort controlled still performs better than the thermostatic control at all the studied set-points regarding the thermal comfort and energy consumption levels.

3.3. SENSITIVITY STUDY

In order to identify the significant factors that affect the energy consumption in a comfort-controlled space, sensitivity study was performed using the DoE technique. The DoE was based on full factorial design considering five factors, each at two levels, since it considers all possible factors combination, this results in 32 simulations. Each factor has a higher (+1) and lower (-1) level. The higher and lower levels of each factor are based on the maximum and minimum values recommended by the European standards (Cen 2007). Table 1 reports the higher and lower levels of each factor. The PMV was set as fixed factor at -0.5. The energy consumption of the heating system during one week is considered as the response variable in the DoE. Once the experimental plan was obtained, the experiments were carried out by running the simulation model for different combination of factors levels. Minitab[®] software, a statistical computer package, was used to analyze the simulation results.

Factors	-1	+1
$A = MRT$ (°C)	16	30
$B = RH$ (%)	30	70
$C = AV$ (m.s ⁻¹)	0.15	0.25
$D = MR$ (W.m ⁻²)	57	95
$E = CI$ (clo)	0.8	1.2

Table 1 : Factor levels

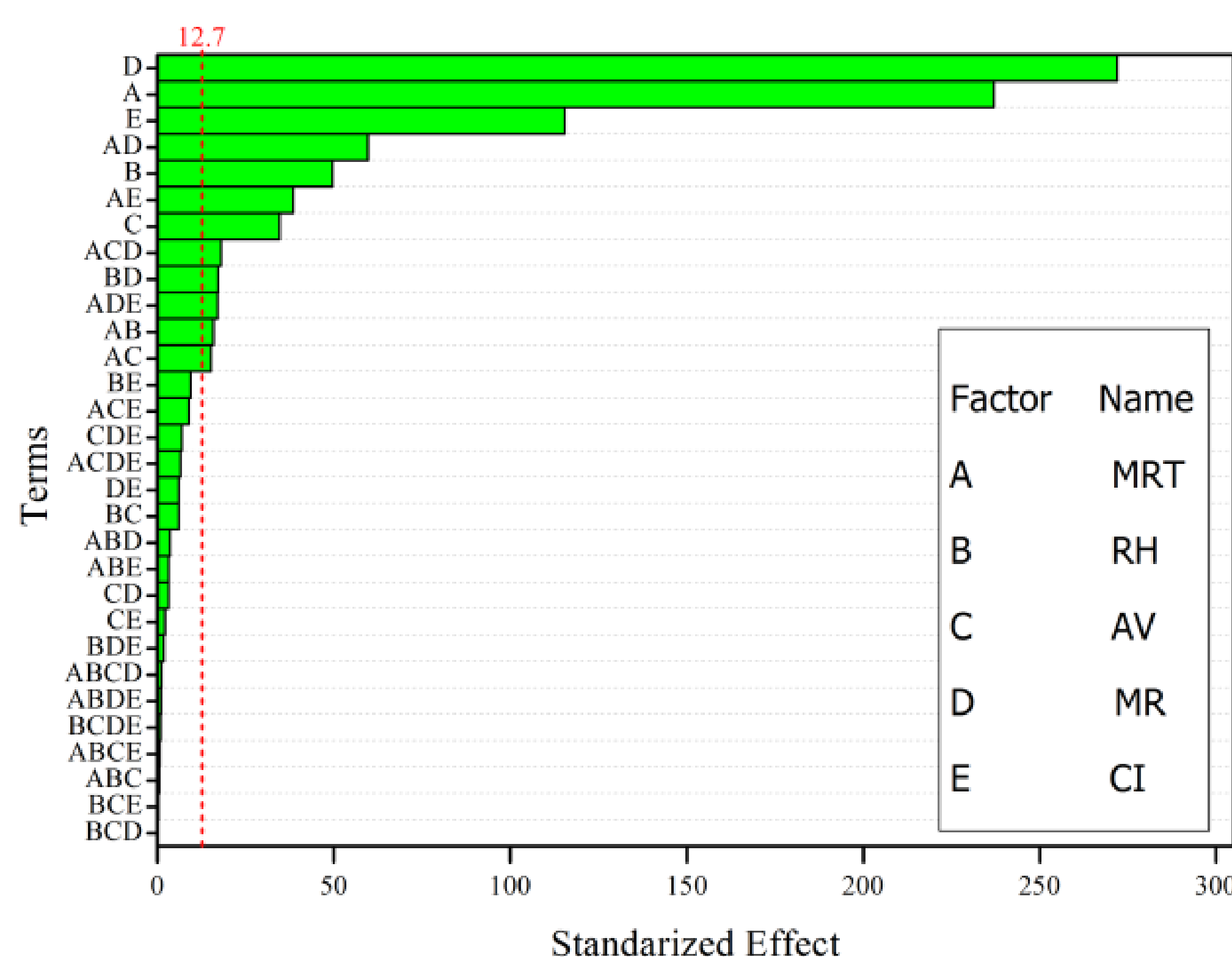


Figure 4 : Pareto chart of the standardized effects (response is heating (kWh); $\alpha = 0.05$)

The Analysis of Variance (ANOVA) was carried out in order to identify the significant factors. The Pareto chart of the factors is shown in Fig. 4. The results show that the MR, the MRT and the CI have

the highest effect on the heating energy demand in a thermal comfort-controlled space. In addition, the main effect plot of each of the studied factors is shown in Fig. 5. The effect of a factor is defined as the change in the response due to the change in the level of the factor. It can be clearly seen that the slopes, which designate the influence, of the MR, the MRT and the CI, are the highest compared to those of the other parameters. These results recommend that the user-defined parameters, mainly occupants' behavior (MR and CI), must be accurately defined in a thermal comfort-controlled space due to their high effect on the energy consumption. [These results indicate that this control approach could be suitable for spaces where occupants activity and clothing levels are the same and could be assumed as a fixed values, such as in office buildings and class rooms. However, it couldn't be used in spaces where occupants' activity and clothing levels are different, such as in industrial buildings.](#)

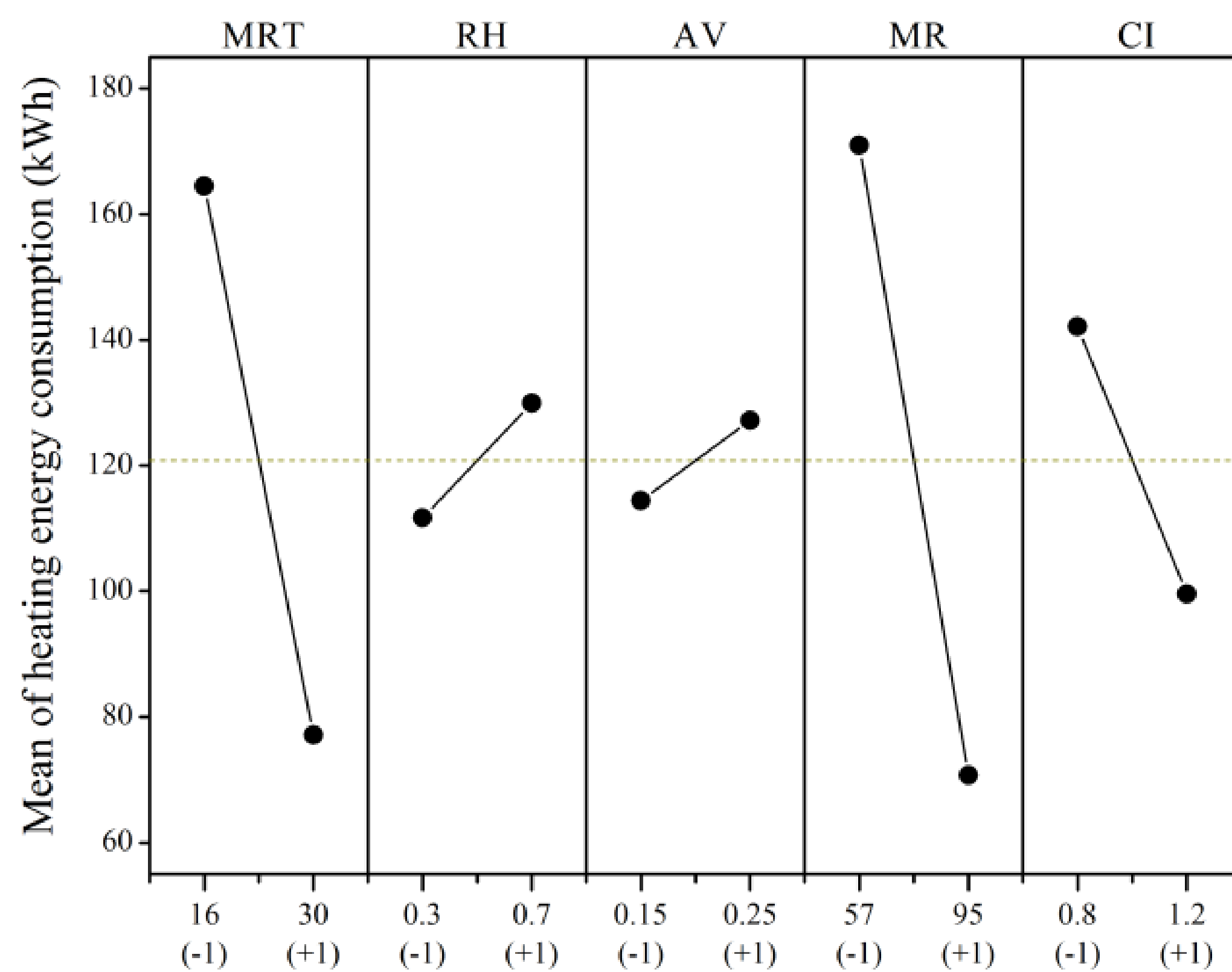


Figure 5: Main effect plot for heating (kWh)

4. CONCLUSION

In this study, the characteristics of occupants' thermal comfort and the energy-saving potential of a PMV-based thermal comfort control during winter season were investigated. An existing engineering school building was used to perform a comparative study between comfort control and thermostatic control. The results show that PMV-based comfort control offers stable thermal comfort as well as energy-saving effect. Moreover, parametric study was performed to investigate the effect of glass façades configuration on thermal comfort and energy consumption. The results indicate that acceptable thermal comfort and energy saving can be achieved through the careful design of glass façades. Furthermore, the results confirmed that achieving both thermal comfort and energy saving is trustworthy by using the PMV-based thermal comfort control. Finally, a sensitivity study was performed to study the effect of different parameters on the energy consumption in PMV-based comfort controlled space. The results demonstrate that the metabolic rate, the mean radiant temperature and the clothing insulation were the most influential factors. In other words, the results suggest that in a comfort controlled space occupants' behavior (clothing insulation and metabolic rate) must be accurately defined due to their high effect on the energy consumption. In addition, the mean radiant temperature is a major factor to be investigated in order to save energy.

5. ACKNOWLEDGMENTS

The authors would like to thank CRCA (Conseil régional de Champagne-Ardenne) and FEDER (Fonds européen de développement économique et régional) for funding this work.

6. BIBLIOGRAPHIE

- ASHRAE. 2010. “Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy.” *ASHRAE Standard*, no. STANDARD 55: 1–44. doi:1041-2336.
- Belaïd, Fateh. 2017. “Untangling the Complexity of the Direct and Indirect Determinants of the Residential Energy Consumption in France: Quantitative Analysis Using a Structural Equation Modeling Approach.” *Energy Policy* 110 (November). Elsevier Ltd: 246–56. doi:10.1016/j.enpol.2017.08.027.
- Castilla, M., J. D. Álvarez, M. G. Ortega, and M. R. Arahál. 2013. “Neural Network and Polynomial Approximated Thermal Comfort Models for HVAC Systems.” *Building and Environment* 59: 107–15. doi:10.1016/j.buildenv.2012.08.012.
- Cen. 2007. “EN 15251: Indoor Environmental Input Parameters for Design and Assessment of Energy Performance of Buildings- Addressing Indoor Air Quality, Thermal Environment, Lighting and Acoustics.” *European Committee for Standardization* 3: 1–52. doi:10.1520/E2019-03R13.Copyright.
- Enescu, Diana. 2017. “A Review of Thermal Comfort Models and Indicators for Indoor Environments.” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. doi:10.1016/j.rser.2017.05.175.
- Hawila, Abed Al Waheed, Abdelatif Merabtine, and Nadège Troussier. 2017. “Numerical and Experimental Investigation on the Thermal Behavior of the Building Integrating Occupant Thermal Comfort.” In *Internation Conference on Materials and Energy*. Tianjin, China.
- Hwang, Ruey Lung, and Shiu Ya Shu. 2011. “Building Envelope Regulations on Thermal Comfort in Glass Facade Buildings and Energy-Saving Potential for PMV-Based Comfort Control.” *Building and Environment* 46 (4): 824–34. doi:10.1016/j.buildenv.2010.10.009.
- ISO. 2005. “ISO 7730: 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.” *Management* 3: 605–15. doi:10.1016/j.soildyn.2004.11.005.
- Kang, Dong Hwa, Paek Hyoun Mo, Dong Hee Choi, Seung Yeong Song, Myoung Souk Yeo, and Kwang Woo Kim. 2010. “Effect of MRT Variation on the Energy Consumption in a PMV-Controlled Office.” *Building and Environment* 45 (9): 1914–22. doi:10.1016/j.buildenv.2010.02.020.
- Makondo, William, Abdelatif Merabtine, Sandrine Pincemin, Jean Podlecki, and Ricardo Garcia. 2015. “Capteur Multifonctions Pour l'Évaluation Du Confort Thermique Dans Les bâTiments.” In *Congrès Francais de Thermique*. La Rochelle, France.
- MEDDE. 2011. “Réglementation Thermique 2012 : Un Saut Énergétique Pour Les bâTiments Neufs.”
- Ruano, A., S. Pesteh, S. Silva, H. Duarte, G. Mestre, P. M. Ferreira, H. Khosravani, and R. Horta. 2016. “PVM-Based Intelligent Predictive Control of HVAC Systems.” *IFAC-PapersOnLine* 49 (5): 371–76. doi:10.1016/j.ifacol.2016.07.141.
- U.S Department of Labor. 2012. “Bureau of Labor Statistics.” *Occupational Outlook Handbook, 2012-13 Edition, Medical Assistants*. <http://www.bls.gov/ooh/healthcare/medical-assistants.htm>.
- Xu, Zhanbo, Guoqiang Hu, Costas J. Spanos, and Stefano Schiavon. 2017. “PMV-Based Event-Triggered Mechanism for Building Energy Management under Uncertainties.” *Energy and Buildings* 152: 73–85. doi:10.1016/j.enbuild.2017.07.008.

Bâtiments démonstrateurs PREBAT : retour d'expérience et premiers enseignements sur la performance réelle et sur les écarts calcul/mesure

Myriam Humbert*¹, Constance Lancelle², Jean-Alain Bouchet³, Bassam Moujalled⁴

¹ CEREMA, Direction Ouest, Saint Briec F-22015, France,

² CEREMA, Direction Ouest, Les Ponts-de-Cé F-49130, France

³ CEREMA, Direction Méditerranée, Aix-en-Provence F-13290, France

⁴ CEREMA, Direction Centre-Est, l'Isle d'Abeau F-38081, France

*Myriam.Humbert@cerema.fr

RESUME. Dans le cadre du programme d'expérimentation PREBAT « Bâtiment démonstrateur », le Cerema assure le suivi-évaluation de 140 bâtiments instrumentés et la capitalisation des enseignements de leur suivi. Un des objectifs est de rendre compte des performances énergétiques réelles des bâtiments occupés et d'analyser les écarts entre performances mesurées et attendues. Pour cela, le Cerema a développé une méthodologie basée sur l'analyse de sensibilité des consommations en fonction de certains paramètres mesurés ou évalués, méthodologie présentée dans cet article. Dans un premier temps, la performance intrinsèque et les conditions de suivi des bâtiments sont caractérisées à partir des mesures sur site. Ensuite, les principales causes d'écart entre la consommation de chauffage mesurée et attendue sur un échantillon de 45 bâtiments sont analysées. Trois facteurs influents (en fréquence et en impact) se dégagent : la transmission thermique de l'enveloppe la météo et la température de consigne.

MOTS-CLÉS : mesure, performance énergétique intrinsèque, confrontation calcul/mesure

ABSTRACT. In the framework of the French experimentation program « Prebat », Cerema has monitored and evaluated the performance of 140 low energy buildings and has drawn lessons from it. One of the objectives is to report the real energy performance of occupied buildings and analyze the performance gap between measured and expected energy consumptions. For this, Cerema has developed a methodology based on a sensitivity analysis of energy consumption according to different parameters either measured or evaluated. First, the methodology is presented in the article. Then, the envelope and heat exchanger performances and the monitoring conditions of the buildings are characterized from in situ measurements. Finally, the main causes of difference between the measured and expected heating consumptions are analyzed based on a sample of 45 buildings. Three influential factors (in terms of frequency and impact) are identified: the thermal transmission of the envelope, the weather conditions and the heating setpoint temperature.

KEYWORDS : in situ measurements, Building components performance, confrontation calculation/measurement

1. INTRODUCTION

Dans le cadre du programme de recherche et d'expérimentation sur l'énergie dans le bâtiment (PREBAT) lancé en 2005, plus de 200 bâtiments, lauréats des appels à projet Ademe-région « Bâtiments démonstrateurs », ont été instrumentés durant deux ans afin d'identifier leur performance réelle (performance énergétique et confort thermique). Le Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement (Cerema) assure les suivis-évaluations de près de 70 % des bâtiments instrumentés ainsi que la capitalisation des enseignements de l'ensemble des 200 suivis-évaluations. Les bâtiments suivis sont diversifiés, avec 70 % d'opérations neuves et 56 % de bâtiments

résidentiels. Ils sont répartis sur tout le territoire métropolitain, et toutes les zones climatiques sont concernées. Tous ces bâtiments sont occupés.

Un des objectifs de ces suivis-évaluations est de rendre compte des performances énergétiques réelles des bâtiments occupés et d'analyser les écarts entre les performances mesurées et celles attendues. Il s'agit en particulier d'identifier les écarts relevant des conditions de suivi (conditions météorologiques et d'occupation) de ceux relevant de la performance intrinsèque du bâtiment (performance de l'enveloppe et des équipements). Pour cela, le Cerema développe une méthodologie basée sur l'analyse de sensibilité permettant d'évaluer la performance énergétique d'un bâtiment à partir de mesures.

Cet article se concentre particulièrement sur l'analyse des facteurs pouvant impacter la consommation de chauffage et de leurs effets sur cette dernière. Le panel d'opérations pour lesquelles les données nécessaires à l'analyse sont disponibles est réduit à 45 opérations. Tout d'abord, la méthode d'analyse de la performance des bâtiments suivis est présentée. Ensuite la performance des 45 bâtiments retenus sur lesquels porte l'analyse est caractérisée. Enfin sont analysées les causes impactant le plus les écarts entre la consommation de chauffage mesurée et attendue sur l'échantillon de bâtiments.

2. METHODE D'ANALYSE DE LA PERFORMANCE DES OPERATIONS SUIVIES

2.1. CARACTERISATION IN SITU

Pour chaque bâtiment, des mesures horaires sont mis en œuvre en site occupé durant deux années :

- les conditions météorologiques : température extérieure, humidité relative, rayonnement solaire global horizontal, vitesse du vent ;
- les conditions d'ambiance intérieures (température, humidité relative) sur un échantillon de locaux et des températures en entrée et sortie des caissons de ventilation double flux ;
- les consommations : d'électricité totale, d'énergie totale de combustible le cas échéant, d'éclairage, des ventilateurs, des auxiliaires de chauffage et d'ECS ;
- les énergies utiles pour le chauffage et la production d'eau chaude sanitaire (ECS).

Pour chaque bâtiment, les mesures sont complétées par un suivi de chantier visant à repérer les différences entre les prescriptions des études et la réalisation. Une mesure d'étanchéité à l'air et une thermographie infrarouge sont réalisées à réception. Enfin, une fois le bâtiment occupé, une enquête sociologique est menée auprès d'un échantillon d'occupants pour connaître les modes d'occupation.

A partir de ces différentes mesures et données relevées sont déterminés les indicateurs suivant :

- la transmission thermique expérimentale de l'enveloppe ($U_{\text{bât-exp}}$) est identifiée à partir d'un bilan thermique hebdomadaire sur la semaine la plus froide selon la méthode EBBE (Berger et al 2010 ; Humbert et al. 2014). Le bilan hebdomadaire permet de s'affranchir de l'inertie du bâtiment. Les apports solaires, les apports internes, les déperditions liées à la ventilation et à l'étanchéité à l'air ainsi que les apports du système de chauffage sont estimés heure par heure à partir des mesures ;
- la température de consigne d'hiver, estimée pour chaque bâtiment à partir de l'analyse statistique des températures en période de chauffe en se basant sur la mesure de la température intérieure pendant les heures de fonctionnement du chauffage (hors relance) et pendant les heures d'occupation identifiées par enquête selon la méthode décrite dans (Cerema 2017) ;

- l'efficacité énergétique des échangeurs double flux qui traduit la proportion d'énergie récupérable et effectivement récupérée par le système de ventilation. Pour chaque bâtiment équipé de ventilation double flux, cette efficacité est estimée selon la méthode décrite dans (Cerema 2017) en fonction des températures de soufflage, de reprise et extérieure sur les deux mois durant lesquels la différence entre la température extérieure et la température intérieure est la plus grande.

Ces différentes températures ont été mesurées au plus près du caisson de ventilation, l'échangeur n'étant pas accessible. Dans certains cas, les températures d'air repris correspondent aux températures intérieures. Dans ce cas, l'efficacité mesurée inclut les pertes du réseau de reprise. Il s'agit là d'une limite opérationnelle souvent liée aux aspects économiques d'une campagne de mesure aussi vaste ;

- les scénarios d'apports internes ($W/m^2_{chauffé}$ par heure) comprennent les apports liés à la consommation électrique des équipements et les apports internes liées aux occupants, évalué selon la méthode décrite dans (Cerema 2017). A des fins de comparaison entre bâtiments, le niveau des apports internes présenté par la suite, a été ramené aux mêmes heures conventionnelles d'occupation pour une même destination d'usage.

D'autres indicateurs ont également été évalués mais ne seront pas détaillés dans cet article (nombre d'heures hebdomadaires et annuelles d'occupation, température de non chauffage, degré-jours des années de suivis, etc.).

2.2. ANALYSE DE SENSIBILITE

Est-ce que les conditions de suivi et les indicateurs précédemment identifiés expliquent tout ou partie des écarts constatés entre la consommation de chauffage visée et la consommation de chauffage mesurée ? Il est proposé, en première approche, de réaliser, pour chaque bâtiment, une analyse de sensibilité sur la consommation de chauffage calculée à partir des écarts constatés sur les conditions de suivi et sur ces indicateurs. Certes, la simulation énergétique dynamique ne peut représenter toutes les conditions réelles d'occupation, notamment parce qu'il ne modélise pas les « mauvais » réglages de systèmes, elle permet toutefois d'identifier les indicateurs potentiellement les plus impactant. Une analyse statistique -sur la mesure uniquement- pourra être menée dans un second temps, mais pour l'instant l'échantillon n'est pas assez important pour qu'elle soit concluante (cf. 6. Conclusion et Perspectives).

L'outil de simulation énergétique retenu est le moteur de calcul des réglementations thermiques (RT) françaises pour le neuf (Th-CE 2005) et pour la rénovation (Th-CEx) en version « faisabilité en approvisionnement d'énergie ». Le calcul réglementaire étant obligatoire (mais non prévisionnel du fait de nombreuses conventions), nous avons accès aux fichiers de données d'entrée au format électronique. Avec cette version des moteurs, les fichiers de données d'entrée du projet définis d'une manière conventionnelle dans le calcul réglementaire, sont modifiables.

Toutefois, les moteurs n'étant pas totalement ouverts et certaines informations étant difficilement voire non mesurables, certaines données d'entrée n'ont pas pu être modifiées comme les scénarios d'ouverture des fenêtres, le scénario de gestion des protections solaires, ainsi que les horaires et l'amplitude des réduits de la température de consigne. Par ailleurs, les défauts de réglage observés sont difficilement modélisables en général et les débits de ventilation ne sont pas modifiés, car non mesurés dans le cadre des suivis.

3. CARACTERISATION DE L'ECHANTILLON DE BATIMENTS SUIVIS

3.1. CONDITIONS DE SUIVI

3.1.1. Température de consigne

Pour l'habitat et les bureaux, les températures de consigne pratiquées sont généralement supérieures de 0 à 3°C aux valeurs de l'étude thermique réglementaire, soit généralement comprises entre 20 et 23 °C, avec des extrêmes autour de 18 et 25 °C (cf. figure 1).

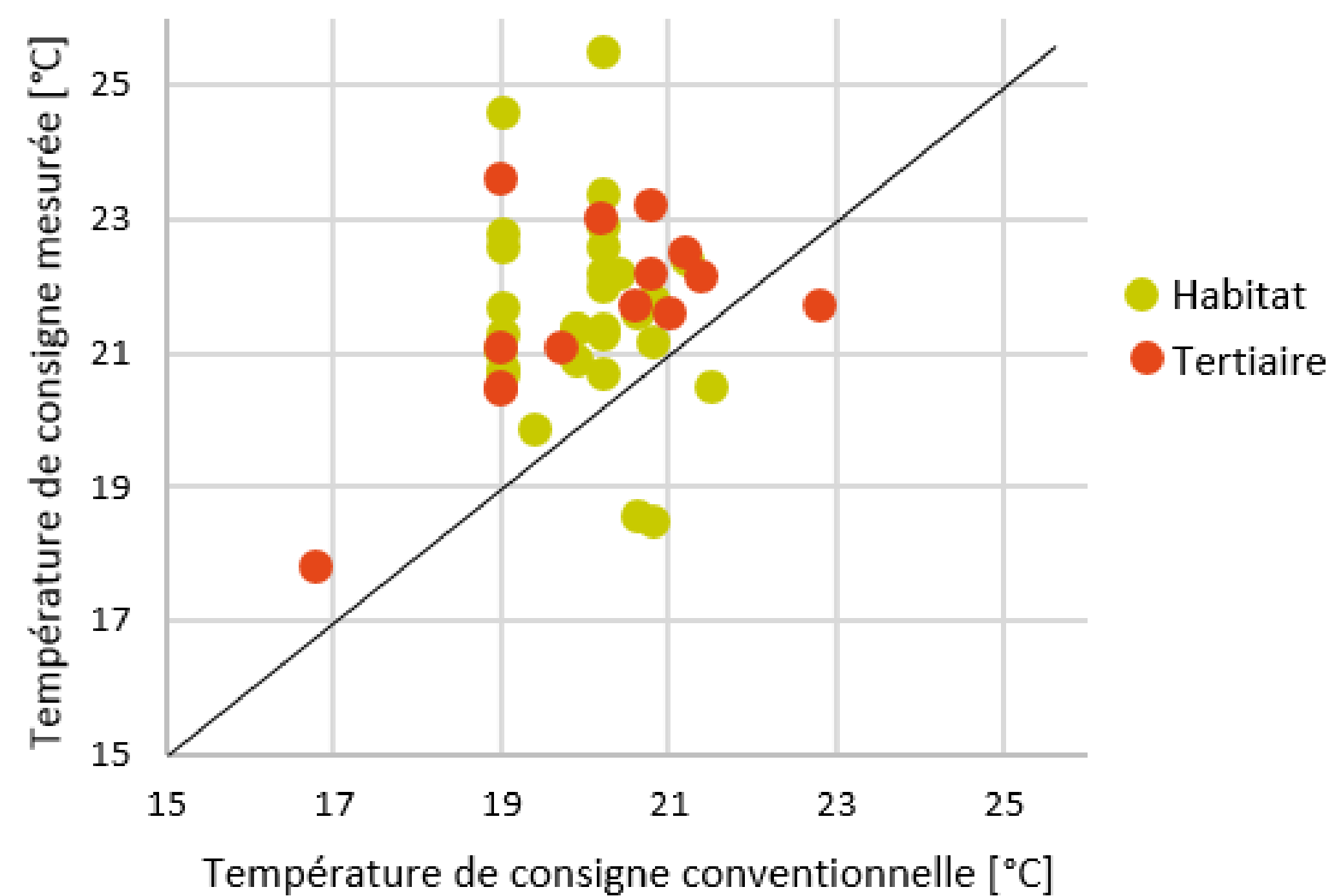


Figure 1 : Comparaison des températures de consigne conventionnelle et mesurée

Très fréquents en logement individuel et dans les bâtiments de bureaux et d'enseignement, les réduits de nuit le sont moins dans les logements collectifs car plus difficiles à mettre en œuvre sans risquer de nuire au confort des occupants. Ils sont rares dans les bâtiments de santé et Ehpad. Par rapport aux conventions réglementaires, le réduit observé diffère surtout en logement, où il est considéré conventionnellement un réduit de jour, et non de nuit.

Les réduits hebdomadaires ou réduits de weekend sont très fréquemment observés dans les bureaux et les écoles avec une relance le lundi, mais moins courants pour les autres usages de tertiaire ou les logements.

3.1.2. Apports internes

Les apports internes évalués hors éclairage, en période d'occupation, sont très variables. Il se situent entre 3 et 6 W/m² en habitat (surface habitable) proche de la convention réglementaire de 5 W/m². En tertiaire, l'échantillon pour l'analyse de sensibilité est plus réduit. Les valeurs sont proches de 6 W/m² (surface utile) en bâtiments de bureaux et d'enseignement, soit bien en deçà de la valeur conventionnelle respectivement de 14 W/m² et 7 W/m². La part des appareils électriques est prépondérante (beaucoup d'équipement informatique) et à des plages horaires plus étendues que les hypothèses RT dans les bâtiments d'enseignements.

3.2. PERFORMANCE INTRINSEQUE DES BATIMENTS

3.2.1. Transmission thermique et perméabilité à l'air de l'enveloppe

Qu'il soit calculé ou expérimental au moyen de mesures, le coefficient de déperdition des bâtiments se situe entre 0,2 et 0,6 W/m².K avec une valeur supérieure à 0,8 W/m².K dans le cas d'une rénovation (cf. figure 2).

Ainsi, sur l'ensemble de l'échantillon résidentiel et tertiaire, on observe un $U_{\text{bât-exp}}$ systématiquement supérieur au $U_{\text{bât}}$ théorique. C'est sur les maisons que les écarts entre le $U_{\text{bât-exp}}$ et le $U_{\text{bât}}$ théorique sont

les moins importants. Cela peut être dû à moins d'incertitude sur la méthode d'évaluation du $U_{bât}$ expérimental (occupation mieux connue), mais aussi indiquer une meilleure mise en œuvre de l'enveloppe.

Concernant l'étanchéité à l'air de l'enveloppe, les valeurs mesurées sont en général meilleures que celles saisies dans le calcul réglementaire (cf. figure 3): en moyenne le coefficient Q_{4Pa_surf} est de $0,88 \text{ m}^3/\text{h.m}^2$ pour les logements (variant de $0,14$ à $2,5 \text{ m}^3/\text{h.m}^2$) et de $1 \text{ m}^3/\text{h.m}^2$ pour les bâtiments tertiaires (variant de $0,1$ à $2,6 \text{ m}^3/\text{h.m}^2$). Ces valeurs prennent en compte les constructions neuves et les rénovations ainsi que certaines valeurs obtenues en phase chantier.

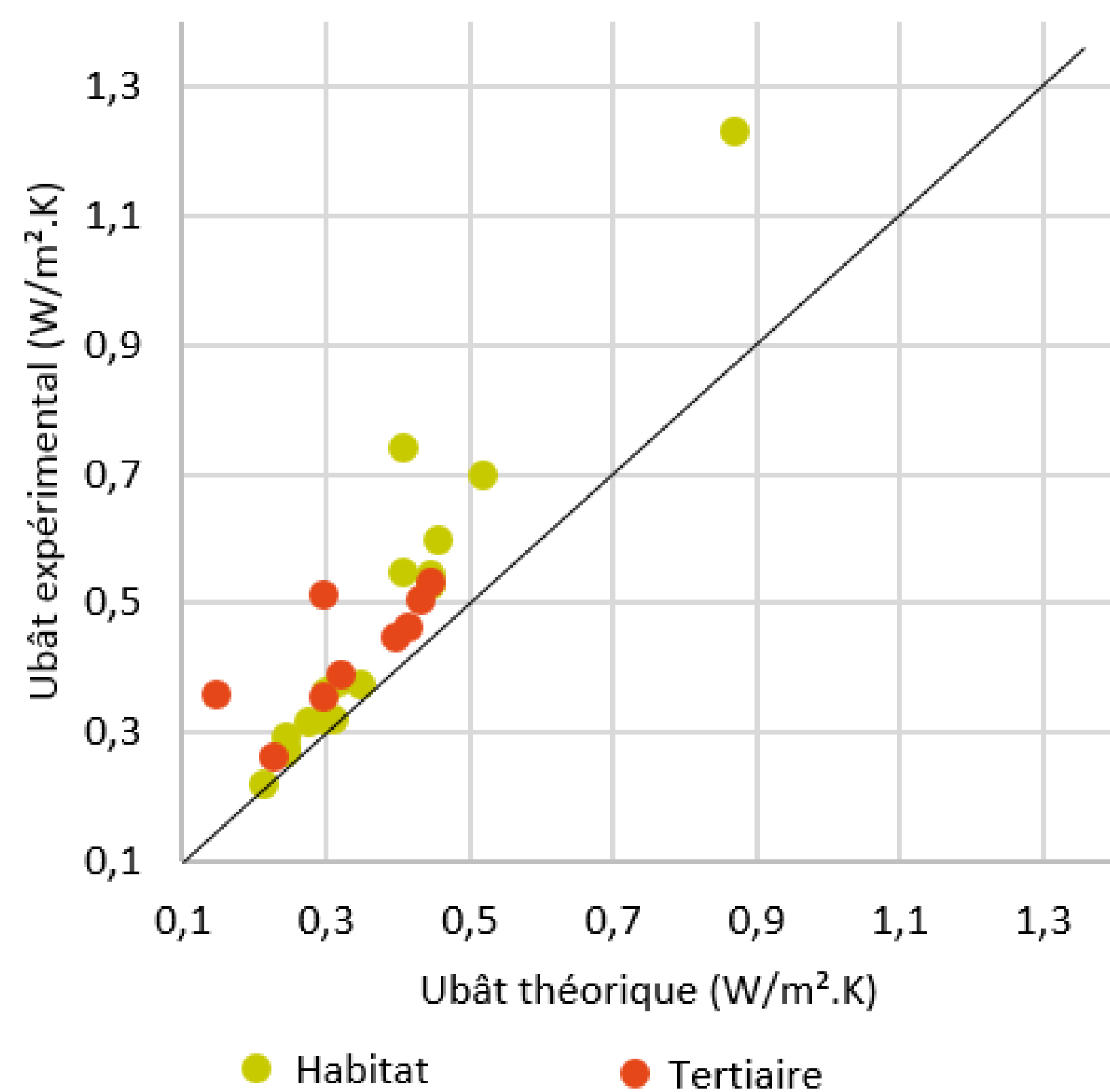


Figure 2 : Comparaison des $U_{bât}$

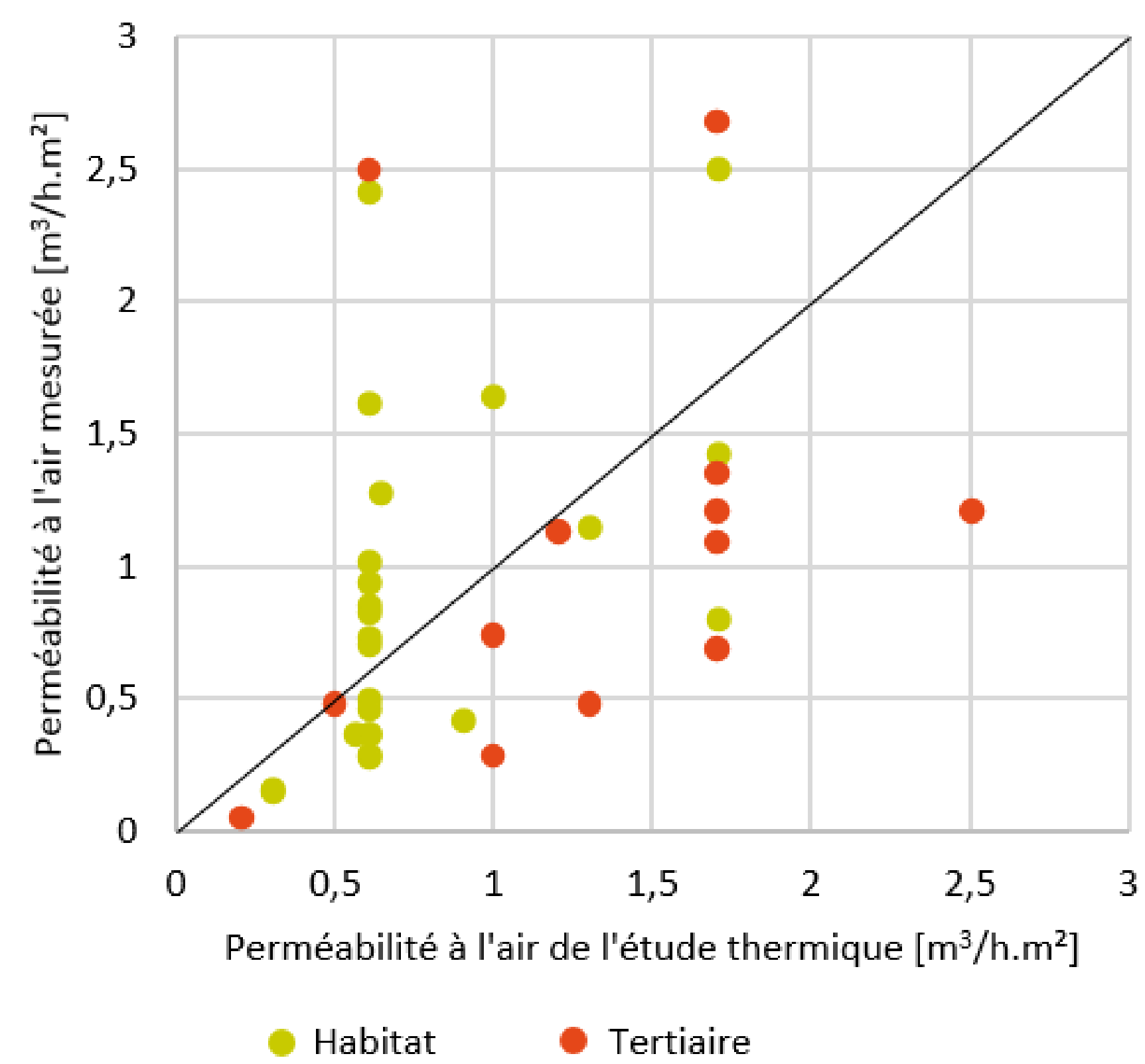


Figure 3 : Comparaison de l'étanchéité à l'air

3.2.2. Efficacité des échangeurs double flux

L'efficacité des échangeurs de récupération d'énergie sur air extrait des VMC double flux s'avère très bonne avec une moyenne des efficacités évaluées à 76% (variant de 20 à 80%).

3.2.3. Efficacité saisonnière des équipements de production de chauffage (et d'ECS pour les équipements produisant les deux)

Les rendements évalués sur PCI sont majoritairement supérieurs à 80 %. Le rendement moyen observé est de 88% (variant de 54 à 104%)

Concernant les pompes à chaleur, leur coefficient de performance moyen mesuré sur la saison est supérieur à trois pour les PAC eau/eau et à deux pour les PAC air/eau. Les COP moyens des PAC eau/eau et air/eau sont respectivement de 4 (variant de 3,2 à 5,4) et 3 (variant de 2 à 4,6).

3.3. CONSOMMATIONS DE CHAUFFAGE

Dans la figure 4, on observe que pour les bâtiments tertiaires, la consommation de chauffage mesurée est globalement supérieure à la consommation théorique des postes réglementés. Elle varie de 15 à $120 \text{ kWh}_{ep}/\text{m}^2.\text{an}$.

En logement, la comparaison entre consommation mesurée et consommation théorique est moins tranchée. La consommation mesurée varie de 30 à $78 \text{ kWh}_{ep}/\text{m}^2.\text{an}$ en logement collectif et de 1,2 à $89 \text{ kWh}_{ep}/\text{m}^2.\text{an}$ en logement individuel.

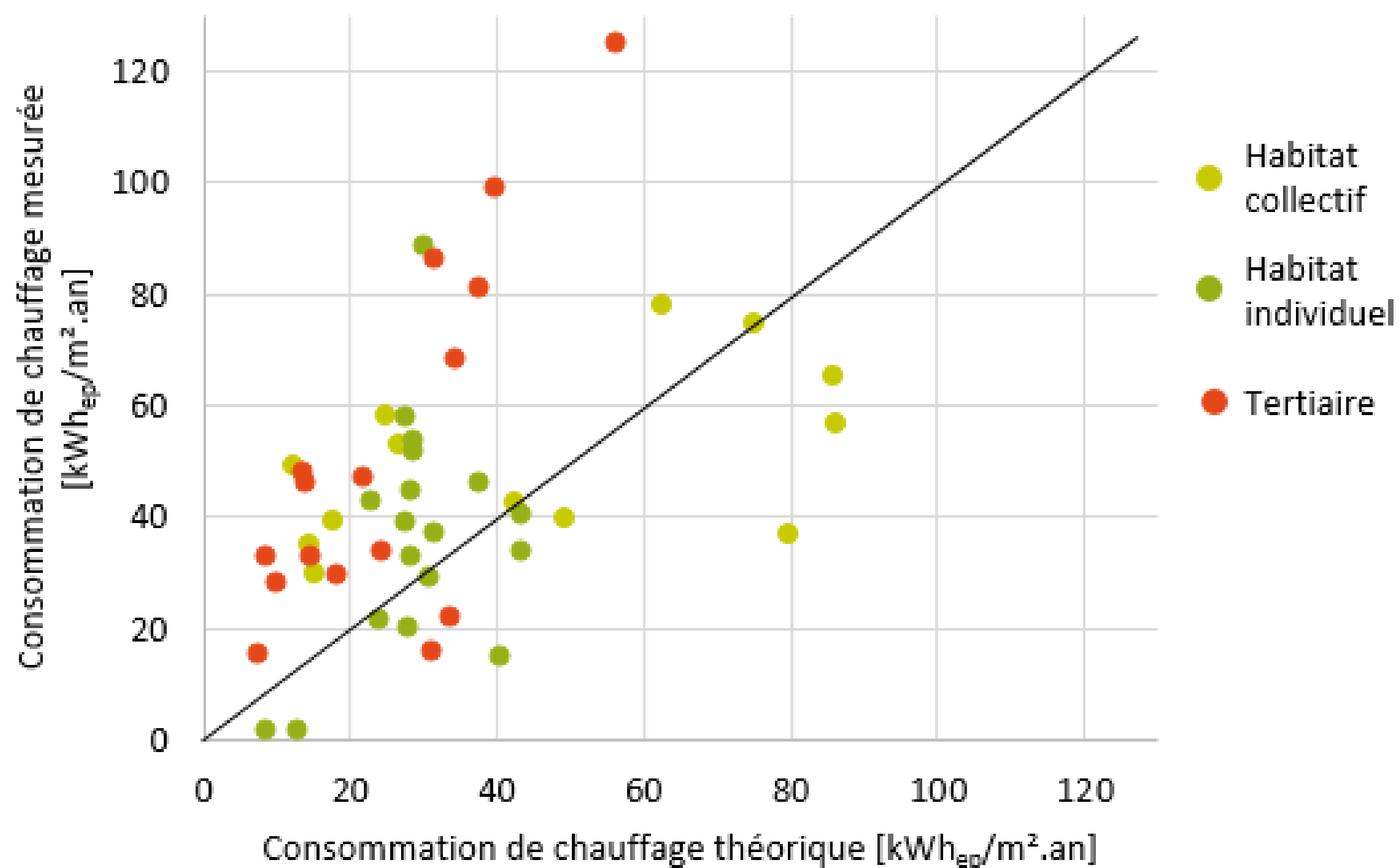


Figure 4 : Comparaison des consommations de chauffage

4. RESULTATS DE L'ANALYSE DE SENSIBILITE

Dans la figure 5 différentes classes d'influence sont reportés en abscisse. Elles sont obtenues par l'analyse de sensibilité de la consommation de chauffage par rapport à différents facteurs: les impacts faibles, inférieurs en valeur absolue à $5 \text{ kWh}_{ep}/\text{m}^2.\text{an}$, les impacts moyens, dont la valeur absolue se situe entre 5 et $10 \text{ kWh}_{ep}/\text{m}^2.\text{an}$ et les impacts forts entre 10 et $15 \text{ kWh}_{ep}/\text{m}^2.\text{an}$ en valeur absolue, voire très forts au-delà. Les impacts négatifs conduisent à une diminution de la consommation de chauffage, les impacts positifs à une augmentation. Chaque barre du diagramme permet, en fonction du facteur étudié, d'évaluer le nombre d'opérations de chaque classe d'influence.

On voit dans la figure 5, que les causes de variations importantes de la consommation de chauffage sont liées, dans la plupart des opérations, à la transmission thermique de l'enveloppe ($U_{bât}$), à la température de consigne et aux conditions météorologiques. La variation des deux premiers facteurs conduit majoritairement à une augmentation de la consommation de chauffage.

L'analyse de sensibilité en fonction du facteur $U_{bât}$ a pu être effectuée sur 26 bâtiments. Pour plus de la moitié des bâtiments, les impacts sont supérieurs à $5 \text{ kWh}_{ep}/\text{m}^2.\text{an}$ pour une différence de $U_{bât}$ comprise entre $0,04$ et $0,36 \text{ W}/\text{m}^2.\text{an}$. Tous les impacts conduisent à une augmentation de la consommation de chauffage.

La variation de la consommation de chauffage en fonction de la température de consigne a pu être évaluée pour 43 bâtiments du panel. Dans plus d'un tiers des cas, l'impact est supérieur à $5 \text{ kWh}_{ep}/\text{m}^2.\text{an}$ (en valeur absolue) pour une différence de température comprise entre $+0$ et $+5 \text{ °C}$. Dans 88 % des cas, la consommation de chauffage augmente.

Les conditions météorologiques et leur impact sur la consommation de chauffage ont été évaluées pour 45 bâtiments. Dans plus d'un tiers des bâtiments, l'impact en valeur absolue est supérieur à $5 \text{ kWh}_{ep}/\text{m}^2.\text{an}$. Les impacts sur la consommation de chauffage sont indifféremment positifs ou négatifs, ce qui semble tout à fait logique pour un paramètre stochastique extrinsèque au bâtiment.

L'analyse de sensibilité en fonction des apports internes sur la consommation de chauffage concernent 41 bâtiments. On observe que la majorité des opérations ont de impacts inférieurs en valeur

absolue à $5 \text{ kWh}_{\text{ep}}/\text{m}^2.\text{an}$ pour une différence d'apports comprises entre -5 et $+3 \text{ W}/\text{m}^2$. Avec des impacts indifféremment négatif ou positifs, la répartition du nombre d'opérations par classe d'impact est centrée un peu en dessous de l'impact zéro comme une loi normale, ce qui semble tout à fait logique pour un paramètre stochastique extrinsèque au bâtiment.

Pour la perméabilité à l'air, l'analyse de sensibilité a pu être effectuée sur 37 bâtiments : 60 % des impacts en valeur absolue sont inférieurs à $5 \text{ kWh}_{\text{ep}}/\text{m}^2.\text{an}$, avec une part plus importante d'effets négatifs, conduisant à une baisse de la consommation de chauffage.

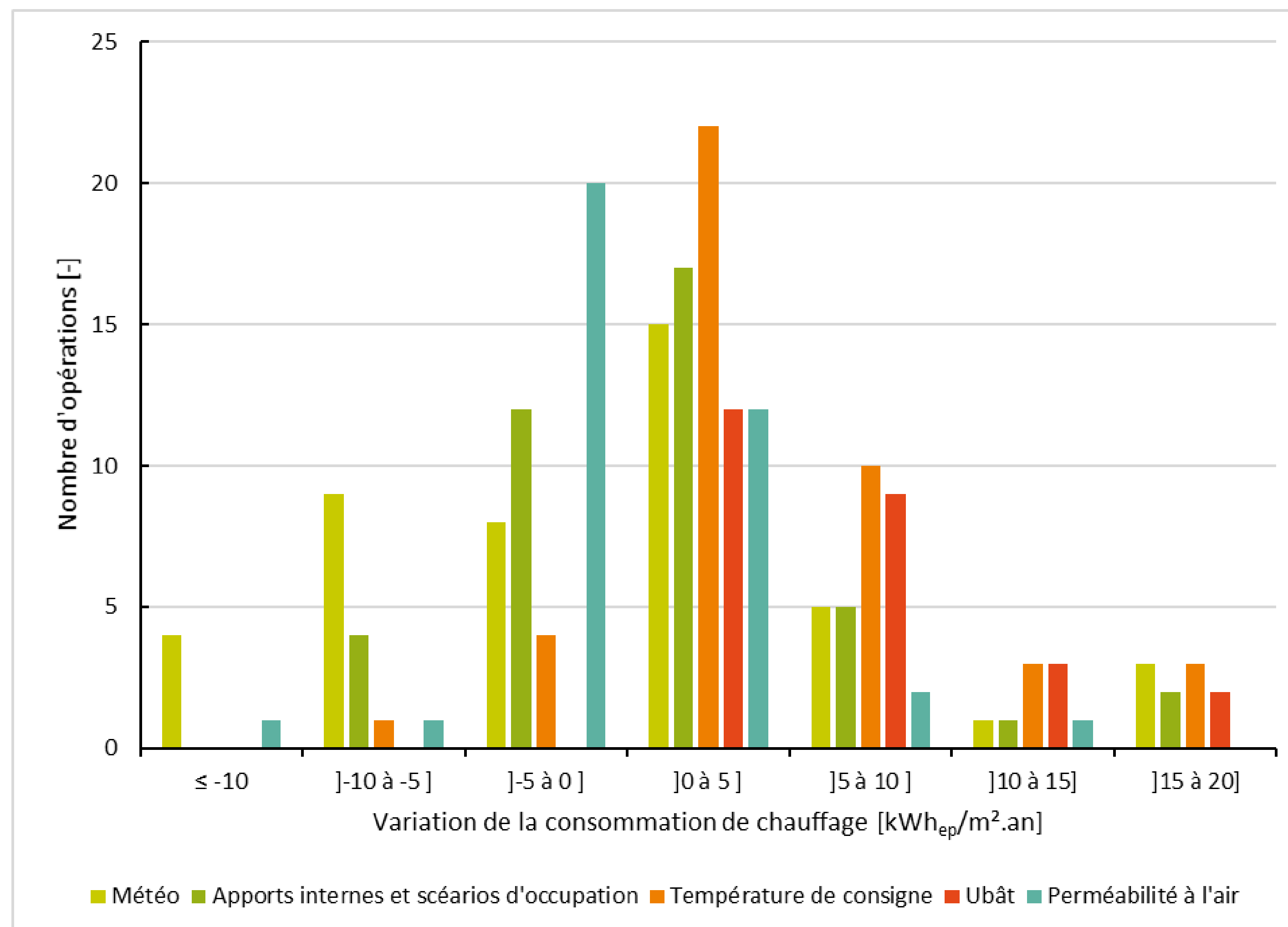


Figure 5 : Fréquence et impact des écarts observés sur la consommation de chauffage calculée pour différents facteurs

5. DISCUSSION

Lors de l'analyse de sensibilité, le nombre de bâtiments concernés peut varier d'un facteur à l'autre selon qu'il a été possible de réaliser un re-calcul ou non. Ainsi pour les paramètres de météorologie et la température de consigne, l'analyse de sensibilité a pu être effectuée sur quasiment toutes les opérations. Pour les apports internes comme pour l'étanchéité à l'air, le nombre de bâtiments concernés par le re-calcul est moins important, car pour un certain nombre de bâtiments, le paramètre évalué correspondait bien au niveau théorique initial. Pour le paramètre $U_{\text{bât}}$ par contre, le nombre plus limité de bâtiments concernés provient de la difficulté de son évaluation expérimentale.

On observe une tendance modérée à la baisse des consommations de chauffage par l'influence de la météo, généralement plus clémente (Cerema 2018), et du niveau d'étanchéité à l'air, pour lequel le chantier est organisé pour atteindre la valeur ciblée dans le calcul, avec un effet de seuil en dessous de cette valeur cible.

En revanche, la température de consigne et la performance de l'enveloppe conduisent le plus souvent à une augmentation de la consommation de chauffage : les écarts observés entre les valeurs évaluées sur le terrain et les valeurs théoriques sont non seulement fréquents, mais l'impact lié à ces écarts est important en terme de sensibilité sur la consommation de chauffage.

Par ailleurs, deux facteurs importants n'ont pu être testés dans l'analyse de sensibilité : les débits de ventilation d'une part et d'autre part la performance intrinsèque des équipements, notamment des générateurs. En effet, dans le calcul, le générateur est décrit *via* son rendement nominal, valeur obtenue en laboratoire dans des conditions normées. Or sur le terrain, nous n'avons accès qu'au rendement moyen annuel des chaudières gaz ou au COP moyen annuel des PAC (rapport entre la somme de l'énergie produite pour la production de chauffage et d'ECS le cas échéant et la somme de l'énergie consommée). Cette valeur n'est pas directement comparable aux valeurs nominales des équipements mais elle traduit le fonctionnement réel de ces derniers.

6. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

La caractérisation de la performance intrinsèque des bâtiments et de leurs conditions de suivi a pu être effectuée sur la météo, les scénarios d'apports internes, la température de consigne et la performance de l'enveloppe ($U_{\text{bât}}$ et perméabilité à l'air). L'observation de ces écarts et l'analyse de sensibilité sur la consommation de chauffage montre l'importance particulière de la transmission thermique de l'enveloppe, de la température de consigne et des conditions météorologiques, facteurs fréquemment très impactant de la consommation. Pour compléter cette analyse des écarts terrain/calcul, il faudrait développer des indicateurs du bon fonctionnement des équipements de chauffage et refroidissement.

Au-delà de l'identification des causes des écarts entre la consommation mesurée et la consommation visée par analyse de sensibilité, se pose également la question de l'existence de déterminants de la performance énergétique des bâtiments performants dans notre échantillon.

Une régression multilinéaire entre l'énergie utile de chauffage mesurée et différents paramètres à priori déterminant a montré sur notre échantillon que cette énergie n'est pas corrélée ($R^2=0,24$) aux paramètres testés, soit la température de consigne ($^{\circ}\text{C}$), les apports internes ($\text{W}/\text{m}^2_{\text{surface chauffée}}\cdot\text{an}$), l'étanchéité à l'air $Q_{4\text{Pa}_{\text{surf}}}$ ($\text{m}^3/\text{h}\cdot\text{m}^2$) et la déperdition thermique de l'enveloppe corrigé des degré jours Ht_{DJ} ($\text{W}\cdot\text{jour}/\text{m}^2\cdot\text{an}$). Il nous reste à étendre l'échantillon et à prendre en compte d'autres facteurs aussi déterminants que la solarisation du bâtiment, la durée de saison de chauffe et un indicateur sur les débits de ventilation

7. REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient l'ADEME et le Ministère de la Transition écologique et solidaire pour leur soutien financier ainsi que tous ceux qui ont contribué à cette étude.

8. BIBLIOGRAPHIE

Berger Julien, Guernouti Sihem, Humbert Myriam. 2010. « Experimental method to determine the energy envelope performance of Buildings ». 10th International Conference for Enhanced Building Operations ICEBO, Kuwait

Humbert Myriam, Moujalled Bassam, Caillet Julien. 2014. « Garantie de Performance Energétique - Rapport Tâche 5.3 : Test du dispositif de M&V ». Rapport de recherche. Fondation Bâtiment Energie. <http://www.batiment-energie.org/doc/32/Livrable-N-5.3.pdf>

Cerema. 2017. « Bâtiments démonstrateurs à basse consommation d'énergie Enseignements opérationnels tirés de 119 constructions et rénovations du programme PREBAT 2012-2016. » Collection Connaissances. France: Cerema. <https://www.cerema.fr/fr/centre-ressources/boutique/batiments-demonstrateurs-basse-consommation-energie-prebat-0>

Couplage de l'optimisation multi-objectif avec la simulation thermique dynamique pour la rénovation de parcs de bâtiments

Yannis MERLET*¹, Simon ROUCHIER¹, Arnaud JAY², Monika WOLOSZYN¹

¹ Univ. Grenoble Alpes, Univ. Savoie Mont Blanc, CNRS, LOCIE, 73000 Chambéry

² Univ Grenoble Alpes, CEA, LITEN, DTS, INES, F-38000 Grenoble, France

*yannis.merlet@univ-smb.fr

RESUME. Cet article présente un nouvel outil pour réaliser de l'optimisation multi-objectif sur les parcs de bâtiments gérés par le même le gestionnaire. Il détaille comment interfacier de l'optimisation multi-objectif avec de la simulation thermique de parcs de bâtiment sous le langage Modelica dans l'optique de trouver les stratégies optimales de réhabilitation énergétique pour ce parc. Les perspectives de cet outil sont l'étude de l'influence du phasage des travaux sur l'élaboration des stratégies de réhabilitation et l'étude de l'influence des contraintes sur l'espace de décision.

MOTS-CLÉS : optimisation multiobjectif, Modelica, parcs de bâtiment, réhabilitation

ABSTRACT. This paper presents a new tool that enable multi-objective optimization on a building stock which common attribute is the building manager. It presents how multiobjective optimization can be connected with thermal simulation of building stock on Modelica in order to elaborate optimal strategies for energy retrofit of the building stock. This tool has been developed for further work on the study of the influence of construction phasing on the elaboration of optimal strategies and on the study of the impact on constraints of such an optimization.

KEYWORDS : multi-objective optimization, Modelica, building stock, retrofit

1. INTRODUCTION

La rénovation énergétique d'une large part du parc de bâtiments existant est un enjeu majeur en France pour espérer atteindre les objectifs énergétiques et climatiques de la COP21. Les acteurs gérant un parc de bâtiments conséquents ont donc un rôle clé à jouer. Ainsi, les parcs de bâtiments sont un sujet de recherche prenant de l'importance.

Présentement, les gains énergétiques sur le parc de bâtiment viennent de stratégies globales de rénovation(Kohler and Hassler 2002) et sont rarement considérés comme l'objectif principal des réhabilitations. La constatation peut être faite sur les parcs de logements sociaux en France : leurs gestionnaires de patrimoine ont développé des outils permettant de planifier la rénovation des bâtiments. Ces outils reposent sur leurs connaissances expertes, et aident les responsables à balancer les différentes contraintes économiques, énergétiques et sociologiques sans vraiment justifier de la supériorité objective de la solution proposée.

Les méthodes d'optimisation multi-objectifs sont une solution pour aboutir à un ensemble de solutions objectivement performantes dans lesquelles le choix pourrait être fait selon la préférence des décideurs, ainsi « libérant » l'expert de la responsabilité du choix des solutions. Dans ce cadre, le développement d'une méthodologie d'élaboration de stratégies optimales de réhabilitation énergétique applicable aux parcs de bâtiments, dont la seule caractéristique commune est le gestionnaire est pertinente. Cette méthodologie, en cours de développement, permettra de coupler les connaissances expertes (travaux possibles de rénovations sur les bâtiments) des modèles de bâtiment alimentés par des audits du parc et des algorithmes génétiques d'optimisation multi-objectif.

Cette méthodologie basée sur l'optimisation multi-objectif sera par la suite couplée à une aide à la décision interactive au sein du projet ANR Réha-Parcs afin de faire sélectionner au gestionnaire de patrimoine sa stratégie idéale parmi les solutions objectivement optimales. Afin de pouvoir développer et appliquer cette méthodologie d'optimisation, les outils existants ne sont pas suffisants comme on le verra dans la section suivante, aussi il a fallu en développer de nouveaux qui sont détaillés dans cet article.

2. OUTILS DISPONIBLES ET UTILISES

L'usage de l'optimisation multi-objectif dans le bâtiment s'est particulièrement développé sur les phases d'avant-projet de bâtiment neuf. Ainsi on peut dénombrer de nombreux travaux présentant l'optimisation multi-objectif en avant-projet de bâtiment neuf avec des algorithmes génétiques (GA) et des algorithmes par essaim de particules (PSO)(Machairas, Tsangrassoulis, and Axarli 2014). Les paramètres optimisés sont généralement la forme du bâtiment, les menuiseries et/ou les systèmes HVAC sur la base de fonctions objectifs de consommation énergétique et de confort (Tuhus-Dubrow and Krarti 2010; Diakaki, Grigoroudis, and Kolokotsa 2013). D'autres approches utilisent les GA et une analyse exergétique du bâtiment afin d'optimiser son impact environnemental(Wang et al. 2009). Toutefois ces approches se limitent au bâtiment neuf .

Pour s'appliquer à la réhabilitation, une équipe du CSTB (Pernodet-Chantrelle 2010) a développé une plateforme d'optimisation multi objectif basée sur un couplage entre TRNSYS et un GA. L'optimisation a été réalisée sur 8 paramètres d'enveloppe : les murs extérieurs, intérieurs et le type de fenêtres. Les fonctions objectifs utilisées sont la consommation énergétique, le coût économique et le confort des occupants. Leur outil, Multiopt, est proposé en version commerciale comme plugin à TRNSYS. Ces approches restent limitées à un seul bâtiment concernant uniquement l'enveloppe.

D'autres approches ont proposé une gestion des parcs de bâtiments et de leur réhabilitation par workflow (Kohler, Steadman, and Hassler 2009) ou par aide à la décision multi-critère (Šelih 2007). Ces approches reposent sur une pondération de chaque critère par la maîtrise d'ouvrage en charge de la réhabilitation et ramènent donc le problème à une optimisation mono objectif. Cependant le grand nombre de critères et d'objectifs est ici difficile à classer objectivement, c'est pourquoi ces approches sont difficilement applicables.

L'approche la plus proche des besoins traitant plusieurs bâtiments à la fois est celle développée aux Mines ParisTech (Rivallain 2013) qui permet de réhabiliter séquentiellement deux bâtiments de

logements collectif. Les fonctions objectifs utilisées sont de l'ordre environnementales, financières et de confort des occupants. Elles sont au nombre de 6. Les paramètres selon lesquels les bâtiments sont optimisés sont au nombre de 7 avec entre une et trois possibilités pour chaque paramètre. Techniquement, les outils utilisés sont une implémentation du GA NSGA-II et une simulation thermique et environnementale sous la suite Pleiades-Comfie et Equer.

3. L'OUTIL DEVELOPPE

3.1. UNE GRANDE VARIETE DE DONNEES A TRAITER

Au sein du projet ANR Réha-Parcs, les acteurs sont issus de différents milieux et amènent une variété de données à traiter. L'optimisation multi-objectif doit se nourrir de connaissances expertes venant de l'ingénierie du bâtiment pour l'espace de décision. D'autre part le modèle de parc de bâtiment sera issu d'un audit simple puis traité par des outils de clustering. Les formats de données sont donc divers et plus ou moins proches de format exploitable directement automatiquement.

3.2. MODELES DE BATIMENT ET ENVIRONNEMENT DE SIMULATION

Dans la méthode, le premier critère d'optimisation envisagé sera celui de la *consommation énergétique*. Il faut donc un outil capable de simuler dynamiquement des bâtiments afin d'en évaluer précisément la demande en énergie. Pour une évaluation pertinente de la demande énergétique, il a fallu retenir tout d'abord une granularité de modèle de bâtiment et un niveau de détail demandé sur les simulations. Les autres objectifs sur lesquels l'optimisation devra se dérouler sont entre autres le *confort des occupants*, le *coût économique* et le *coût environnemental*. L'évaluation du confort implique le recours à une simulation thermique dynamique avec un découpage zonal de chaque bâtiment afin d'avoir une idée précise des températures par zone thermique. D'autre part, l'évaluation environnementale nécessite une correspondance évidente entre le modèle et la constitution physique du bâtiment, donc les simulations de modèles réduits (de type RC par exemple) ne conviennent pas. Les travaux de la littérature s'intéressant aux mêmes contraintes utilisent par exemple Pleiades-Comfie (Rivallain 2013), TRNSYS (Chantrelle et al. 2011) et EnergyPlus (Machairas, Tsangrassoulis, and Axarli 2014).

Ensuite le modèle de bâtiment doit être assez ouvert pour permettre la modification automatisée de ses composants en vue de l'optimisation. Aussi les environnements de simulation basés sur des langages ouverts tels que EnergyPlus ou Modelica sont intéressants et utilisés dans le milieu du bâtiment (Thomaré et al. 2017) pour modifier automatiquement des modèles.

Par ailleurs, le langage Modelica est pourvu de bibliothèques pour faciliter la modélisation de bâtiments et leur simulation. Parmi ces bibliothèques, BuildSysPro, développée par EDF (Kim et al. 2014) est basée sur les équations thermiques et effectue des simplifications sur l'aérodynamique qui sont en accord avec la granularité de modèle demandée notre optimisation, c'est pourquoi nous avons retenu les modèles *Matisse* issus de cette bibliothèque

3.3. ESPACE DE DECISION DE L'OPTIMISATION

La première entrée de l'outil développe est l'espace de décision de l'optimisation. Cet espace de décision est constitué de tous les travaux de rénovation possibles pouvant être réalisés sur un bâtiment.

Ces données viennent de connaissance experte d'un bureau d'étude et doivent être mise en forme pour pouvoir les exploiter de manière automatique. D'autre part, la base de données de travaux doit pouvoir être exploitée par des approches sortant de la physique du bâtiment, telles que l'aide à la décision interactive, aussi le contenu doit être évident à expliciter. Le format JSON permettant de nommer chaque grandeur et de hiérarchiser les informations se prête bien à ces contraintes et est utilisé dans de nombreux langages de programmation. C'est pour cela qu'il a été choisi.

3.4. OPTIMISATION

La méthode d'élaboration des stratégies de réhabilitation qui est en cours de développement repose sur l'optimisation multi-objectifs. Cela impose le choix d'un algorithme d'optimisation adapté à générer un ensemble de solutions optimales au sens de Pareto. Dans le bâtiment, les algorithmes les plus utilisés sont de la famille des essaims de particules (PSO) et les algorithmes génétiques (GA)(Evins 2013). Notre problème étant de nature discrète et comportant beaucoup de paramètres (plus de 30), les GA sont plus performants que les algorithmes PSO (Tuhus-Dubrow and Krarti 2010). Dans les algorithmes génétiques, la robustesse et la performance de l'algorithme NSGA2 font qu'il est le choix le plus adapté à notre problème (Deb et al. 2002; Evins 2013).

Diverses implémentations de cet algorithme sont disponibles, et une se distingue par sa modularité. En effet, la bibliothèque DEAP, disponible sous le langage Python (Fortin et al. 2012) permet d'utiliser facilement l'algorithme NSGA2. D'autre part cette bibliothèque permettra par la suite de vérifier les performances de cet algorithme en permettant le test d'autres algorithmes dont ceux de type PSO.

3.5. LES SOLUTIONS RETENUES

Ces différents éléments sont combinés dans une plate-forme logicielle développée sous le langage Python.

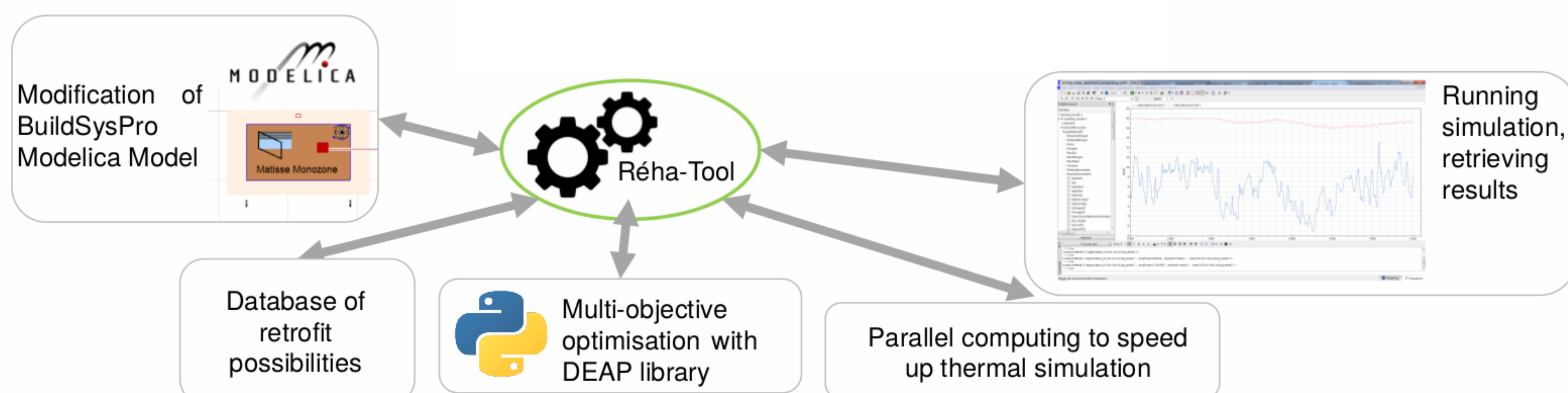


Figure 1: Structure de la plateforme

La Figure 1 détaille la structure de la plateforme et montre les échanges de données possibles entre les composants de la plate-forme. La base de données des possibilités de rénovation envoie à la plateforme l'espace de décision de l'optimisation correspondant au bon mode constructif de parc de bâtiment sélectionné, afin de constituer l'espace de décision. Par la suite, l'optimisation est lancée et sélectionne dans l'espace de décision une variante de rénovation possible. Le modèle Modelica est modifié pour correspondre aux caractéristiques de cette variante de rénovation. Finalement, la

plateforme lance la simulation et récupère les données de résultats concernant la consommation énergétique et le confort d'été des occupants.

Le développement a été réalisé dans une logique de modularité : chacune des briques représentées sur la Figure 1 est modifiable aisément. Par exemple le changement de l'environnement de simulation demande uniquement la mise à jour des fonctions de modification du modèle et d'une seule ligne de code dans la définition de la fonction d'évaluation pour l'optimisation. L'objectif de la plateforme est de pouvoir proposer la méthode d'optimisation pour des modèles de bâtiments déjà réalisés sur d'autres environnements de manière relativement transparente.

Finalement, afin d'optimiser les temps de calculs, la fonction d'évaluation de l'optimisation, comprenant la simulation thermique dynamique, a été parallélisé sur plusieurs processeurs. Cela est rendu possible par l'usage de la bibliothèque Python Multiprocessing.

4. TESTS ET EXEMPLES D'UTILISATION

Des premières optimisations ont été lancées afin de tester la plateforme. L'objectif était d'optimiser la rénovation d'un petit immeuble d'habitation constitué de 4 étages de 2 appartements chacun.

4.1. MODELE DE BATIMENT ET DE COUT UTILISE

Le bâtiment modélisé est un bâtiment fictif constitué de 4 niveaux et 8 appartements. Chaque appartement correspond à une zone thermique dans le bâtiment. Les données météo sont issues d'un fichier TMY pour la ville de Trappes.

Ce bâtiment est représenté par le modèle *MatisseMonozone* de la bibliothèque Modelica BuildSysPro. Chaque appartement a une surface de 65m^2 et une hauteur sous plafond de 2,3 m. Le système de chauffage est modélisé par un générateur idéal de très grande puissance afin d'estimer la demande en énergie, et non la consommation de chauffage. Les systèmes seront modélisés dans une prochaine version de la plate-forme.

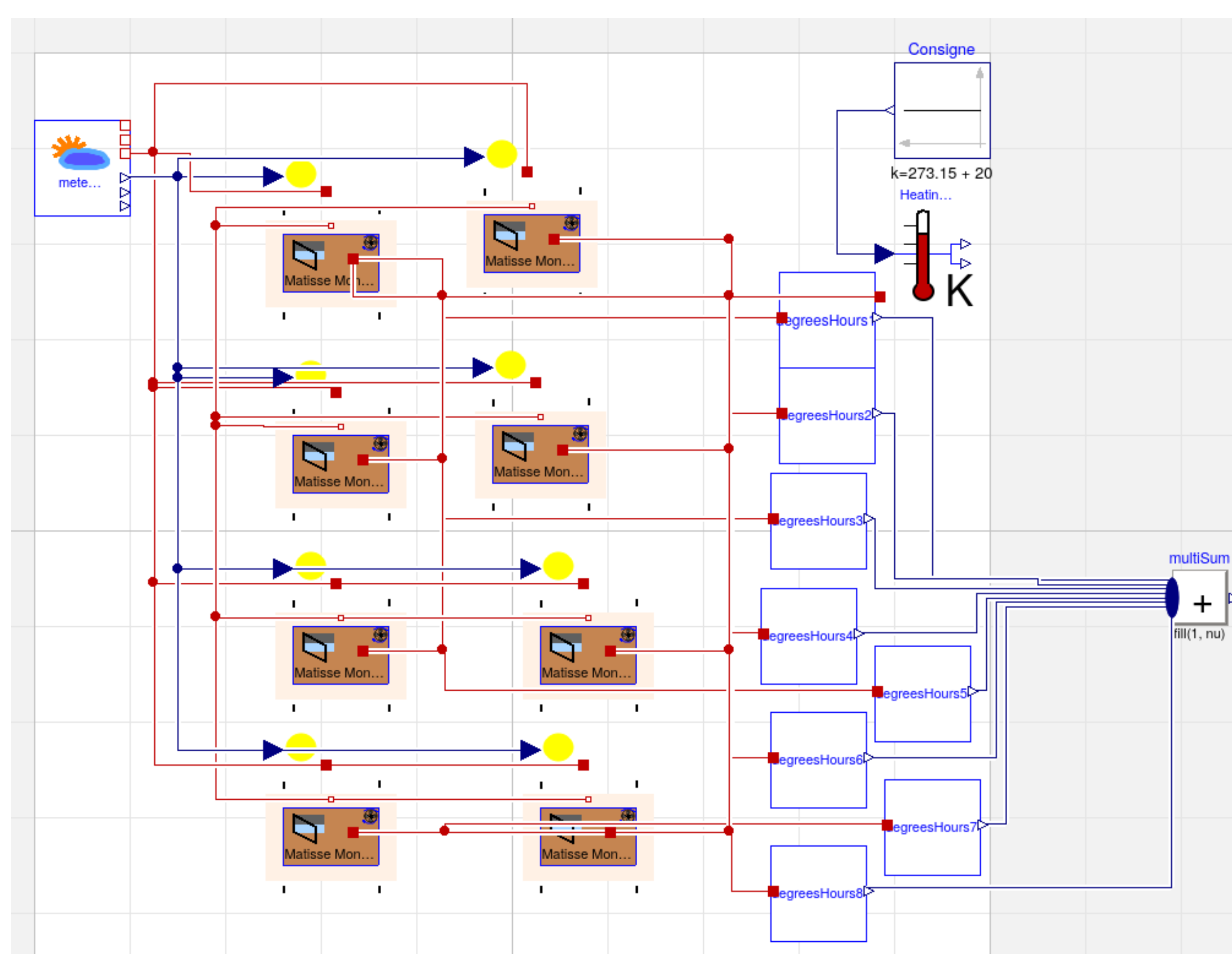


Figure 2: Modèle du bâtiment test sous Dymola

Dans la Figure 2, on distingue chaque zone thermique dans la partie gauche représenté par le bloc *MatisseMonozone* de BuildSysPro et dans la partie de droite sont modélisés les capteurs permettant de ressortir l'indicateur de confort d'été. La demande en énergie est récupérable directement via une grandeur du modèle *MatisseMonozone*.

Les sorties du modèle qui sont exploitées dans l'optimisation en tant que fonction objectif sont la demande d'énergie en chauffage du bâtiment et le confort d'été des habitants. Le confort d'été est exprimé en °C.h au-dessus de 28°C dans chaque zone climatique.

Une fonction de calcul de coût basée sur les connaissances expertes d'un partenaire du projet Réha-Parcs est intégrée à l'outil.

4.2. OPTIMISATION ET PARAMETRAGE DE L'ALGORITHME

L'espace de décision de test est constitué de 25 variantes de parois, dont la caractéristique commune est la structure (20cm de béton armé). Les isolations proposées sont les suivantes :

Matériau	Epaisseurs disponibles (en cm)
Polyurethane	2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20
Laine de verre	6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20
Polystyrène	6, 8, 10, 12, 14, 16

Tableau 1: Espace de décision de l'optimisation, par bâtiment

Les paramètres de l'algorithme d'optimisation sont :

Nombre d'individus	48
Nombre de générations	50
Probabilité de croisement	0,9
Probabilité de mutation	0,1

Tableau 2: Paramètres de l'optimisation

Ces paramètres sont sélectionnés à partir d'une étude bibliographique pour les probabilités de croisement et de mutation. Ces probabilités sont généralement dépendantes du problème et sont à régler au cas par cas avec un ordre de grandeur de 0,8 (Rivallain 2013) ou 0,9 (Deb 2011) pour la probabilité de croisement. Le nombre d'individus a été choisi car étant du même ordre de grandeur que les 50 individus proposés par (Rosenthal and Borschbach 2014), et pour pouvoir paralléliser les calculs sur une machine ayant 48 cœurs. Le nombre de génération a été fixé arbitrairement en observant la convergence et la diversité du front de Pareto.

Les fonctions objectifs sélectionnées pour ce test sont le coût de chaque solution de rénovation, la demande en énergie du bâtiment et le confort d'été des occupants. Ce dernier indicateur est exprimé en °C.h en dessous de 28°C pour chaque zone thermique, l'ensemble des °C.h d'inconfort de chaque zone sont ensuite sommés.

4.3. EXEMPLE DE SORTIE

Pour obtenir assez de variété de stratégies en sortie de l'optimisation, sont conservés l'équivalent d'une génération d'individus optimaux : ici 48 individus. Parmi ces individus sont isolés ceux étant sur le front de Pareto de rang 1.

Ces individus sont représentés par les variantes des réhabilitations proposées et leur valeur sur les fonctions objectifs, de confort et de demande énergétique.

Ces sorties peuvent être visualisées, comme sur la Figure 3.

Generation 15 of optimization

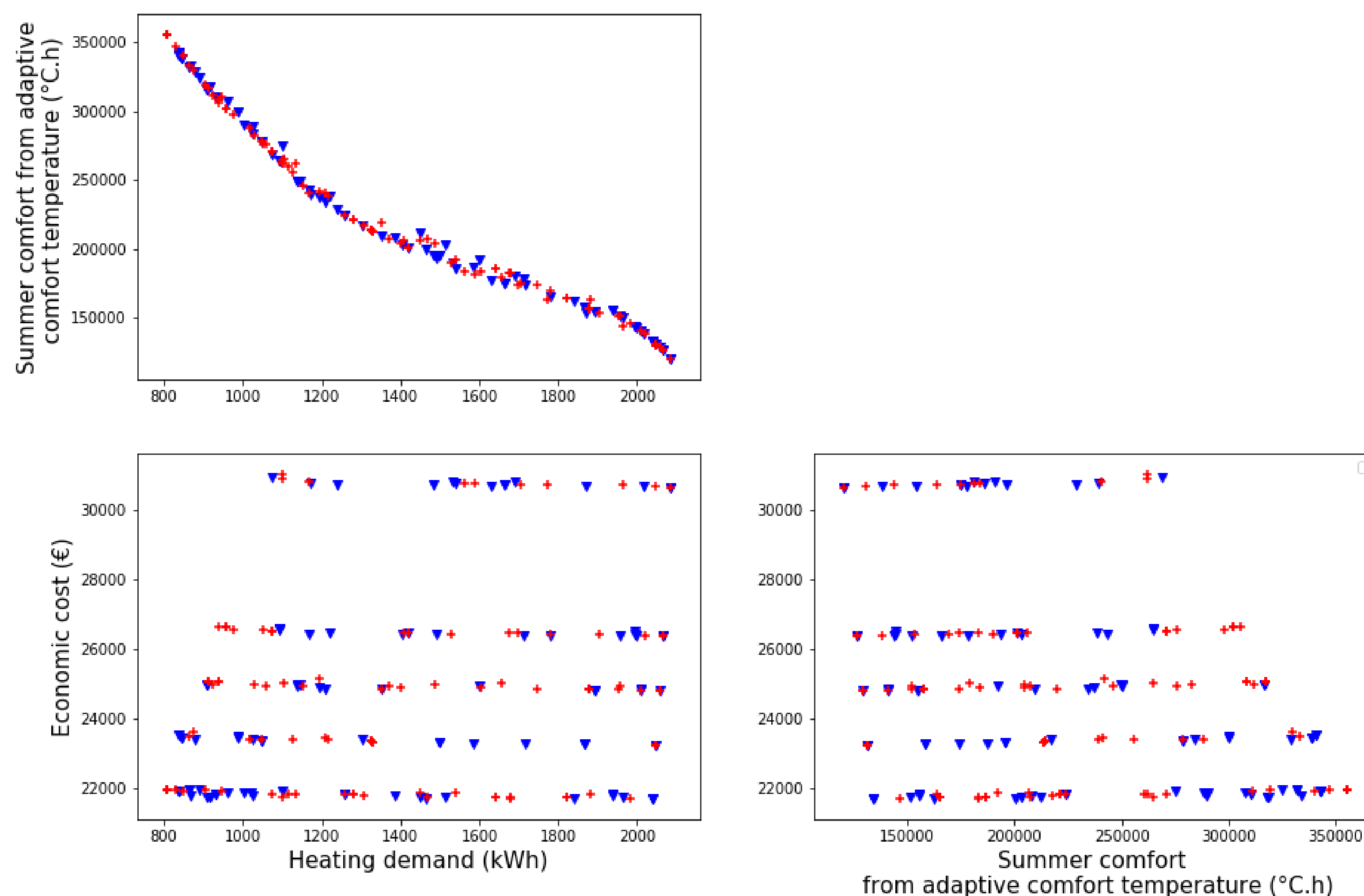


Figure 3: Fronts de Pareto des solutions optimales

5. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Nous avons pu constater que nos contraintes imposaient le développement d'un nouvel outil axé autour de l'interfaçage de données issues d'audits de bâtiment ou de connaissance experte avec l'optimisation multi-objectif. Cet outil sera enrichi prochainement de nouvelles fonctions objectifs telles que la fonction de coût environnemental. Une autre possibilité qui sera intégrée prochainement dans l'outil sera la possibilité de prendre en compte le phasage des travaux dans la stratégie de réhabilitation et ainsi proposer des stratégies de réhabilitation en rapport avec la réalité des travaux.

Finalement cet outil permettra aussi l'étude de l'influence des contraintes sur l'optimisation et permettra de quantifier l'impact de celles-ci sur la pertinence des stratégies de réhabilitation et sur le nombre d'évaluation nécessaires pour la convergence de l'optimisation vers le front de Pareto.

6. REMERCIEMENTS

Ces travaux sont financés dans le cadre du projet ANR-15-CE22-0011 Réha-Parcs.

7. BIBLIOGRAPHIE

- Chantrelle, Fanny Pernodet, Hicham Lahmidi, Werner Keilholz, Mohamed El Mankibi, and Pierre Michel. 2011. "Development of a Multicriteria Tool for Optimizing the Renovation of Buildings." *Applied Energy* 88 (4). Elsevier Ltd: 1386–94. doi:10.1016/j.apenergy.2010.10.002.
- Deb, Kalyanmoy. 2011. "Multi-Objective Optimization Using Evolutionary Algorithms: An Introduction." <http://www.iitk.ac.in/kangal/deb.htm>.
- Deb, Kalyanmoy, Amrit Pratap, Sameer Agarwal, and T Meyarivan. 2002. "A Fast and Elitist

- Multiobjective Genetic Algorithm: NSGA-II.” *IEEE TRANSACTIONS ON EVOLUTIONARY COMPUTATION* 6 (2)..
- Diakaki, Christina, Evangelos Grigoroudis, and Dionyssia Kolokotsa. 2013. “Performance Study of a Multi-Objective Mathematical Programming Modelling Approach for Energy Decision-Making in Buildings.” *Energy* 59 (September): 534–42. doi:10.1016/j.energy.2013.07.034.
- Evins, Ralph. 2013. “A Review of Computational Optimisation Methods Applied to Sustainable Building Design.” *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 22 (June): 230–45. doi:10.1016/j.rser.2013.02.004.
- Félix-Antoine Fortin, François-Michel De Rainville, Marc-André Gardner, Marc Parizeau and Christian Gagné. 2012. “DEAP : Evolutionary Algorithms Made Easy.” *Journal of Machine Learning Research* 13: 2171–75. doi:10.1.1.413.6512.
- Kim, Eui-Jong, Gilles Plessis, Jean-Luc Hubert, and Jean-Jacques Roux. 2014. “Urban Energy Simulation: Simplification and Reduction of Building Envelope Models.” *Energy & Buildings* 84: 193–202. doi:10.1016/j.enbuild.2014.07.066.
- Kohler, Niklaus, and Uta Hassler. 2002. “The Building Stock as a Research Object.” *Building Research & Information* 30 (4): 226–36. doi:10.1080/09613210110102238.
- Kohler, Niklaus, Philip Steadman, and Uta Hassler. 2009. “Research on the Building Stock and Its Applications.” *Building Research & Information* 37 (5–6): 449–54. doi:10.1080/09613210903189384.
- Machairas, Vasileios, Aris Tsangrassoulis, and Kleo Axarli. 2014. “Algorithms for Optimization of Building Design: A Review.” *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 31 (March): 101–12. doi:10.1016/j.rser.2013.11.036.
- Pernodet-Chantrelle, F. 2010. “Méthode D’optimisation Multicritère de Scénarios de Réhabilitation de Bâtiments Tertiaires. Application À L’évaluation de Dispositifs de Rafrâichissement Hybride.” In . MEGA.
- Rivallain, Mathieu. 2013. *Étude de l’aide à la décision par optimisation multicritère des programmes de réhabilitation énergétique séquentielle des bâtiments existants..*
- Rosenthal, Susanne, and Markus Borschbach. 2014. “Impact of Population Size and Selection within a Customized NSGA-II for Biochemical Optimization Assessed on the Basis of the Average Cuboid Volume Indicator” I (c): 1–7.
- Šelih, J. 2007. “Sustainable Management of Building Stock Refurbishment by Using MCDM.” In *Portugal SB 2007 - Sustainable Construction, Materials and Practices: Challenge of the Industry for the New Millennium*, 218–25.
- Thomaré, Wilfried, Simon Rouchier, Monika Woloszyn, Eric François, 2017. “Automated Commissioning of Buildings Heating Systems by Numerical Model Calibration” *Building Simulation Proceedings*
- Tuhus-Dubrow, Daniel, and Moncef Krarti. 2010. “Genetic-Algorithm Based Approach to Optimize Building Envelope Design for Residential Buildings.” *Building and Environment* 45 (7): 1574–81. doi:10.1016/j.buildenv.2010.01.005.
- Wang, Jiang-Jiang Jiang, You-Yin Yin Jing, Chun-Fa Fa Zhang, and Jun-Hong Hong Zhao. 2009. “Review on Multi-Criteria Decision Analysis Aid in Sustainable Energy Decision-Making.” *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13 (9): 2263–78. doi:10.1016/j.rser.2009.06.021.

Impact des éléments architecturaux d'une pièce sur le comportement d'un jet d'air asymétrique turbulent vertical - Caractérisation expérimentale

Chi-Kien Nguyen^{*1}, Damien David¹, Frédéric Kuznik¹, Gilles Rusaouën¹

¹ Université de Lyon, CNRS, INSA de Lyon, UCBL
CETHIL UMR5008, 69621 Villeurbanne cedex, France

*chi.nguyen@insa-lyon.fr

RESUME. L'étude expérimentale d'un jet d'air asymétrique turbulent au plafond a été effectuée dans une cellule d'essai entièrement contrôlée à l'échelle réelle (6.2 x 3.1 x 2.5 m). Notre configuration d'écoulement présente des éléments d'architecture qui font interagir le jet d'air avec la pièce : un plénum, une grille d'ailettes, des bouches d'extraction et une paroi proche. Les déviations concernant la trajectoire du jet réel ont été observées et analysées en détail. Les effets combinés des éléments architecturaux de la pièce ont considérablement dévié et déformé le développement du jet d'air. Une méthode a été proposée pour quantifier la déformation du jet basé sur un soi-disant indicateur de déformation. Ces résultats obtenus permettent d'autres études de cas dans des conditions anisothermes, avec la présence d'humidité et de la condensation. Des données expérimentales détaillées pourraient être utilisées comme étude de benchmark pour l'évaluation des modèles CFD pour les configurations avec rupture de symétrie.

MOTS-CLÉS. jet asymétrique, interaction, éléments architecturaux, indicateur de déformation.

ABSTRACT. Experimental investigation of ceiling turbulent asymmetrical air jets was conducted in a full-scale entirely controlled test room (6.2 x 3.1 x 2.5 m). Our realistic case study introduces architectural elements which make the air jet interacted with the room : a plenum box, a grille diffuser, air exhausts and a side wall near the air inlet. Deviations concerning the trajectory of the studied jet were observed and analyzed. Combined effects of room architectural elements have significantly deviated and deformed the air jet development. A method has been proposed to quantify the jet deformation based on a so-called deformation indicator. These results obtained allow for further cases studies under non-isothermal and moisture conditions with condensation. Detailed experimental data could be used as a benchmark study for CFD models evaluation for configurations with rupture of symmetry.

KEYWORDS. asymmetrical jet, interaction, architectural elements, deformation indicator.

1 INTRODUCTION

La compréhension de la distribution de l'air ambiant est essentielle à la conception des systèmes de ventilation des bâtiments, au confort thermique des occupants et aux contrôles de la qualité de l'air intérieur. Il est évident que la distribution d'air dans les zones d'occupation est

l'un des facteurs déterminants de la qualité de l'air intérieur et du confort. Par exemple, un taux de renouvellement d'air trop faible piège tous les polluants, les contaminants nuisent à la santé des occupants alors qu'un courant d'air à vitesse élevée peut provoquer une sensation d'inconfort.

L'étude de la distribution de l'air intérieur implique deux méthodes courantes : la simulation numérique et les expérimentations à l'échelle réelle 1 :1. En utilisant le modèle CFD (Computational Fluid Dynamics), la simulation numérique est la plus pratique et la plus efficace pour prédire la distribution d'air et la performance des systèmes de ventilation dans les bâtiments (Chen, 2009). Néanmoins, leur précision et leur fiabilité demeurent une préoccupation majeure, étant donné le manque d'études de validation approfondies, en particulier des études de validation à l'échelle 1 :1 qui peuvent fournir des données utiles et pertinentes sur les caractéristiques de l'écoulement d'air intérieur, y compris les caractéristiques d'écoulement turbulent.

Dans la littérature, afin d'étudier la distribution de l'air intérieur et les caractéristiques du jet d'air pour l'évaluation de la performance des systèmes de ventilation par mélange, de nombreuses recherches ont été menées, soit par des méthodes empiriques (Rajaratnam, 1976), (Li et al., 1993), (Grimitlyn et Pozin, 1993); soit par des méthodes expérimentales et numériques CFD (Sun et al., 2004), (Kuznik et al., 2007), (Nielsen et al., 2010), (Hurnik et al., 2015). Bien que des configurations de jets d'air anisothermes, des impacts des obstructions ou de sources de chaleur internes ont été envisagés, on peut noter un problème commun dans l'emplacement bouches de soufflage et d'extraction. Ils étaient tous situés symétriquement par rapport à la géométrie de la pièce. Cette disposition a probablement été faite pour que le jet d'air ait un développement quasi-libre et symétrique; et ainsi les investigations ont été effectuées simplement dans l'axe de la pièce, c'est-à-dire le plan médian.

En effet, si cette configuration peut être suffisante pour une étude de base, ou pour des modélisations/expérimentations plus simples, elle ne représente pas une configuration réaliste dans laquelle le jet d'air n'est pas développé librement et symétriquement; d'où l'intention de cette étude expérimentale. L'objectif principal est de caractériser un jet d'air vertical asymétrique issu d'une grille d'ailettes au plafond dans une pièce à l'échelle réelle. Le jet d'air interagit avec les éléments architecturaux de la pièce et présente ainsi sa déviation de trajectoire et sa déformation de forme. Traitant de tels jets d'air, une analyse avancée des écoulements d'air en 3D est fortement recommandée. Des données détaillées à partir de cette étude expérimentale à l'échelle 1 :1, accompagnées de conditions aux limites bien connues, pourraient être suffisamment fiables pour servir de test de benchmark pour la validation des modèles CFD, en particulier pour les configurations d'écoulement avec rupture de symétrie.

2 DISPOSITIFS EXPÉRIMENTAUX ET MÉTROLOGIE

2.1 CELLULE MINIBAT

Le banc d'expérimentation est basé sur une cellule d'essais intitulée "MINIBAT". Elle est localisée au laboratoire CETHIL – INSA de Lyon, France. Elle se compose de trois parties distinctes : une cellule d'essais, une garde thermique et un caisson climatique. La cellule d'essais, qui a pour dimensions 6.20 x 3.10 x 2.50 m, est l'endroit où l'expérimentation est réalisée (Fig.1). Cinq de ses faces sont entourés par une garde thermique qui permet de maintenir une température stable. La face au Sud est une face vitrée qui est en contact avec le caisson climatique. Ce dernier fonctionne comme un simulateur de climat qui est capable de simuler des conditions de températures extérieures. Les détails sur la géométrie et l'enveloppe de la cellule d'essais MINIBAT sont donnés dans (Nguyen et al., 2017a).

2.2 CONFIGURATION D'ÉCOULEMENT

L'air dans la cellule d'essais est ventilé au moyen d'une centrale de traitement d'air fonctionnant en boucle fermée. La bouche de soufflage au plafond ($\varnothing 160$ mm) est située à 1 m de

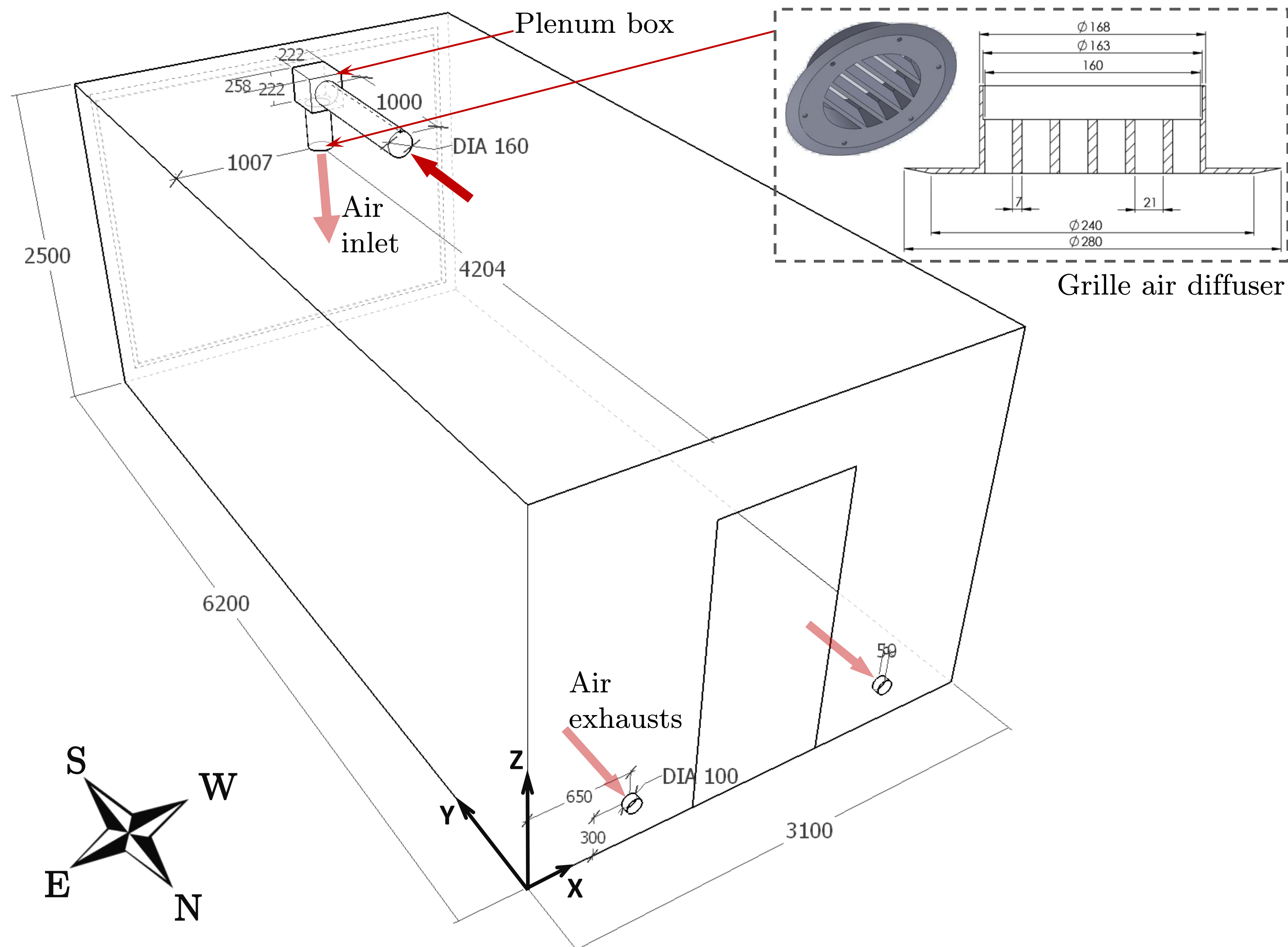


FIGURE 1. Cellule d'essais MINIBAT avec la configuration d'écoulement

la paroi Est et à 4.2 m de la paroi Nord. Elle est équipée de fixes ailettes avec un ratio surface nette/surface totale de 76% (ASHRAE, 2017). Ces ailettes sont disposées parallèlement à la direction de X . Les deux bouches d'extraction ($\varnothing 100$ mm), sont placées sur la paroi Nord, à 0.3 m du sol et à 0.65 m des parois verticales adjacentes.

Notre configuration approche des cas réels dans les bâtiments. En effet, compte tenu de la disponibilité de l'espace au-dessus du faux-plafond suspendu, un plénum pourrait être installé avant l'entrée d'air (Smoljan et Balen, 2010). Compte tenu des dimensions limitées d'une pièce, la bouche de soufflage pourrait par la suite être située à proximité d'un mur vertical et ainsi le jet d'air ne se développerait pas symétriquement. Ces éléments architecturaux auront nécessairement un impact sur le comportement et les caractéristiques du jet.

2.3 MÉTROLOGIE ET PROTOCOLE EXPÉRIMENTAL

Pour les conditions aux limites, un réseau de 180 sondes Pt100 a été mis en œuvre sur les côtés externes et internes des six parois de la cellule d'essais pour mesurer leur température sur les différents cas de test. Le débit et la température de l'air au soufflage ont été régulés à l'aide d'un débitmètre à hélice et de sondes Pt100 respectivement. Un anémomètre à boule chaude est mis avant le plénum pour mesurer la vitesse de l'air soufflé ainsi que son intensité de turbulence.

Pour la métrologie de champs intérieurs de la cellule, un robot mobile muni de capteurs a été conçu par nos soins (Fig.2). Le déplacement du robot est contrôlé par un microcontrôleur ArduinoTM. Ce dernier est piloté par un mini-PC Intel[®] NUC (4). La position exacte du robot dans la pièce est mesurée par un LiDAR (1) (télé-détection par laser).

La mesure de température sur le robot se fait à l'aide de thermocouples de diamètre 25 μ m (3), permettant ainsi un temps de réponse rapide et une haute précision de ± 0.06 °C (valeur moyennée). Les mesures d'humidité relative sont réalisées avec des sondes numériques SHT75 (3) qui affichent une précision absolue de ± 1.8 %HR. Les mesures de vitesses se font à l'aide d'anémomètres à boule chaude Schilknecht ThermoAir. Ces anémomètres affichent une précision de ± 0.5 % pleine échelle + ± 1.5 % valeur mesurée.

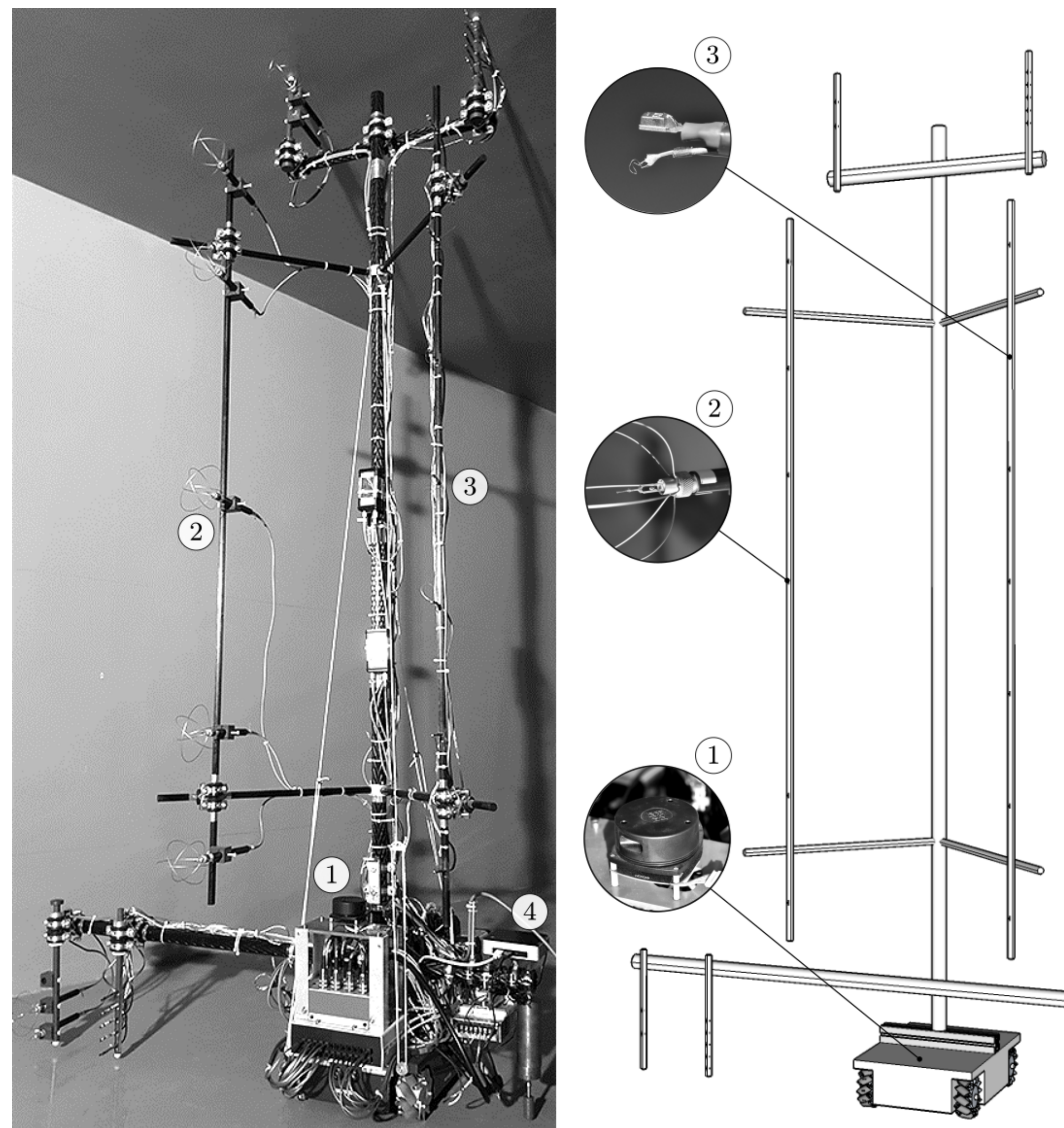


FIGURE 2. Robot mobile muni de capteurs

Par rapport au système de bras mobile sur rail utilisé auparavant par (Hohota, 2003) et (Kuznik, 2005), le système de robot mobile présente deux avantages principaux : réduction des perturbations de l'écoulement et libre accès à tout le volume de la cellule.

Pour chaque campagne de mesure, la cellule doit subir une étape de mise en régime qui dure trois jours. Durant cette phase, les consignes de température et de débit d'air soufflé sont fixes. Une fois la mise en régime établie, le robot mobile est utilisé pour scruter la zone intéressée (1 x 1 m autour de la bouche de soufflage avec un maillage de 0.05 m).

Pour une position du robot, la vitesse et la température sont mesurées avec une fréquence d'acquisition de 10 Hz (une mesure tous les 100 ms). Les valeurs sont ensuite moyennées sur 2000 mesures, soit 200 s afin de réduire les erreurs fluctuantes. Le temps entre deux positions est de 5 minutes. Il comprend le déplacement du robot et le temps d'attente avant l'acquisition des données.

3 RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX ET DISCUSSIONS

Dans cet article, le cas d'un jet isotherme est analysé. Les conditions aux limites sur la température des parois ainsi que sur les paramètres de ventilation sont récapitulées dans les Tableaux 1 et 2. Le modèle empirique du jet libre ainsi que les caractéristiques du jet ne sont pas décrites dans cet article. Elles sont basées sur les ouvrages de (Goodfellow, 2001), (Awbi, 2003) et sont détaillées dans (Nguyen et al., 2017b). Les résultats expérimentaux du jet sont analysés dans l'environnement Spyder (codes Python) et sont visualisés dans le logiciel ParaView.

	Plafond	Sol	S (°C)	N	E	W
Moyenne	20.7	20.9	20.9	20.6	20.5	20.5
Ecart-type	0.2	0.2	0.1	0.2	0.2	0.2

TABLE 1: Températures moyennes des parois

Débit (m ³ /h)	U_0 (m/s)	Re_0 (-)	T_0 (°C)
119.99	2.18	17268	19.98
0.75	0.1	-	0.06

TABLE 2: Paramètres de ventilation

3.1 TRAJECTOIRE DU JET ET LA DÉCROISSANCE DES VITESSES MAXIMALES

Dans un premier temps, les valeurs de vitesse de l'air acquises sont interpolées pour pouvoir déterminer les vraies valeurs de vitesse maximale dans chacun des six plans horizontaux mesurés. La figure 3 présente une visualisation qualitative de la trajectoire du jet ainsi que la courbe des vitesses maximales.

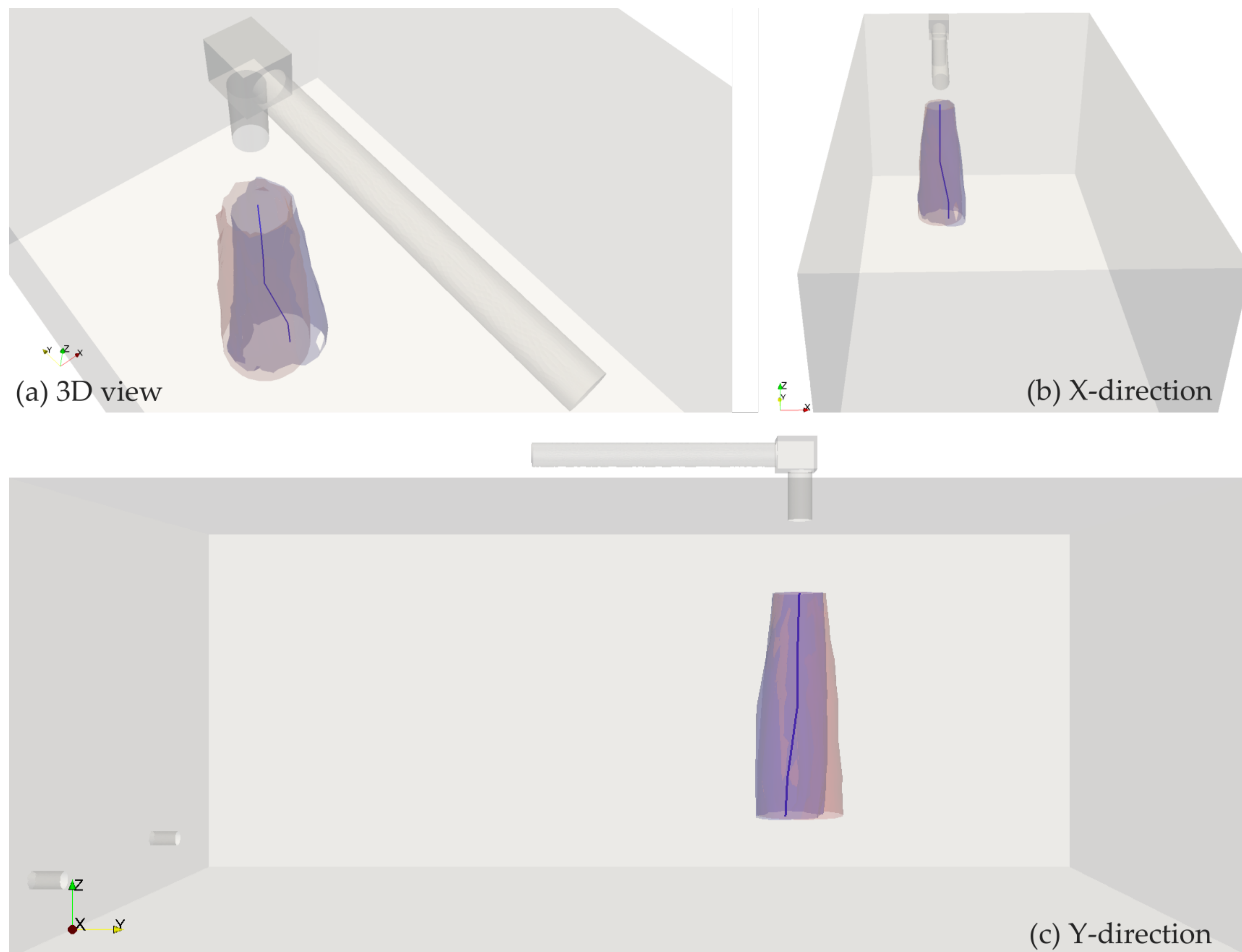


FIGURE 3. Déviation du jet et la courbe des vitesses maximales
Avec : *Rouge* - jet libre axisymétrique ; *Bleu* - jet expérimental
Valeur prise pour le tracé des contours : 0.25 m/s

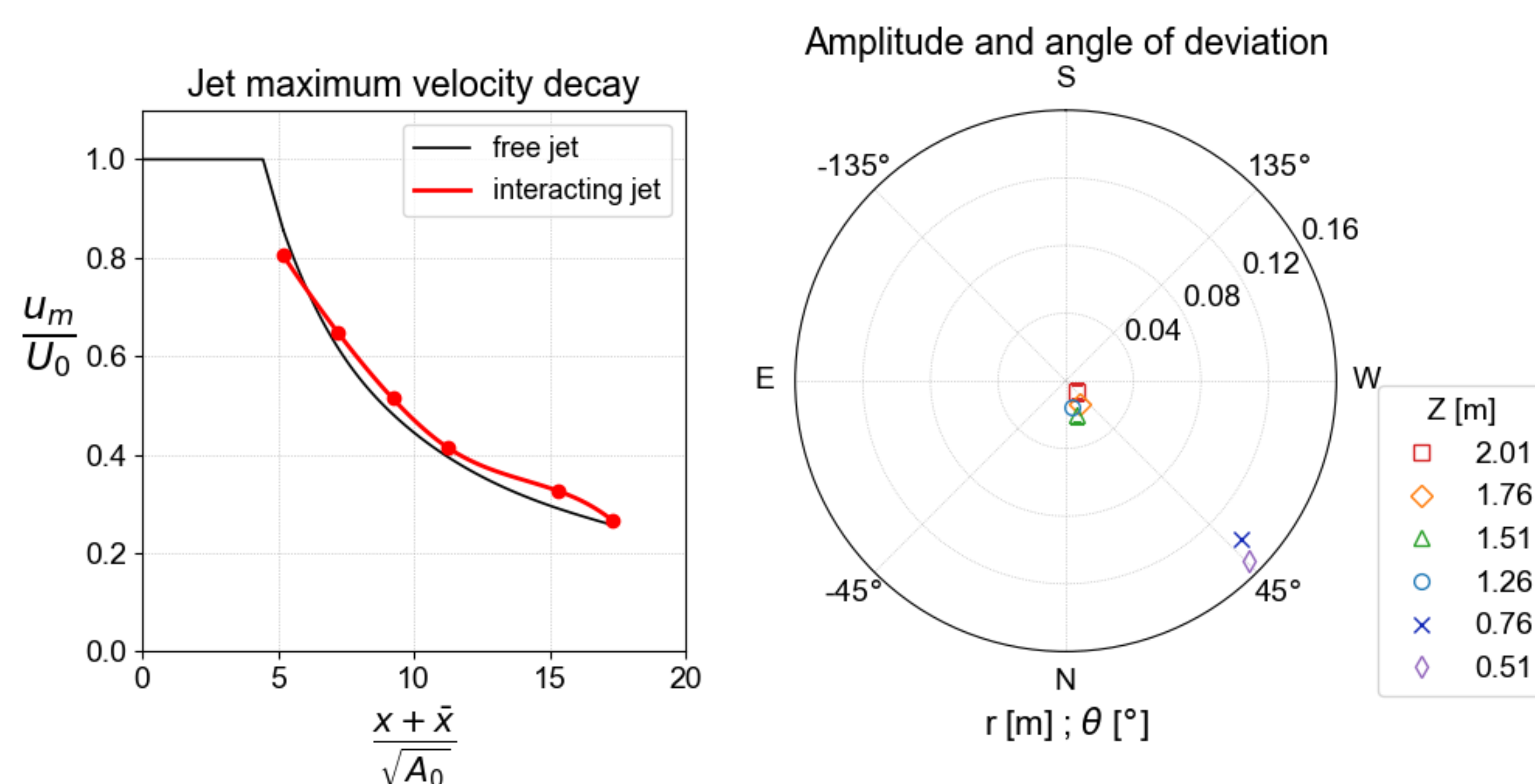


FIGURE 4. Décroissance des vitesses maximales - Amplitude et angle de déviation du jet

On constate donc une asymétrie, voire une déviation de la trajectoire du jet réel (en bleue) par rapport à celle du jet théorique (en rouge). Le jet se développe dans le sens Nord-Ouest : vers les bouches d'extraction (côté Nord) et vers la paroi lointaine Ouest. Ce comportement du jet expérimental est probablement dû au mur proche, aux bouches d'extraction ainsi qu'au plénum.

Cette déviation montre bien l'impact des éléments architecturaux sur le comportement du jet : la perturbation du mur proche (Est) et l'aspiration des bouches d'extraction.

La figure 4 fournit une description quantitative de l'amplitude ainsi que l'angle de déviation du jet réel. La décroissance des vitesses maximales d'un jet libre et du jet étudié est aussi présentée dans cette figure. Dans la région proche de la grille, le jet ne se dévie pas visiblement, l'amplitude de déviation reste minimale (1 cm à 2 cm). Néanmoins, dans la région dite éloignée ($Z = 0.75$ m et 0.5 m), la déviation du jet est beaucoup plus visible avec une amplitude atteignant 15 cm et un angle de 45° . En ce qui concerne la décroissance de la vitesse maximale du jet, malgré le comportement du jet d'air, la courbe de décroissance ne diffère pas beaucoup de celle du jet libre. Il est donc possible de déduire que les éléments architecturaux peuvent avoir dévié la trajectoire du jet mais que l'on retrouve à peu près les mêmes valeurs de vitesse maximale par rapport à un jet libre.

3.2 CONTOUR DU JET ET PROFILS TRANSVERSAUX DE VITESSES MOYENNES DU JET

Dans cette section, on analyse la distribution et la déformation des profils de vitesse dans la section transversale du jet. Le jet d'air s'est propagé de manière asymétrique, il faudrait une méthode pour quantifier cette déformation. Pour cela, les contours de vitesse moyenne (> 0.25 m/s) du jet selon les six plans de mesures ont été tracés et sont présentés dans la figure 5. La position $(X; Y) = (0; 0)$ correspond au centre de la bouche de soufflage. Il est possible de remarquer une propagation non circulaire du jet suivant la direction X (Est-Ouest) dans la région proche de la grille. Cette déformation est probablement due à la direction des ailettes de la grille. Dans la région éloignée, la propagation du jet d'air est clairement asymétrique et sa forme semble plutôt se déformer sous l'impact de la géométrie de la pièce que la grille.

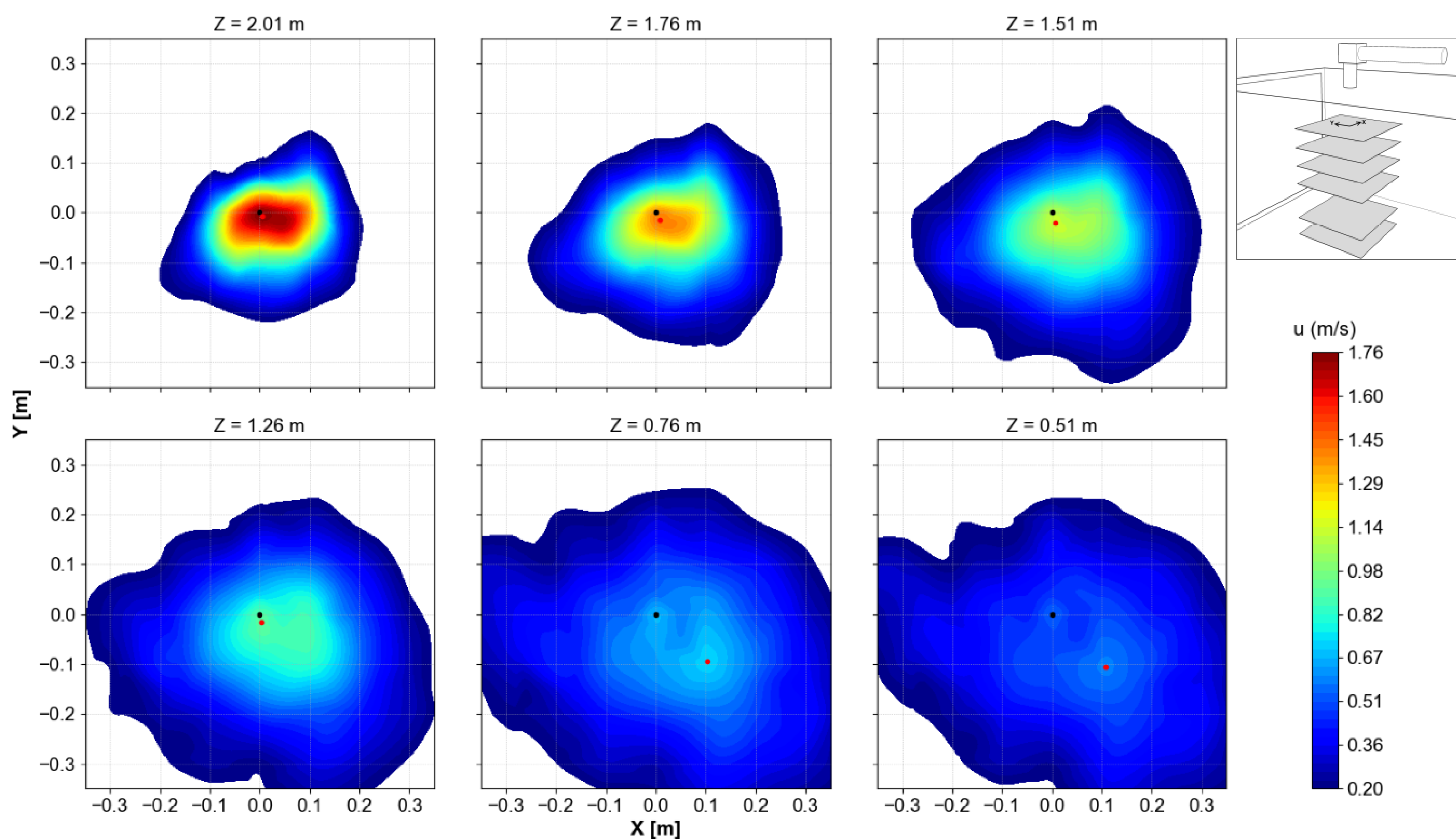


FIGURE 5. Contours de vitesse du jet d'air selon Z

Dans la littérature, pour la caractérisation des profils transversaux de vitesse moyenne d'un jet d'air, plus souvent on évalue le rapport adimensionnel u/u_m en termes des distances radiales adimensionnelles $r/b(Z)$, à condition que le jet soit axisymétrique (Awbi, 2003). Pour rappel, $b(z)$ représente la distance radiale à laquelle $u(r = b) = 0.5u_m$ et u_m représente la vitesse maximale du jet à chaque hauteur z .

Toutefois, étant donné que notre jet étudié n'a pas de direction privilégiée par rapport aux autres, l'analyse selon les directions X et Y se montre incomplète. Ainsi, on définit le rayon hydraulique (r_h) et le rayon de disque équivalente (r_{Deq}) des contours du jet, qui sont donnés par les formules suivantes :

$$r_h = \frac{2S}{P}; r_{Deq} = \sqrt{\frac{S}{\pi}}$$

avec S et P sont respectivement la surface et le périmètre des contours. Ces formules ont été appliquées pour déterminer le rayon hydraulique et de disque équivalente des contours de vitesse normalisées présentées sur la figure 5, c'est-à-dire pour les contours $u/u_m = (0.2...1)$. Nous définissons l'indicateur de déformation des profils de jet (DI) comme le rapport r_h/r_{Deq} . Une valeur de $DI = 1$ signifie un contour circulaire.

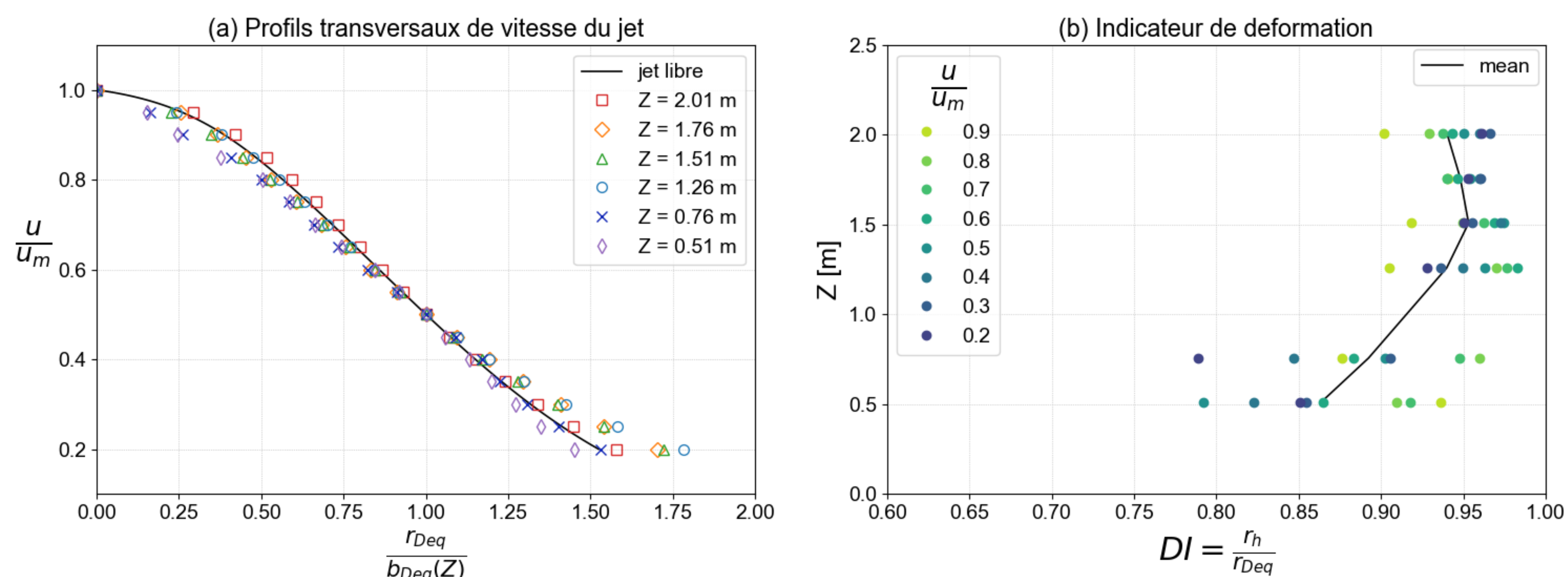


FIGURE 6. Profils transversaux de vitesse moyenne - Indicateur de déformation des profils du jet

Le tracé des profils transversaux de vitesse moyenne du jet u/u_m en fonction de $r_{Deq}/b(Z)$ est présenté dans la figure 6. Le profil du jet libre peut être exprimé par une seule courbe de fonction d'erreur de Gauss. Il est possible de remarquer l'auto-similarité de tous les six profils transversaux malgré leur asymétrie. Le profil correspondant au plan $Z = 2 m$ se développe un peu plus large qu'un jet libre axisymétrique. Les profils $Z = 0.76$ et 0.51 montrent une propagation moins large que les autres, probablement due à une perte de moment d'inertie.

Si les profils transversaux du jet asymétrique sont à peu près les mêmes que ceux du jet libre, comment peut-on quantifier la déformation de ce jet ? D'où l'intention de l'indicateur de déformation DI . Pour les quatre plans $Z = 1.26...2.01m$, leurs valeurs DI varient entre 0.9 et 0.98. Les deux derniers plans montrent une plus grande variation, leurs valeurs varient entre 0.78 et 0.95. Il est alors possible de conclure que pour un contour de vitesse normalisé, plus la valeur DI est inférieure à 1, plus la déformation est importante.

4 CONCLUSION

1. Alors que les jets d'air libre axisymétriques ont été largement étudiés dans le passé, peu ont étudié un jet d'air réaliste ayant une interaction avec la pièce. Par conséquent, le présent article présente une caractérisation expérimentale à l'échelle 1 :1 d'un jet d'air vertical asymétrique. Le jet d'air interagit avec les éléments architecturaux de la pièce et présente ainsi un développement dévié et déformé.
2. La perturbation de la paroi latérale près de la bouche de soufflage, l'aspiration des bouches d'extraction, la présence du plénum et la grille des ailettes ont significativement dévié la trajectoire du jet et ainsi déformé la forme du jet.

3. Une méthode a été proposée pour évaluer les profils transversaux de vitesse du jet et pour quantifier leur déformation. C'est une méthode graphique basé sur le rayon hydraulique, le rayon de disque équivalente et l'indicateur de déformation.
4. Suite à cette étude, les résultats expérimentaux des jets non isothermes ainsi que des champs dynamiques turbulents intérieurs sont en cours d'analyse. D'autre part, les résultats encourageants obtenus permettent des essais expérimentaux plus approfondis avec la présence d'humidité et la condensation sur une paroi froide.
5. Les données détaillées issues de cette étude pourraient être suffisamment fiables pour servir de test de benchmark pour la validation des modèles CFD, en particulier pour les configurations d'écoulement avec rupture de symétrie.

RÉFÉRENCES

- ASHRAE (2017). *2017 ASHRAE handbook : fundamentals*. ASHRAE. OCLC : 988844741.
- Awbi, H. B. (2003). *Ventilation of buildings*. Spon Press, London. OCLC : 300230189.
- Chen, Q. (2009). Ventilation performance prediction for buildings : A method overview and recent applications. *Building and Environment*, 44(4) :848–858.
- Goodfellow, H. D. (2001). *Industrial Ventilation Design Guidebook*. Academic Press.
- Grimitlyn, M. et Pozin, G. (1993). Fundamentals of Optimizing Air Distribution in Ventilated Spaces. *ASHRAE Transactions*, 99(1) :1128–1138.
- Hohota, R. S. (2003). *Modélisation de l'humidité dans un code CFD (basses vitesses en grande cavité) : comparaison avec l'expérimental*. Ph.D. thesis, INSA de Lyon.
- Hurnik, M., Blaszczyk, M., et Popiolek, Z. (2015). Air distribution measurement in a room with a sidewall jet : A 3d benchmark test for CFD validation. *Building and Environment*, 93 :319–330.
- Kuznik, F. (2005). *Etude expérimentale des jets axisymétriques anisothermes horizontaux se développant près d'une paroi. Application à la modélisation numérique des cavités ventilées*. Ph.D. thesis, INSA de Lyon, Lyon.
- Kuznik, F., Rusaouën, G., et Brau, J. (2007). Experimental and numerical study of a full scale ventilated enclosure : Comparison of four two equations closure turbulence models. *Building and Environment*, 42(3) :1043–1053.
- Li, Z., Zhang, J., Zhivov, A., et Christianson, L. (1993). Characteristics of diffuser air jets and airflow in the occupied regions of mechanically ventilated rooms - a literature review. *ASHRAE Transactions*, 99 :1119–1127.
- Nguyen, C.-K., David, D., Kuznik, F., et Rusaouën, G. (2017a). Etude expérimentale d'un jet axisymétrique vertical dans une cavité ventilée mécaniquement. In *XIIIe CIFQ sur la Thermique des Systèmes*, Saint-Lô, France.
- Nguyen, C.-K., David, D., Kuznik, F., et Rusaouën, G. (2017b). Full-scale experimental study of ceiling turbulent air jets in mechanically ventilated rooms. In *38th AIVC conference*, Nottingham, England.
- Nielsen, P. V., Rong, L., et Olmedo, I. (2010). The IEA Annex 20 Two-Dimensional Benchmark Test for CFD Predictions. In *Clima 2010*.
- Rajaratnam, N. (1976). *Turbulent Jets*. Elsevier.
- Smoljan, D. et Balen, I. (2010). Influence of a plenum box design on uniformity of the radial air jet issuing from a vortex diffuser. *Strojarstvo*, 52(3) :379–386.
- Sun, Y., Tan, Z., Zhang, Y., et Zhao, L. (2004). Comparison of Six CFD Models for Room Airflow Study with PIV measurement Data. ASABE Paper No. 044097. ASAE.

Analyse de flexibilité électrique des pompes à chaleur d'un quartier résidentiel neuf

Camille Pajot^{*1}, Benoit Delinchant¹, Yves Maréchal¹, Frédéric Wurtz¹, Damien Frésier²

¹ Univ. Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP *, G2Elab
38000 Grenoble, France

² GEG – Gaz et Electricité de Grenoble

*camille.pajot1@g2elab.grenoble-inp.fr

RESUME. En tant que gestionnaire du réseau électrique de distribution de Grenoble, GEG souhaite estimer le potentiel de flexibilité de la consommation électrique des bâtiments. Afin d'être en mesure de mettre en place des ordres d'effacement pertinents, une étude a été menée au sein du projet européen City-zen, sur un quartier résidentiel. Composé de 23 bâtiments, ce quartier neuf a la particularité d'être alimenté thermiquement par des pompes à chaleur, pompant de l'eau d'une nappe phréatique. Un premier cas d'étude s'appuiera sur des profils types de consommation de chaleur dans le cas d'un effacement, mis en place à partir des résultats du projet GreenLys, ainsi que sur une étude de RTE. Puis, nous comparerons cette stratégie avec une étude se basant sur des simulations énergétiques dynamiques, afin de prendre en compte la réponse physique du bâtiment.

MOTS-CLÉFS. Echelle quartier, Flexibilité, TEASER

ABSTRACT. As Grenoble electrical DSO (Distribution System Operator), GEG wishes to estimate the flexibility potential of the buildings electrical consumption. In order to establish efficient load shedding orders, a study has been realised into the european City-zen project on a residential district. Composed of 23 buildings, this new district has the specificity of being fed by heat pumps. A first study case will rely on typical heat consumption profiles in case of load shedding, created from the GreenLys project results and from a study led by RTE. Then, we will compare this strategy with a study based on dynamic energetic simulations to take into account the physical behavior of the building.

KEYWORDS. District scale, Flexibility, TEASER

1 INTRODUCTION

Alors qu'un des grands défis du 21ème siècle est la lutte contre le dérèglement climatique, de nombreuses politiques de transition énergétique sont mises en place afin de limiter les émissions de gaz à effet de serre et rester sous les 2°C de réchauffement climatique, considérés comme critiques. L'intégration massive d'énergies renouvelables, couplée à l'augmentation des pics de

*. Institute of Engineering Univ. Grenoble Alpes

consommation électrique fait de la flexibilité de la consommation un point central de la transition énergétique (Smartgrids-CRE, 2018b). De nombreux nouveaux acteurs, ainsi que de nouveaux marchés, se mettent en place afin d'être en mesure de moduler la consommation électrique. Or, aujourd'hui cette flexibilité à la baisse est davantage exploitée du côté des utilisateurs à haute intensité énergétique avec des acteurs tels que les agrégateurs, laissant de côté les sites de plus faibles puissances, tels que les bâtiments.

Pourtant, présents massivement sur le territoire, ces derniers représentent également une puissance d'effacement significative lorsqu'on les agrège et apparaissent comme des bons candidats pour fournir de la flexibilité diffuse et s'intégrer dans une logique d'effacements ponctuels ou répétés. En effet, on imagine par exemple pouvoir s'appuyer sur l'inertie des bâtiments afin de moduler les puissances de chauffage (Masy et al., 2015), (De Coninck & Helsen, 2013), tout en garantissant le confort thermique. Ce potentiel d'effacement est néanmoins plus difficile à estimer de façon rapide. La problématique abordée ici est celle de la quantification de ce potentiel d'effacement et son influence en terme d'effet rebond et de réduction des émissions de gaz à effet de serre. Cette problématique est l'un des points étudiés dans le projet européen City-zen, qui a pour objectif de rendre la ville de demain "intelligente et durable" (<http://www.cityzen-smartcity.eu>). C'est donc dans ce cadre que se place notre travail, réalisé en collaboration avec GEG (Grenoble Électricité et Gaz) sur un quartier résidentiel neuf. Ce quartier (23 bâtiments pour 264 logements) a la particularité d'être alimenté thermiquement par des pompes à chaleur, faisant donc du chauffage une problématique électrique.

2 PRÉSENTATION DE L'ÉTUDE

2.1 OBJECTIFS

Notre objectif est d'étudier la meilleure manière de rapidement quantifier le potentiel de flexibilité et les conséquences de l'effacement de consommation pour les bâtiments. Plus particulièrement, nous nous intéresserons à la possibilité d'exploiter leur inertie thermique afin de procéder à des effacements de consommation sur les systèmes de chauffage. Nous chercherons à quantifier le potentiel d'un quartier résidentiel, ainsi que son intérêt en terme de réduction de la pointe et l'impact de ces stratégies sur les émissions de gaz à effet de serre.

2.2 MÉTHODOLOGIE

Afin d'estimer au mieux le potentiel d'effacement d'un quartier, il nous est nécessaire de définir les indicateurs que nous chercherons à étudier. De nombreuses études montrent la présence d'un "effet rebond" lié au redémarrage des systèmes éteints lors d'un effacement (Dréau & Heiselberg, 2016), (Mercier et al., 2014). Ici, nous chercherons donc à regarder l'impact d'un effacement sur la consommation après la fin de celui-ci. Pour cela, nous nous appuyerons sur deux indicateurs définis dans un rapport réalisé par RTE (RTE, 2016) :

- Le taux de report, que nous définissons ici de façon dynamique (l'énergie reportée sera considérée ici pour chaque intervalle horaire d'une journée) (fig. 1)

$$\text{Taux report}[h; h+1] = \frac{E_{\text{reportée}}[h; h+1]}{E_{\text{effacée}}} \quad (1)$$

- Le taux d'économie d'énergie, défini 23h après l'effacement (l'énergie reportée sera considérée ici comme la somme des énergies reportées sur chaque intervalle horaire jusqu'à 23h après l'effacement)

$$\text{Taux économie énergie} = \frac{E_{\text{effacée}} - E_{\text{anticipée}} - E_{\text{reportée}}}{E_{\text{effacée}}} \quad (2)$$

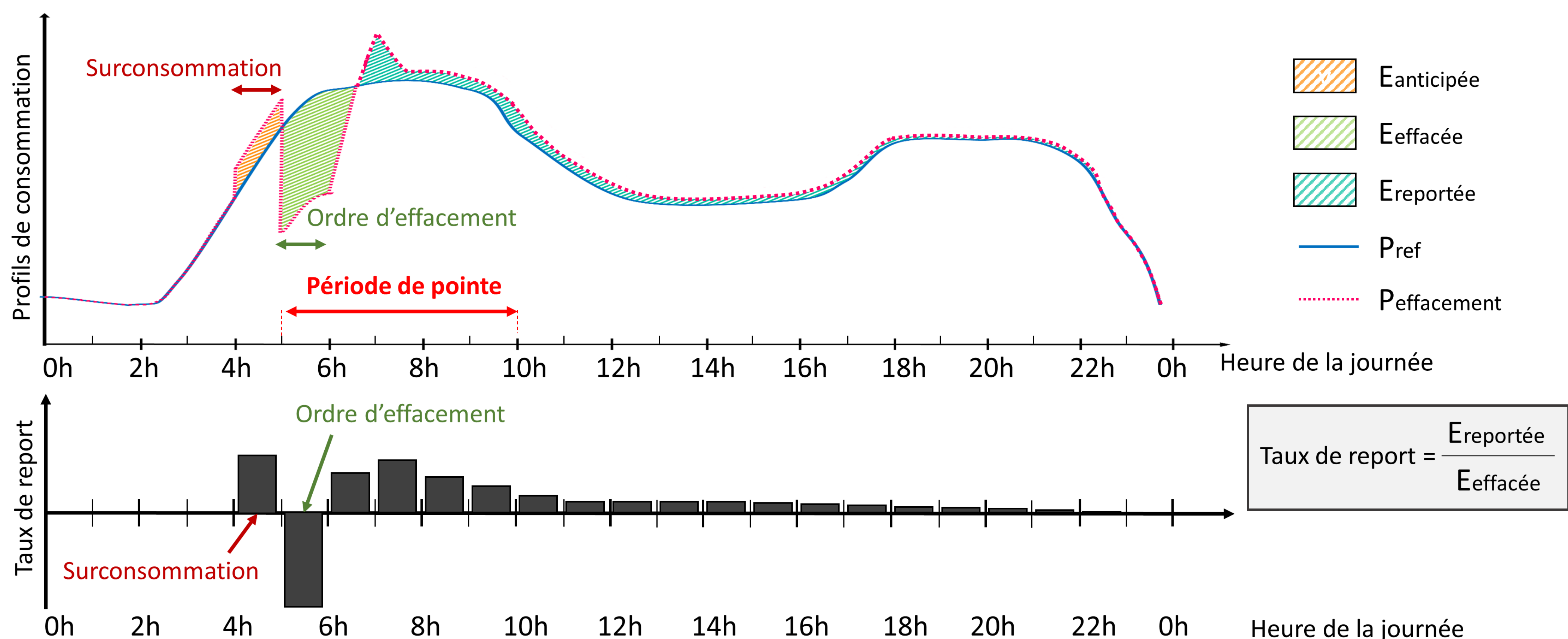


FIGURE 1. Exemple de l'impact d'une stratégie d'effacement après surconsommation sur le profil de consommation et taux de reports associés

Défini ainsi, le taux de report permet de regarder davantage ce qu'il se passe de façon dynamique et donne donc une indication sur l'influence de l'effacement dans le cadre d'une gestion d'une pointe de plus d'une heure. Alors que le taux d'économie d'énergie définit davantage ce qu'il se passe à long terme sur la proportion d'énergie effacée qui sera non reportée et donc économisée. Ces deux indicateurs nous permettront donc d'analyser l'impact de l'effacement sur la gestion de la pointe, ainsi que sur la sobriété énergétique.

Cependant, il est important de garder à l'esprit l'impact que peut avoir un effacement de consommation de chauffage sur le confort thermique. Il sera donc nécessaire de le quantifier également. Pour cela nous introduirons la température opérative telle que :

$$\text{Température opérative} = \frac{T_{\text{murs}} + T_{\text{air}}}{2} \quad (3)$$

Cette température opérative nous permettra de quantifier le niveau de confort, selon (Faria Neto et al., 2016) :

- Confortable : Entre +/- 1°C autour de la température de consigne (T_{cons})
- Légèrement inconfortable : Entre +/-1°C et +/-2°C autour de T_{cons}
- Inconfortable : Plus de 2°C de différence avec T_{cons}

Enfin, nous regarderons l'impact de ces stratégies d'effacement sur les émissions de CO₂. Pour cela nous nous appuyerons sur les émissions réelles de CO₂ générées par le parc électrique français durant le mois de Janvier 2016. Cela nous permettra d'estimer la variation des émissions brutes de CO₂ lors de la mise en place de stratégies d'effacement durant le mois de Janvier.

2.3 CADRE DE L'ÉTUDE

Dans l'objectif de garantir le confort thermique des occupants, certains effacements peuvent être réalisés après une préchauffe, afin de permettre au bâtiment d'emmagasiner de la chaleur au préalable. Cependant, dans une perspective de réduction de la pointe de consommation, cette préchauffe induisant une surconsommation sur l'heure d'avant ne devra être réalisée qu'en amont de la période de pointe (ici entre 5h et 10h). Notre cas d'étude visera à comparer deux types d'effacements : avec ou sans surchauffe, dans le but de procéder à des effacements différés sur un ensemble de bâtiments. De plus, nous chercherons à quantifier l'impact de la modélisation de l'effacement sur les résultats. Pour cela, nous établirons dans un premier temps un profil type

d'effacement, basé sur des résultats d'expérimentation au sein du projet GreenLys (Smartgrids-CRE, 2018a), ainsi que d'une étude menée par RTE (RTE, 2016). Dans un second temps, nous utiliserons un modèle thermique à constantes localisées afin de simuler de façon dynamique l'effacement. Cette deuxième approche nous permettra entre autre de regarder notre indicateur de confort thermique, impossible à déterminer par la première méthode.

3 MISE EN PLACE DES MODÈLES D'EFFACEMENT

Pour les deux modèles d'effacement (profil type ou simulation), nous choisirons de prendre pour courbe de consommation thermique de référence le résultat d'une simulation thermique dynamique d'un bâtiment de notre quartier. Nous simulerons la réponse du bâtiment à une consigne constante de 20°C sur le mois de Janvier, avec un pas de temps variable. Le modèle thermique choisi est le modèle généré par TEASER (Fuchs et al., 2016) et expliqué en 3.2. Pour ces deux modèles, deux scénarios seront étudiés :

- *Effacement d'une heure avec préchauffe l'heure précédente*

Afin de pouvoir procéder à la préchauffe du bâtiment hors de la période de pointe (entre 5h et 10h), la consigne d'effacement sera sur la tranche horaire de 5h à 6h.

- *Effacement simple d'une heure*

Dans ce scénario, l'effacement sera réalisé au milieu de la période de pointe, sur le créneau 7h-8h. Il ne sera pas précédé d'une préchauffe.

L'intérêt de ces deux scénarios est de reproduire les deux types d'effacement qui seront réalisés de façon échelonnée sur l'ensemble des bâtiments du quartier.

3.1 MODÉLISATION DU PROFIL TYPE DE REPORT

Avec un parc de bâtiments étudiés dans le projet comprenant deux écoquartiers neufs (Smartgrids-CRE, 2018a), nous considérons que le modèle type est adapté à notre quartier résidentiel neuf. Les résultats que nous obtenons alors avec ce "modèle type" montrent un taux d'économie d'énergie de l'ordre de 90% et des profils de report représentés figure 2.

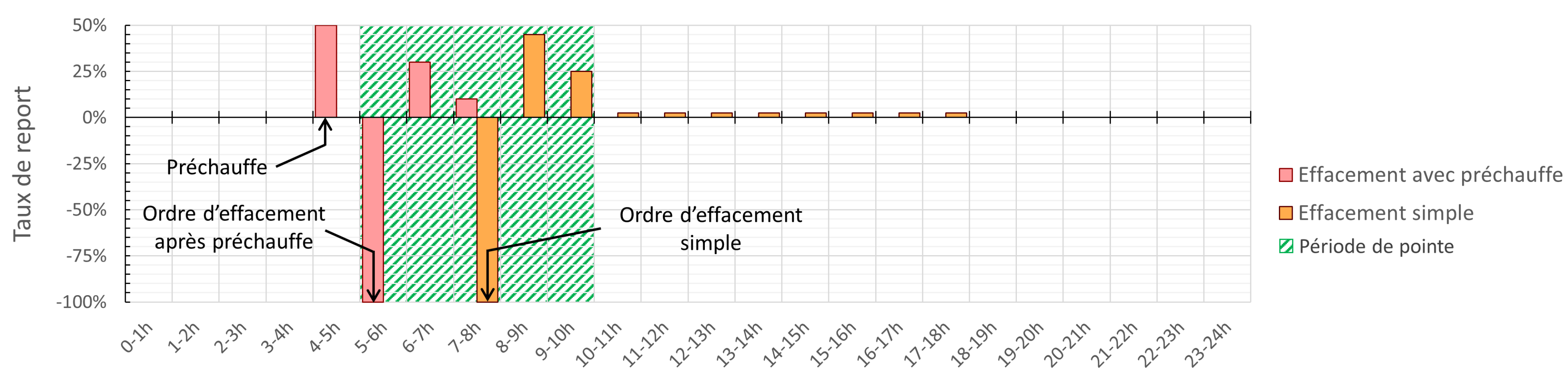


FIGURE 2. Profils types de report par créneau horaire construit à partir de résultats expérimentaux

3.2 CHOIX DU MODÈLE THERMIQUE

Aujourd'hui, l'échelle du quartier dans les logiciels de simulation énergétique dynamique devient de plus en plus courante grâce à des logiciels tels que DIMOSIM (DIstrict MOdeller and SIMulator) développé par le CSTB (Perez, 2017), CEA (City Energy Analyst) de l'ETH de Zurich (Fonseca et al., 2016) ou encore TEASER (Tool for Energy Analysis and Simulation for Efficient Retrofit) de RWTH (Remmen et al., 0). Afin de coupler la thermique du bâtiment et le réseau électrique, notre choix s'est porté sur TEASER, qui permet de générer des modèles en langage Modelica, largement utilisé pour la modélisation multi-physiques. TEASER est un outil open source offrant la possibilité de générer automatiquement des modèles thermiques de

bâtiments sur la base d'un schéma électrique équivalent dans les bibliothèques Modelica AixLib (RTWH-EBC, 2018) et Annex60 (IBPSA, 2018).

Cela peut être réalisé à l'aide d'un minimum de 5 données d'entrées : année de construction, surface d'habitation, type d'usage, nombre d'étages et hauteur des étages (Fuchs et al., 2016). Si seules ces données sont fournies, l'outil se chargera alors de les enrichir à l'aide de bases de données statistiques, dont nous allons pouvoir dans cette étude, analyser la validité en France. En effet, il est également possible de fournir soi-même les paramètres plus fins du modèle (surfaces des murs, orientations, épaisseurs, matériaux, ...). Lors d'une étude à l'échelle d'un quartier, il peut être très difficile d'avoir accès à des données précises sur l'enveloppe du bâtiment, rendant l'outil alors très intéressant. Nous utiliserons ici le modèle généré automatiquement par TEASER en fournissant seulement les 5 entrées minimales citées ci-dessus (appelé dans la suite modèle simple), ainsi que le modèle créé à l'aide des données d'enveloppe utilisées pour la simulation thermique dynamique (STD) réglementaire (appelé par la suite modèle enrichi).

4 RÉSULTATS

Ici, nous analyserons les impacts des effacements en termes de réduction de la pointe, de sobriété énergétique, de confort thermique et d'émissions de CO₂. Nous pouvons voir fig.3 et fig.4 les résultats moyens obtenus par plage horaire sur le mois de Janvier. Sont ici présentés les taux de report par plage horaire obtenus par nos deux modèles physiques (simple et enrichi), ainsi que ceux définis par le profil type pour comparaison. Nous avons également intégré les températures opératives moyennes, minimales et maximales par plage horaire, obtenues par les 2 modèles de simulation.

4.1 IMPACT SUR LA RÉDUCTION DE LA POINTE

Pour qu'il soit considéré comme efficace, un effacement devra avoir un report diffus, afin de décaler suffisamment la consommation pour la reporter hors de la période de pointe et ainsi diminuer la puissance moyenne en période de pointe.

4.1.1 EFFACEMENT SIMPLE DE 7H À 8H

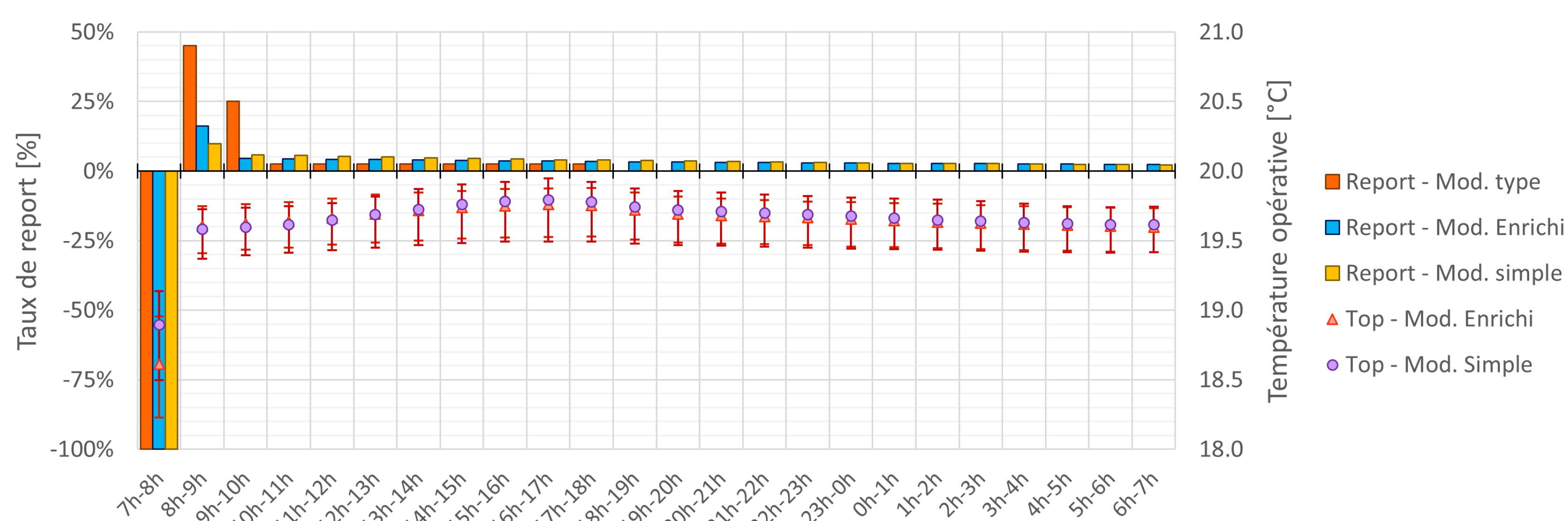


FIGURE 3. Valeurs moyennes par plage horaire des taux de report et températures opératives pour un effacement simple de 7h à 8h réalisé tous les jours durant le mois de Janvier

Alors que les modèles de simulation mènent à des taux d'économie d'énergie semblables à celui estimé par le modèle type : 9% pour le modèle simple et 12% pour le modèle enrichi contre 10% pour le modèle type, on voit que le report est beaucoup plus diffus sur les 2 modèles de simulation. En effet, le report sur le modèle type est fortement concentré dans les deux heures suivant l'effacement avec 70% de l'énergie effacée (45%, puis 25%), alors qu'il faut de 15h (modèle simple) à 16h (modèle enrichi) pour que 70% de l'énergie effacée soit consommée. Cela peut être

expliqué par le fait que la température d'air (et donc opérative) remonte dès la première heure après l'effacement (fig. 3). Cependant, le report se poursuit sur les heures suivantes afin de recharger les murs, dont la température varie plus lentement. Si l'on se concentre sur les deux heures suivant l'effacement, on remarque une surconsommation bien plus élevée pour le modèle type (45% puis 25%), que pour les modèles de simulation (10% puis 6% pour le modèle simple, contre 16% puis 5% pour le modèle enrichi).

4.1.2 EFFACEMENT DE 5H À 6H APRÈS PRÉCHAUFFE DE 4H À 5H

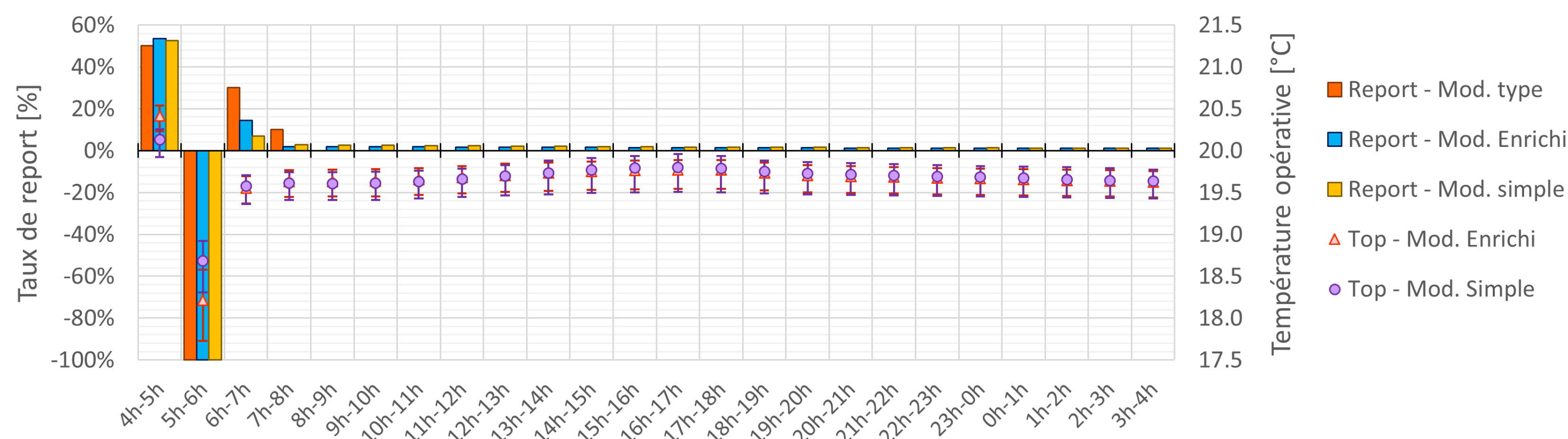


FIGURE 4. Valeurs moyennes par plage horaire des taux de report et températures opératives pour un effacement de 5h à 6h précédé d'une surchauffe de 4h à 5h réalisé tous les jours durant le mois de Janvier

Pour ce qui est du cas d'effacement après préchauffe, les observations quant aux différences entre les deux approches sont très similaires. Avec une surconsommation nécessaire pour la préchauffe du bâtiment de 50% dans le cas du profil type et de 53% pour les modèles de simulation (fig.4), il est possible de réduire le report après l'effacement et donc mieux contribuer à la réduction d'une pointe de longue durée. En effet, le report dans les deux heures suivant l'effacement se trouve réduit par rapport à un effacement simple pour les 3 modèles. Il passe de 45% puis 25% à 30% puis 10% pour le modèle type, de 10% puis 6% à 7% puis 3% pour le modèle simple et de 16% puis 5% à 14% puis 2% pour le modèle enrichi. Le report est donc réduit de 11% à 33% la première heure et de 52% à 60% la seconde heure. Néanmoins, préchauffer le bâtiment en amont d'un effacement devra être réalisé avec précaution afin de ne pas accentuer une éventuelle pointe l'heure précédant l'effacement. De plus, dans le cas des modèles de simulation, les taux d'économie d'énergie sont inférieurs à ceux d'un scénario d'effacement simple, avec 3% pour le modèle simple et 2% pour le modèle enrichi (contre 9% et 12%).

4.2 IMPACT SUR LE CONFORT THERMIQUE

Comme expliqué en 2.2, nous nous sommes intéressés à la température opérative du bâtiment comme indicateur du confort thermique. Avec une température de consigne fixée à 20°C, on sort de la zone de confort lorsque l'on dépasse les 21°C ou qu'on passe sous la barre des 19°C. Les résultats obtenus pour le mois de Janvier sont présentés fig.3 et fig.4. Les températures opératives horaires moyennes sont représentées avec leurs intervalles de variation. Nous pouvons donc remarquer que :

- En moyenne, les heures durant l'effacement sont sources d'inconfort thermique léger.
- En moyenne, le confort thermique est respecté sur les autres plages horaires.

De façon paradoxale, la perte de chaleur la plus importante (en moyenne -1,3°C pour le modèle simple et -1,8°C pour le modèle enrichi) se retrouve dans le cas de l'effacement avec une augmentation de la température l'heure précédente. Les deux effacements ne se produisant pas à la même heure, on peut identifier deux causes. Tout d'abord la température extérieure est plus faible à 5h qu'à 7h. De plus, les apports internes sont considérés comme nuls avant 6h et passent à 7W/m² à partir de 6h.

4.3 IMPACT SUR LES ÉMISSIONS DES CO2

Nous avons vu en 4.1 que chacun des effacements nous amène à une réduction de la consommation. Le taux d'économie d'énergie étant défini par rapport à la consommation effacée, la réduction de consommation sur l'ensemble de la journée est donc bien plus faible (cf. tableau 1).

	Effacement simple		Effacement après préchauffe	
	Mod. simple	Mod. enrichi	Mod. simple	Mod. enrichi
Taux d'économie d'énergie	9,0%	11,6%	3,1%	2,1%
Réd. de la consommation	0,40%	0,50%	0,21%	0,22%
Réd. des émissions de CO2	0,38%	0,50%	0,01%	0,05%
Réd. des gains attendus	3,2%	0,70%	94%	76%

TABLE 1: Synthèse des réductions de consommations et d'émissions de CO2 sur le mois de Janvier

En terme d'impact sur les émissions de CO2, on pourrait donc s'attendre à la même réduction. Cependant, la variabilité journalière et intra-horaire des émissions de CO2 du parc électrique modifie la valeur de cette réduction, puisque la consommation peut parfois être reportée lors de périodes plus émettrices en terme de CO2 que la période de l'effacement (voir figure 5). Il est donc possible de calculer l'écart de réduction par rapport aux gains attendus par la sobriété, qui est surtout notable dans le cas de l'effacement après préchauffe (cf. tableau 1).

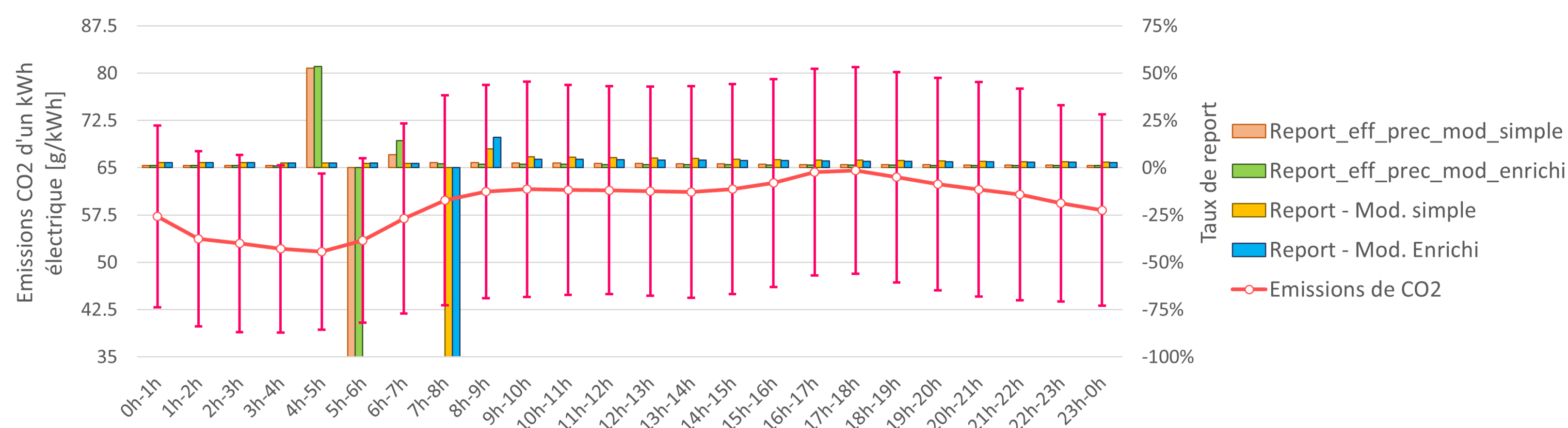


FIGURE 5. Moyennes horaires des émissions de CO2 et des taux de report sur le mois de Janvier

5 CONCLUSION

L'effacement de la consommation électrique apparaît comme un point clé de la transition énergétique. Comptabilisant 68% de de la consommation électrique en France, les bâtiments apparaissent donc comme un élément incontournable, permettant l'intégration de production d'énergie renouvelable variable, grâce à un potentiel de stockage thermique qu'il reste à évaluer. Pour ce faire, nous pouvons conclure que l'utilisation d'un outil de génération automatique de modèle thermique par enrichissement des données d'entrée par des bases de données, tel que TEASER, est intéressante pour une première estimation rapide des économies d'énergie et de la dynamique du report. La comparaison des deux modèles (simple et enrichi) nous amène à valider l'utilisation de bases de données allemandes sur des bâtiments neufs français. Cette méthode est en effet un bon compromis entre le temps nécessaire à mettre en place le modèle simple par rapport au modèle enrichi et la précision obtenue par ce dernier. Néanmoins, il restera préférable d'utiliser le modèle enrichi pour quantifier plus finement l'impact sur la réduction de la pointe, notamment sur l'heure suivant l'effacement, ainsi que la possibilité d'inconfort thermique. Sur ce point, on remarque le fort intérêt de l'utilisation de STD, qui permet de suivre l'évolution de la température opérative, en plus de la prise en compte de la réponse physique du bâtiments avec leurs temps de réponse. Enfin, l'utilisation d'indicateurs bien choisis tels que le taux de report par tranche horaire, le taux d'économie d'énergie à horizon de 23h, la température opérative et

la réduction des émissions de CO₂ permettent une analyse multiple de l'impact d'un effacement (réduction de la pointe, sobriété énergétique, confort thermique et empreinte carbone).

6 REMERCIEMENTS

Ce travail a bénéficié du soutien du CDP Eco-SESA recevant des financements 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.

RÉFÉRENCES

- De Coninck, R. & Helsen, L. (2013). Bottom-up quantification of the flexibility potential of buildings. In *13th Conference of International Building Performance Simulation Association*.
- Dréau, J. L. & Heiselberg, P. (2016). Energy flexibility of residential buildings using short term heat storage in the thermal mass. *Energy*, 111, 991 – 1002.
- Faria Neto, A., Bianchi, I., Wurtz, F., & Delinchant, B. (2016). Thermal comfort assessment.
- Fonseca, J. A., Nguyen, T.-A., Schlueter, A., & Marechal, F. (2016). City energy analyst (cea) : Integrated framework for analysis and optimization of building energy systems in neighborhoods and city districts. *Energy and Buildings*, 113, 202 – 226.
- Fuchs, M., Teichmann, J., Lauster, M., Remmen, P., Streblow, R., & Müller, D. (2016). Workflow automation for combined modeling of buildings and district energy systems. *Energy*, 117, 478 – 484. The 28th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems - ECOS 2015.
- IBPSA (2018). Github - `ibpsa/modelica-ibpsa` : Modelica library for building and district energy systems developed within ibpsa project 1. <https://github.com/ibpsa/modelica-ibpsa>.
- Masy, G., Georges, E., Verhelst, C., Lemort, V., & André, P. (2015). Smart grid energy flexible buildings through the use of heat pumps and building thermal mass as energy storage in the belgian context. *Science and Technology for the Built Environment*, 21(6), 800–811.
- Mercier, A., Benoit, C., Besanger, Y., & Wurtz, F. (2014). MILP formulation for large scale peak shaving problems in low voltage smart grids. In *OIPE 2014* Delft, Netherlands.
- Perez, N. (2017). *Contribution à la conception énergétique de quartiers : simulation, optimisation et aide à la décision*. PhD thesis, École doctorale Sciences et Ingénierie en Matériaux, Mécanique, Énergétique et Aéronautique.
- Remmen, P., Lauster, M., Mans, M., Fuchs, M., Osterhage, T., & Müller, D. (0). Teaser : an open tool for urban energy modelling of building stocks. *Journal of Building Performance Simulation*, 0(0), 1–15.
- RTE (2016). Évaluation des économies d'énergie et des effets de bord associés aux effacements de consommation. https://clients.rte-france.com/htm/fr/mediatheque/telecharge/20160401Rapport_report_complet.pdf.
- RTWH-EBC (2018). Github - `rtwh-ebc/aixlib` : A modelica model library for building performance simulations. <https://github.com/RWTH-EBC/AixLib>.
- Smartgrids-CRE (2018a). Greenlys. <http://www.smartgrids-cre.fr/index.php?p=greenlys>.
- Smartgrids-CRE (2018b). La flexibilité de la demande, une des clés pour réussir la transition énergétique. <http://www.smartgrids-cre.fr/index.php?p=flexibilite-demande>.

Modélothèque « Qualité de l’Air Intérieur » de BuildSysPro : nouveautés et confrontation aux premières mesures du ST5-1 de l’Annexe 68.

**Charles Florian Picard*¹, Benjamin Rigault¹, Marc Olivier Abadie², Karim Limam²,
Bénédicte Wall-Ribot¹, Thierry Duforestel¹**

¹ EDF R&D, Moret-sur-Loing, France

² Université de La Rochelle, La Rochelle, France

* charles-florian.picard@edf.fr

RESUME. Les préoccupations d'économie d'énergie sont étroitement liées aux problématiques de qualité de l'air intérieur (QAI), et donc notamment de santé, dans un contexte où les Réglementations Thermiques poussent à une amélioration de l'isolation thermique des bâtiments et à un meilleur contrôle du renouvellement de l'air. Dans ce cadre, la bibliothèque BuildSysPro, développée par EDF R&D, s'enrichit en intégrant sa propre modélothèque QAI, outil de modélisation 0D/1D, permettant de simuler simultanément le comportement thermique d'un bâtiment et de ses polluants intérieurs. Cet article décrit dans un premier temps les grands principes de l'outil et des modèles récemment implémentés. Dans un second temps, la modélisation, par cette modélothèque, d'un exercice de l'annexe 68 (benchmark ST5-1) de l'Agence Internationale de l'Energie est décrite. Cet exercice porte sur la mesure d'un polluant (hexane) dans une ambiance contrôlée (cellule PASSYS). Les résultats obtenus grâce à cet outil sont discutés au regard des premières données expérimentales disponibles dans ce cadre.

MOTS-CLÉS : Qualité de l'air intérieur, Modélisation, COV, Modelica, BuildSysPro.

ABSTRACT. Energy efficiency and Indoor Air Quality (IAQ) are closely related in a context where Building Energy Standards encourage an improvement in the insulation of buildings and a better control of air exchange with the outside. The BuildSysPro Modelica library developed by EDF R&D is therefore getting enriched with IAQ components to simultaneously simulate the energy performance or consumption of a building and the pollutants concentration evolution of the indoor air. In a first part, this paper presents the IAQ library's structure and content with a focus on the recently implemented models. In a second part, some of the IAQ components are used to model a test case of the annex 68 of the International Energy Agency (benchmark ST5-1). In this case study, the evolution of the concentration of an organic compound is measured in a PASSYS test cell. Modeling results of the IAQ tool are then discussed and compared to the first experimental available results.

KEYWORDS : Indoor air quality, Modeling, VOC, Modelica, BuildSysPro.

1. INTRODUCTION

Les préoccupations d'économie d'énergie sont étroitement liées aux problématiques de qualité de l'air intérieur (QAI) et de confort, dans un contexte où les Réglementations Thermiques poussent à une amélioration de l'isolation des bâtiments. En effet la réduction de la perméabilité de l'enveloppe et une inadéquation des flux de renouvellement d'air peuvent conduire à une dégradation de la QAI par accumulation des polluants endogènes. Passant près de 80% de notre temps en intérieur, il a été montré qu'une mauvaise QAI a des conséquences notamment sur notre santé et sur la productivité au travail. Plusieurs outils de modélisation du comportement énergétique des bâtiments s'enrichissent donc afin de prendre en compte cette problématique. C'est le cas de la bibliothèque BuildSysPro

développée par EDF R&D qui intègre sa propre modélothèque QAI permettant de simuler simultanément le comportement thermique d'un bâtiment et de ses polluants intérieurs. Il s'agit d'un outil de modélisation 0D/1D adapté à la modélisation à grande échelle de la thermique et de la QAI des bâtiments.

De tels outils se basent sur des hypothèses qu'il convient d'évaluer à l'aide de données expérimentales. Pour cela, EDF R&D a décidé d'exploiter les mesures de polluants en ambiance contrôlée (benchmark ST5-1) dans le cadre des travaux de l'annexe 68 de l'Agence Internationale de l'Energie (IEA), annexe dédiée aux problématiques de QAI et leur conciliation avec l'efficacité énergétique des bâtiments.

Dans un premier temps, cet article présente la modélothèque utilisée et décrit les grands principes des modèles récemment implémentés pour la prise en compte des interactions entre les parois et l'humidité de l'air ainsi qu'entre les parois et les polluants gazeux et particulaires. Dans un second temps, une application d'une partie de ces modèles aux premiers résultats disponibles dans le cadre de l'annexe 68 est présentée.

2. DESCRIPTION DE LA MODELOTHEQUE QAI DE BUILDSYSPRO UTILISEE

2.1. VUE D'ENSEMBLE DE L'OUTIL

La bibliothèque BuildSysPro (Plessis et al. 2014 ; Schumann et al. 2016), développée par EDF R&D en langage Modelica permet aujourd'hui plusieurs approches physiques selon les objectifs recherchés par le modélisateur : thermique pure, thermo-aéraulique, thermo-hygro-aéraulique ou encore thermo-aéro-QAI. La modélothèque utilisée dans le cadre de cet article se base sur cette dernière approche. Le principe général de son fonctionnement est décrit par Tourreilles (2016). Cette modélothèque fait toujours l'objet de développements afin, en particulier, d'affiner la prise en compte des interactions et des couplages multi-physiques et permet aujourd'hui notamment la modélisation simultanée de :

- L'ensemble des phénomènes thermiques et énergétiques pris en compte par BuildSysPro ;
- L'aéraulique des différentes zones (réseaux et entrées/sortie d'air, grandes ouvertures, infiltrations, épurateurs et centrales de traitement d'air...etc.) ;
- Les sources ponctuelles ou surfaciques de polluants ;
- Les interactions entre les parois et l'humidité de l'air ainsi qu'entre les parois et les polluants gazeux et particulaires.

2.2. DEVELOPPEMENTS RECENTS

2.2.1. Modélisation de l'humidité

La prise en compte de la pression partielle en eau en tant que gaz condensable a été ajoutée au sein de la définition des connecteurs de cette modélothèque modelica car sa modélisation trouve une importance de premier plan en QAI. Celle-ci peut en effet influencer le comportement des polluants présents mais également le fonctionnement des systèmes de ventilation.

L'impact hygroscopique des matériaux présents dans une pièce (parois et mobilier) est ici pris en compte par un modèle de tampon réversible bi-nodale de type EMPD (Effective Moisture Penetration Depth). Ce type de modèle suppose qu'une couche mince de matériaux (d'épaisseur d_{EMPD}) interagit de façon dynamique avec des variations périodiques de l'humidité intérieure. Cette distance est proportionnelle à la racine carrée de la période de sollicitation : les deux nœuds correspondent respectivement aux variations journalières et saisonnières (figure 1). La cinétique des échanges entre la pression de vapeur de chaque zone (en équilibre avec le contenu en eau du matériau) est modélisée par plusieurs résistances en série qui sont dues au coefficient de transfert convectif à la surface de la paroi, à la résistance d'un éventuel revêtement mince et à la perméabilité au transfert de vapeur des matériaux concernés. L'équivalence mathématique de cette discrétisation de l'humidité au sein de la paroi dans le cadre d'une sollicitation harmonique est montrée par Cunningham (1988). Ce type d'approche est aujourd'hui utilisé par plusieurs outils traitant la modélisation de l'humidité au sein de bâtiments de façon similaire (Woods et al. 2013 ; EnergyPlus 2018).

2.2.2. Modélisation des interactions entre paroi et polluant particulaires.

Le flux de particules déposé (particules/s) est régi par le bilan entre celles déposées et celles remises en suspension pour chaque classe de particules considérée. La méthode de calcul de la vitesse de dépôt (m/s) implémentée par défaut est décrite par Nazaroff et al. (2000). Ce modèle permet de déterminer la vitesse de dépôt des particules en fonction de leur taille et de leur masse volumique. Les seuls autres paramètres à renseigner sont l'inclinaison de la paroi et la vitesse de friction qui dépend de la géométrie de la pièce et de la vitesse de l'air. Pour une pièce ventilée mécaniquement de taille classique la vitesse de friction est de l'ordre de 1cm/s.

Pour les surfaces verticales, les phénomènes de transports considérés, au sein de la couche limite d'air à la surface des parois, sont la diffusion brownienne et la diffusion turbulente. Pour les parois horizontales l'effet de la gravité est également considéré. A titre d'illustration la figure 2 montre les vitesses de dépôts considérées pour 3 types de parois pour une vitesse de friction de 1cm/s et selon la nature des particules.

La vitesse de remise en suspension est paramétrable par l'utilisateur selon le type d'ambiance modélisée. Par défaut celle-ci est proportionnelle à l'occupation de la pièce.

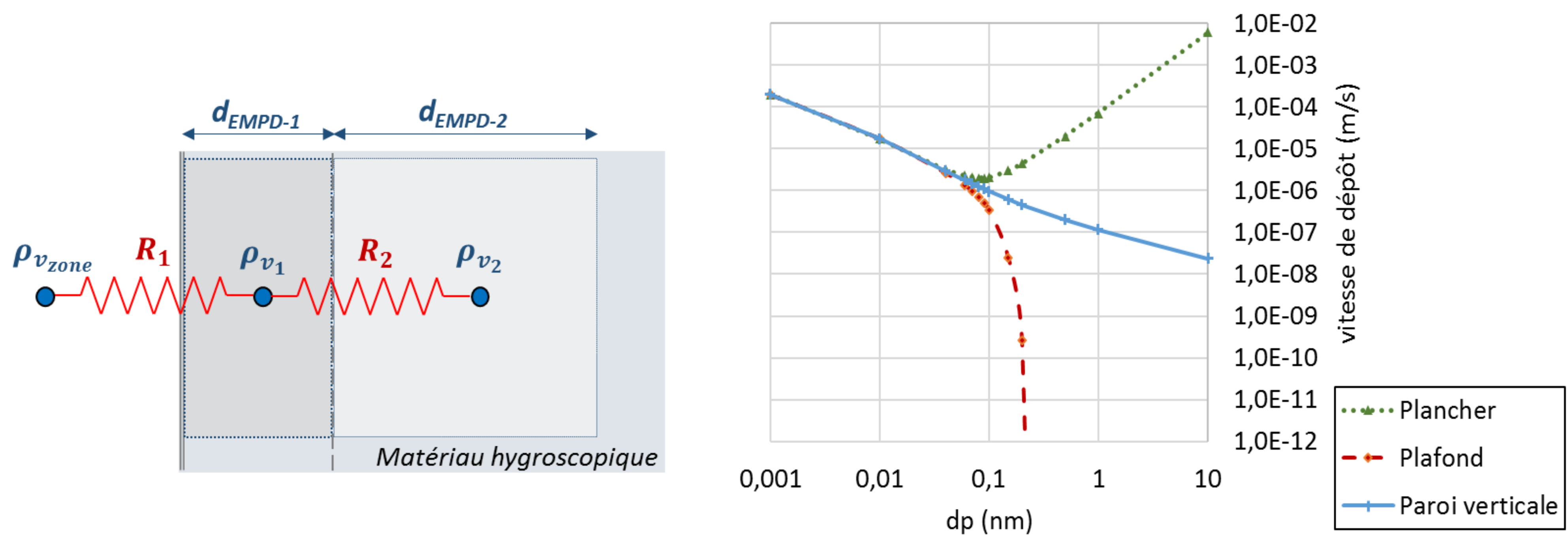


Figure 1 : Vue symbolique du modèle EMPD implémenté.

Figure 2 : Vitesses de dépôts du modèle selon le diamètre des particules (masse volumique de 2000kg/m^3 , vitesse de friction de 1cm/s).

2.2.3. Modélisation des interactions entre paroi et polluants gazeux.

L'approche décrite par Turreilles (2016) est conservée. Le flux massique d'un polluant i se déposant sur un matériau j est régie par l'équation (1) :

$$Q_{m_{i,j}} = (k_{a_{i,j}} C_i - k_{d_{i,j}} C_{s_{i,j}}) S_j \quad (1)$$

Où : $C_{s_{i,j}}$ est la masse de polluant adsorbé (kg/m^2) ; C_i est la concentration du polluant dans l'air (kg/m^3), $k_{a_{i,j}}$ est la constante d'adsorption (m/s), $k_{d_{i,j}}$ est la constante de désorption et S_j est la surface de matériau j considéré (m^2).

Une autre approche utilisant la constante de partition $K_{i,j}$ entre un polluant i et un matériau j est également possible. Cette approche consiste à considérer un équilibre à la surface immédiate du matériau. Les échanges avec le volume d'air sont alors régis par le transfert convectif dans la couche limite qui est déterminé par un coefficient de transfert de masse h_{conv} (Axley 1991).

3. BENCHMARK ST5-1 - ANNEXE 68

Afin d'évaluer le comportement de l'outil développé, il est nécessaire de le confronter à des jeux de données expérimentales. Cette article se concentre sur les résultats obtenus dans le cadre de l'annexe 68 de l'IEA et plus précisément sur l'exercice 1 de la sous-tâche n°5 « Field measurements and case studies » (ST5-1) qui se consacre notamment à la production de tels jeux de données, à complexité croissante, adaptés à l'évaluation des modèles développés. Il a été possible d'exploiter les premiers résultats obtenus dans ce cadre (Laverge 2017).

3.1. DESCRIPTION DE L'EXERCICE

L'expérimentation est réalisée dans une cellule PASSYS (type de cellule test standardisée construite dans plusieurs pays européens) à Limelette, en Belgique. Les dimensions internes de la partie test concernée sont de 4,86m x 2,46m x 2,46m, pour une surface au sol de 11,96m² et un volume de 29,41m³ (figure 3). Une étanchéité à l'air de 1.7 ACH50 a été utilisée. Une source de polluant (type bouteille ouverte contenant de l'hexane liquide) est positionnée en partie centrale de la pièce sur un support. La température est maintenue à 27,5°C par un radiateur contrôlé par un thermostat (précision 0,1°C). La pièce est homogénéisée par un ventilateur.

Un ventilateur axial permet d'alimenter en air extérieur la pièce de test par une ouverture circulaire de 8 cm sur la face nord abritée par le local technique. Une ouverture de 15cm sur cette même face est présente et permet à l'air de s'échapper par le toit à travers une courte conduite. L'expérimentation se déroule sur 12 jours pendant le mois d'avril 2017. Des taux de renouvellement d'air de 1 volume/h et de 0,1 volume/h sont successivement utilisés selon le protocole résumé tableau 2. La concentration en hexane est mesurée par un détecteur à ionisation de flamme (Rosemount NGA2000) et est exprimée en ppm volumiques. Les résultats expérimentaux sont présentés figure 5.

Phase	Date	Ventilation	Etat de la source
0	10/04/2017 00:00:00	1 vol/h	fermée
1	10/04/2017 14:20:00	1 vol/h	ouverte
2	12/04/2017 17:20:00	0.1 vol/h	ouverte
3	18/04/2017 14:12:00	1 vol/h	ouverte

Tableau 2 : protocole expérimental du ST5-1.

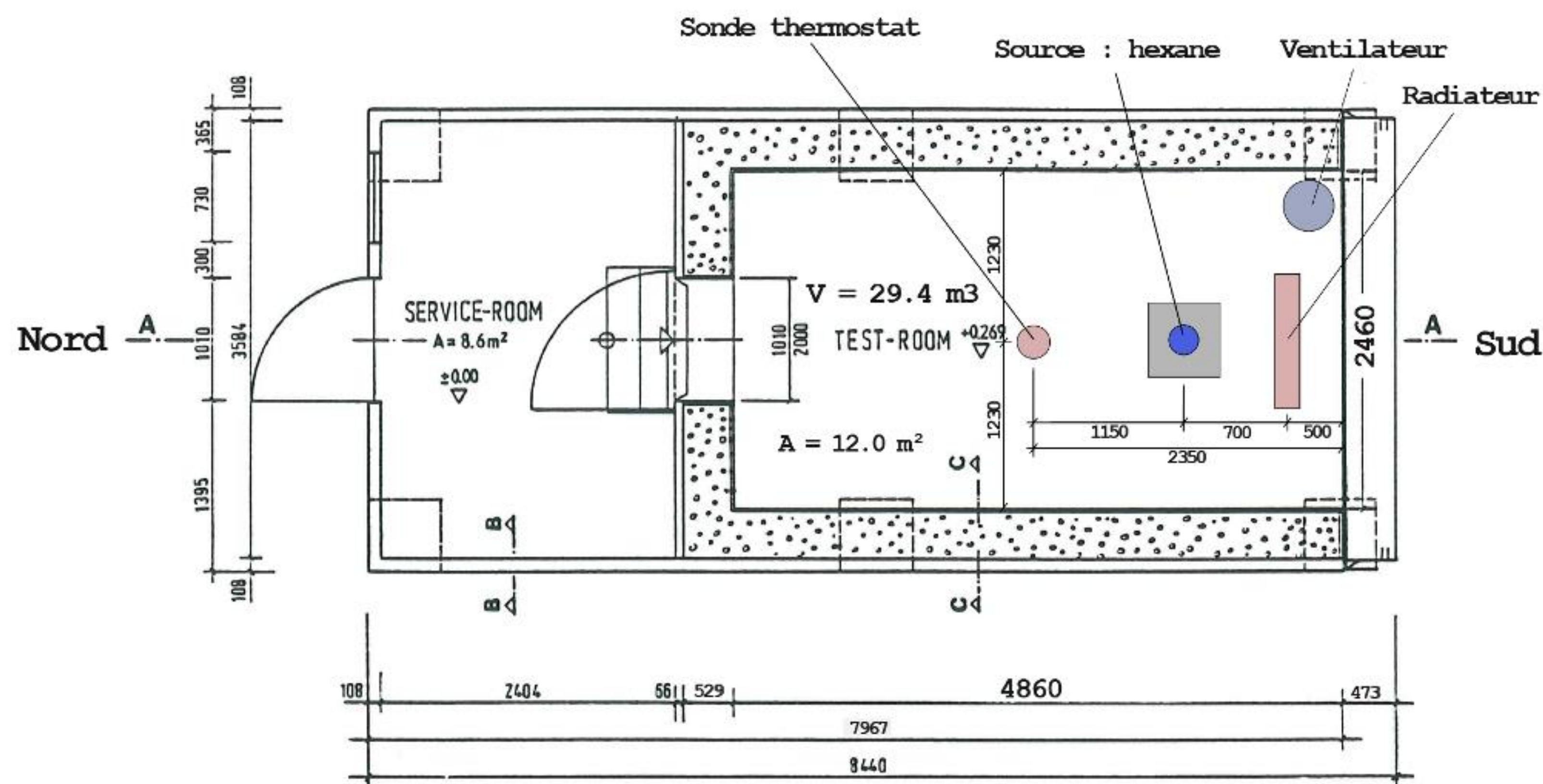


Figure 3 : Représentation schématique d'une cellule PASSYS et positionnement du dispositif expérimental.

3.2. CHOIX DE MODELISATION

La température extérieure ainsi que les vitesses et directions du vent sont mesurées par une station météorologique locale. La pression extérieure est fixée à 1013hPa et est corrigée au niveau de chaque paroi en fonction de la vitesse du vent et de son orientation par rapport à la paroi selon des coefficients déterminés par Liddament (1996). Aucune correction n'est appliquée pour la paroi nord abritée.

Un modèle d'infiltration est associé à chaque paroi. Le débit Q associé dépend de la différence de pression Δp sous la forme décrite équation (2).

$$Q = K \Delta p^{\frac{2}{3}} \quad (2)$$

Le coefficient K est déterminé à partir de la valeur de ACH50 valant 1,7 (débit de fuite de 1.7volume/h à 50Pa de différence de pression) en faisant l'hypothèse que ce débit de fuite suit une loi similaire à (2). Cette valeur est ensuite répartie pour chaque face de l'enceinte suivant leurs surfaces respectives. La température intérieure est réglée à 27,5°C par un radiateur fournissant une puissance maximale de 1000W.

Le taux d'émission du polluant S (kg/s) a été déterminé à partir de la courbe expérimentale (figure 5) lors de la phase de ventilation haute à 1 vol/h où tous les autres phénomènes pouvant influencer sur le renouvellement de l'air réel ont été négligés. Le palier de concentration en kg/m³ est alors égal au rapport entre S et le débit volumique imposé. Nous avons retenu un taux d'émission, supposé constant, du polluant de $1,3 \cdot 10^{-7}$ kg/s.

Les phénomènes d'adsorption ont été négligés dans un premier temps puis implémentés selon l'approche décrite précédemment. En l'absence de description précise des propriétés des matériaux recouvrant la paroi vis-à-vis de l'hexane, plusieurs valeurs ont été utilisées afin de discuter de l'influence possible de ce phénomène.

L'assemblage réalisé par la bibliothèque QAI est représenté figure 4.

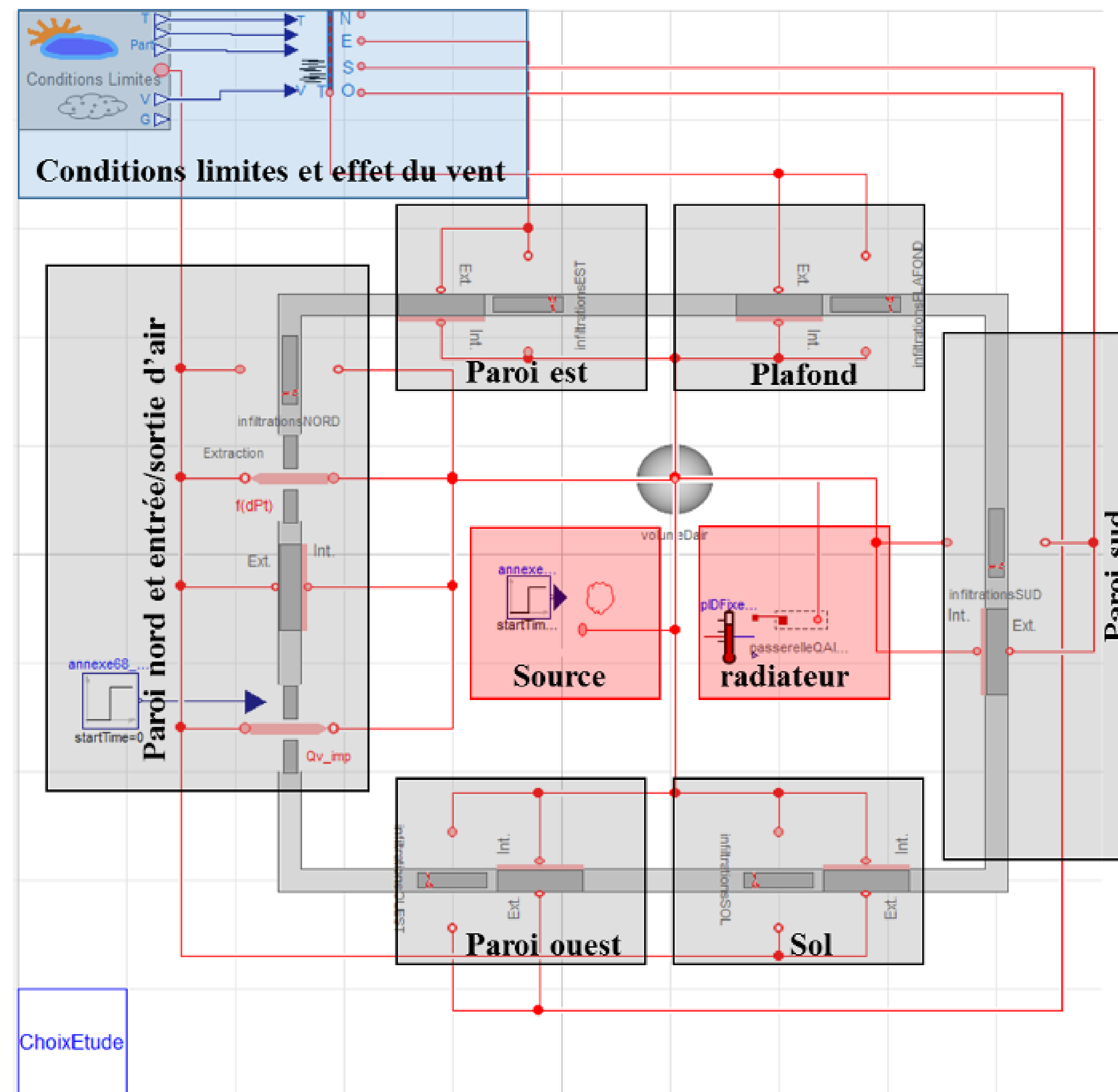


Figure 4 : Représentation de l'assemblage réalisé sur la bibliothèque QAI.

3.3. RESULTATS ET DISCUSSION

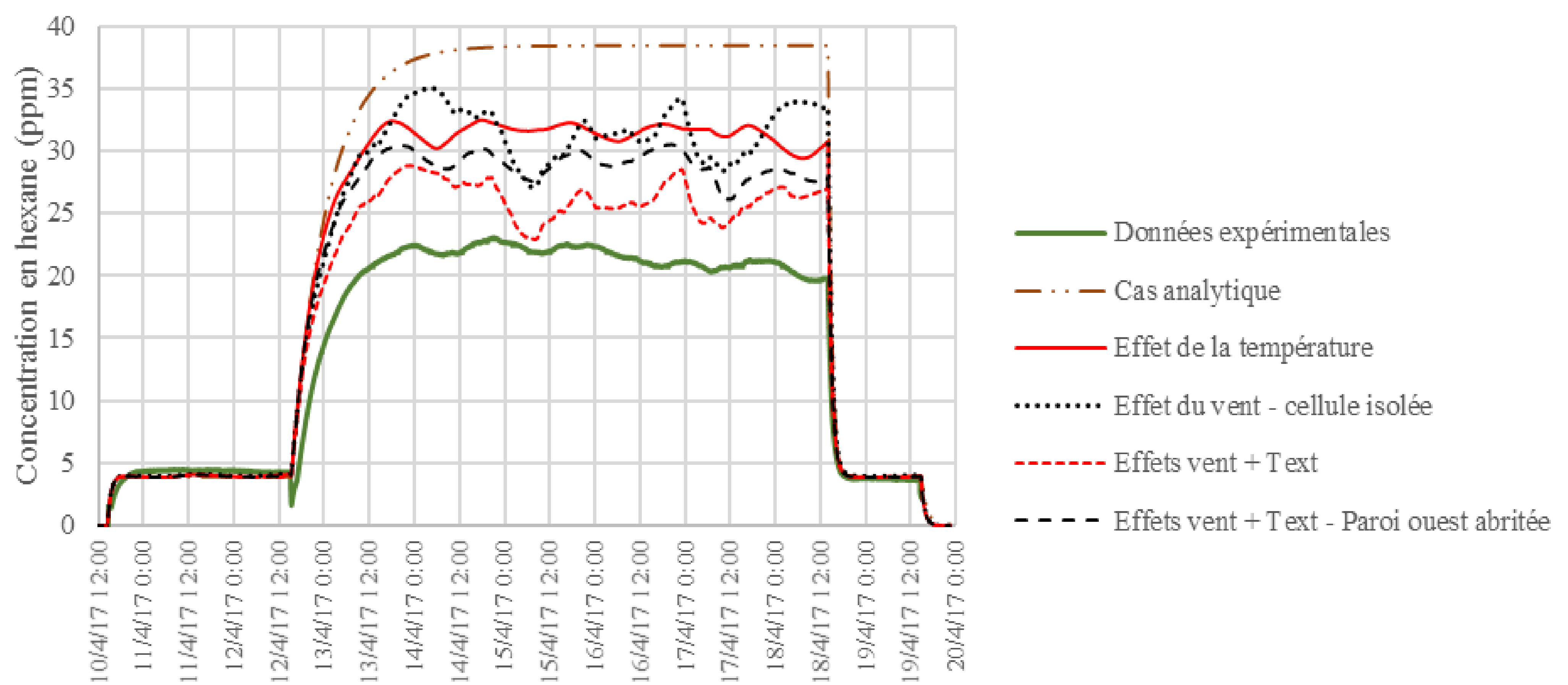


Figure 5 : Résultats expérimentaux et simulations de la modélisation progressive des phénomènes considérés.

Une première approche est de considérer la solution de l'équation (3) où la concentration extérieure en hexane est considérée nulle, la source en polluant est notée S (kg/s) et le débit sortant Q (m^3/s).

$$V \frac{dC}{dt} = S - Q C(t) \quad (3)$$

La solution de cette équation est appelée « solution analytique » dans la suite de cette étude (correspond à l'équation des gaz traceurs) et sert de référence pour évaluer l'effet des phénomènes considérés (figure 5). L'écart important entre la concentration simulée et celle mesurée pour le taux de renouvellement faible confirme la nécessité d'une modélisation plus complexe de ce cas.

Le premier phénomène étudié est la mise à température de 27,5°C de l'air extérieur (qui varie entre 0°C et 15°C). Le taux de renouvellement réel est donc supérieur à celui imposé du fait de l'expansion de l'air réchauffé. Cet effet permet d'expliquer en partie les résultats observés (figure 5). Il est possible de noter une augmentation globale du taux de renouvellement d'air effectif. En outre la courbe alors obtenue semble bien corrélée à la courbe expérimentale et présente des variations similaires.

Cependant les concentrations en hexane semblent toujours surestimées. Il a donc été choisi de modéliser l'effet du vent sur les parois, phénomène influençant les infiltrations d'air. Deux hypothèses ont été effectuées : une cellule parfaitement isolée et une cellule abritée sur son côté ouest (plusieurs bâtiments sont présents à quelques mètres). Les résultats des simulations correspondantes sont comparés aux résultats expérimentaux figure 5. Le vent a également pour effet d'augmenter le taux de renouvellement effectif de l'air et abaisse le palier de concentration observé. Cet effet engendre cependant des variations brutales non observées expérimentalement. Considérer la paroi ouest abritée permet de limiter cet effet.

La prise en compte conjointe de ces deux phénomènes permet d'abaisser considérablement la surestimation moyenne de la concentration en hexane par rapport au cas analytique : celle-ci passe de 80% à moins de 20% (figure 5). Une prise en compte plus fine des infiltrations et de l'effet de l'environnement de la cellule sur celui du vent devrait permettre d'affiner la prise en compte de ces phénomènes.

Dans ces différentes simulations les phénomènes de sorption de l'hexane sur les parois de l'enceinte ont été négligés. Cependant, en l'absence de description précise des paramètres de sorption des parois de la cellule vis-à-vis du gaz utilisé, plusieurs valeurs du couple k_a/k_d ont été utilisées afin de discuter son influence possible (tableau 3). Les résultats obtenus sont présentés figure 6.

Cas	k_a (m/s)	k_a/k_d (m)	Cas	k_a (m/s)	k_a/k_d (m)	Cas	k_a (m/s)	k_a/k_d (m)
1.1	10^{-6}	10	2.1	10^{-5}	10	3.1	10^{-4}	10
1.2	10^{-6}	1000	2.2	10^{-5}	1000	3.2	10^{-4}	1000

Tableau 3 : Différentes valeurs utilisées pour évaluer l'impact possible de l'adsorption.

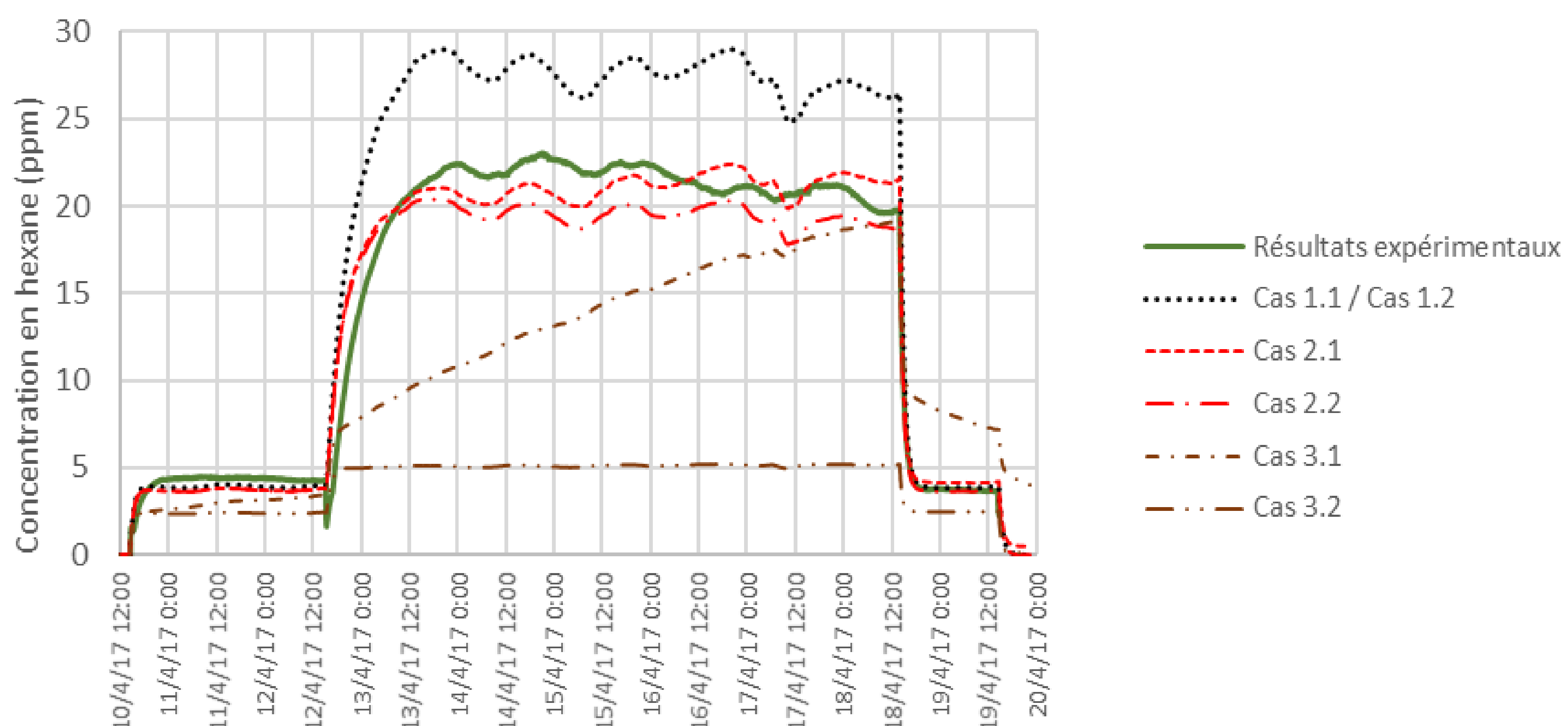


Figure 6 : Ajout de la prise en compte des phénomènes de sorption selon les paramètres du tableau 3 (cas représenté : hypothèse paroi ouest abritée).

Les résultats obtenus (figure 6) montrent que l'effet des phénomènes de sorption peut être très varié selon leur paramétrisation. Pour les cas 1.1 et 1.2 il est neutre et n'influence que de façon négligeable le résultat. Les cas 2.1 et 2.2 montrent que des phénomènes de sorption sont à même d'expliquer les différences entre les résultats expérimentaux et les simulations. Ceci peut justifier une exploration plus poussée de ces phénomènes qui nécessiterait une évaluation des matériaux de revêtement de la cellule vis-à-vis de l'hexane dans les conditions expérimentales. En effet, à la connaissance de l'auteur, il n'existe pas de telles données dans la littérature pour ce polluant.

4. CONCLUSION

Cette étude montre que, même dans le cas d'un exercice apparemment simple, il est nécessaire d'adopter une approche multi-physique afin d'estimer la concentration d'un polluant dans une ambiance. La bibliothèque QAI de BuildSysPro, de par sa modélisation simultanée de la thermique, de l'aérodynamique et de la QAI, est adaptée à cette approche. Plusieurs phénomènes ont été modélisés afin d'expliquer les écarts des résultats expérimentaux avec une approche simple. Globalement la somme des effets envisagés permet de diminuer significativement l'erreur commise, notamment pour les faibles renouvellements d'air.

Cette étude fournit également une base permettant la comparaison à d'autres modèles appliqués à ce même exercice ST5-1.

5. BIBLIOGRAPHIE

- Axley, J.W. 1991. Adsorption modeling for building contaminant dispersal analysis. *Indoor Air*, 2 : 147-171.
- Cunningham M. J. 1988. « The moisture performance of framed structures, a mathematical model. » *Building and Environment* 23 (2) : 123-135.
- EnergyPlus Documentation « The Reference to EnergyPlus Calculations », https://energyplus.net/sites/default/files/pdfs_v8.3.0/EngineeringReference.pdf.
- Laverge, J. 2017. « Description of the Subtask 5 Common Exercise 1. » Work document of the IEA Annex 68 – Indoor Air Quality Design and Control in Low Energy Residential Buildings project, 7p.
- Liddament M. W. 1996. « A guide to energy efficient ventilation », AIVC, Coventry, 274p.
- Nazaroff, William W., Alvin C. K. Lai. 2000. « Modeling indoor particle deposition from turbulent flow onto smooth surfaces. » *J. Aerosol Sci.* 31 (4) : 463-476.
- Plessis G., A. Keammerlen, A. Lindsay. 2014. « BuildSysPro : a Modelica library for modelling building and energy systems ». *Proceedings of the 10th International Modelica Conference*.
- Schumann M., B. Charrier, G.Plessis, B. Wall-Ribot. 2016. « BuildSysPro : une bibliothèque Modelica open-source pour l'énergétique des bâtiments et des quartiers. » *Proceedings of IBPSA*.
- Tourreilles C. 2016. « Qualification énergétique et sanitaire des systèmes d'épuration intégrés aux réseaux de ventilation ». Thèse de doctorat, Université de la Rochelle. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01373408/document>.
- Woods, J., J., Winkler, et D. Christensen. 2013. « Evaluation of the Effective Moisture Penetration Depth Model for Estimating Moisture Buffering in Buildings. » Technical report, National Renewable Energy Lab. (NREL), Golden, CO (United States).

Mise en œuvre d'une solution d'interopérabilité pour la prédiction d'indicateurs de performance énergétique : application à un bâtiment démonstrateur.

Hugo Viot*¹, Laurent Mora¹, Guilian Leroux¹

*1 Univ. Bordeaux, CNRS, Arts et Métiers ParisTech, I2M, UMR 5295
Esplanade des Arts et Métiers, 33400 Talence, France,*

**hugo.viot@u-bordeaux.fr*

RESUME. L'interopérabilité des outils de simulation est un point clé pour les industriels CVC et les ingénieurs du bâtiment afin de tendre vers la garantie de performance énergétique. Cette étude propose de modéliser une salle expérimentale occupée et comprenant trois systèmes énergétiques : un plancher chauffant, des ventilo-convecteurs (VCV) et une centrale de traitement d'air double flux (CTA) asservie à une sonde de CO₂. Les modèles de systèmes et de l'enveloppe sont développés et validés de façon indépendante dans des outils distincts. Un modèle de type analogie électrique codé dans l'environnement Matlab sert à modéliser l'enveloppe. Les trois systèmes et leurs logiques de régulation sont modélisés à l'aide du langage Modelica. Le modèle complet est obtenu par assemblage des sous-modèles dans l'environnement Dymola en intégrant le modèle d'enveloppe sous forme de composant FMU. La confrontation avec une séquence expérimentale montre la pertinence d'une telle méthode pour la prédiction d'indicateurs de performance.

MOTS-CLÉS : Interopérabilité, Modelica, Systèmes énergétiques

ABSTRACT. For both HVAC manufacturers and engineers, interoperability methods can help to estimate and guarantee the building energy performance. The purpose of this work is to model an experimental room with three HVAC systems: a floor heating system (TABS), fan coil units and a dual-flow air handling unit controlled by a CO₂ sensor for air renewal. The models of the systems and the building envelope are created in separate tools and independently validated. The envelope is described by an RC model identified in the Matlab environment whereas HVAC models are developed with the Modelica language. The complete model is obtained by submodels assembling in the Dymola environment thanks to the import of the envelope model as FMU component. The comparison with an experimental sequence shows the relevance of such a method for the prediction of performance indicators.

KEYWORDS : Interoperability, Modelica, HVAC systems

1. INTRODUCTION

Pour les bâtiments récents disposant d'enveloppes performantes, les consommations énergétiques et conditions de confort réelles sont fortement liées au fonctionnement des équipements CVC et à leurs modes de régulation. Certains écarts entre la consommation prévue et mesurée, aussi appelés « performance gap » (IEA 2008; Bonte 2014), peuvent s'expliquer par la conception de l'enveloppe mais aussi par la contre-performance des équipements dont les caractéristiques sont évaluées indépendamment du bâti. Cela justifie l'intérêt pour les industriels CVC de travailler sur le système complet afin de mieux valoriser les performances de leurs produits.

Une réponse adaptée passe par la convergence d'outils spécialisés en faisant appel à des méthodes d'interopérabilité qui permettent de modéliser le système complet par assemblage de sous-modèles. La capacité d'interopérer des outils devient donc un critère de choix (Gaaloul 2012). Les sous-modèles peuvent être développés par des corps de métiers différents. Il est donc intéressant de les coupler pour garder leurs points forts respectifs et bénéficier de l'expertise d'un modèle qui peut être déjà fait et validé dans un environnement donné. Lorsque les modèles sont indissociables de leurs solveurs il faut que l'interopérabilité se fasse entre ces derniers, on parle de « cosimulation ». Dans le cas contraire il est souvent plus simple que l'interopérabilité se fasse au niveau des processus de modèles au sein d'un même environnement de simulation avec un solveur commun, on parle alors d'« échange de modèles ». Cette approche d'interopérabilité nécessite la capitalisation et la diffusion des modèles au travers de plateformes collaboratives (Wurtz et al. 2012; Tittlein et al. 2010) ou via des bibliothèques mises à disposition et enrichies par la communauté dans les outils de programmation orientée objet (OOP). Le besoin d'interopérabilité a également conduit au développement du standard FMI (Functional Mock-up Interface) qui définit une norme pour interfacer les modèles issus de différents logiciels (MODELISAR consortium and Modelica Association Project 2014).

Il s'agit donc dans ces travaux de mettre en œuvre une méthode d'interopérabilité afin de calculer des indicateurs de performance pour un bâtiment expérimental comprenant trois systèmes énergétiques (plancher chauffant, ventilo-convecteurs, centrale de traitement d'air double flux). Les modèles des systèmes et de l'enveloppe sont créés séparément puis assemblés dans un même environnement pour former le système complet. Une campagne expérimentale doit permettre de vérifier la fiabilité du modèle ainsi obtenu pour l'estimation d'indicateurs de performance.

2. METHODOLOGIE

Le bâtiment démonstrateur est modélisé par assemblage des sous-modèles le composant (Figure 1). Les modèles des systèmes et celui de l'enveloppe sont réalisés dans des outils distincts et validés de façon indépendante comme s'ils avaient été créés par des entités différentes. D'une part, l'enveloppe est modélisée grâce à l'analogie électrique dans l'environnement Matlab. Les paramètres de résistances et de capacités sont identifiés à l'aide d'une campagne expérimentale. D'autre part, les modèles correspondant aux systèmes énergétiques sont réalisés en langage Modelica et sont également validés avec une campagne expérimentale spécifique à chacun d'eux.

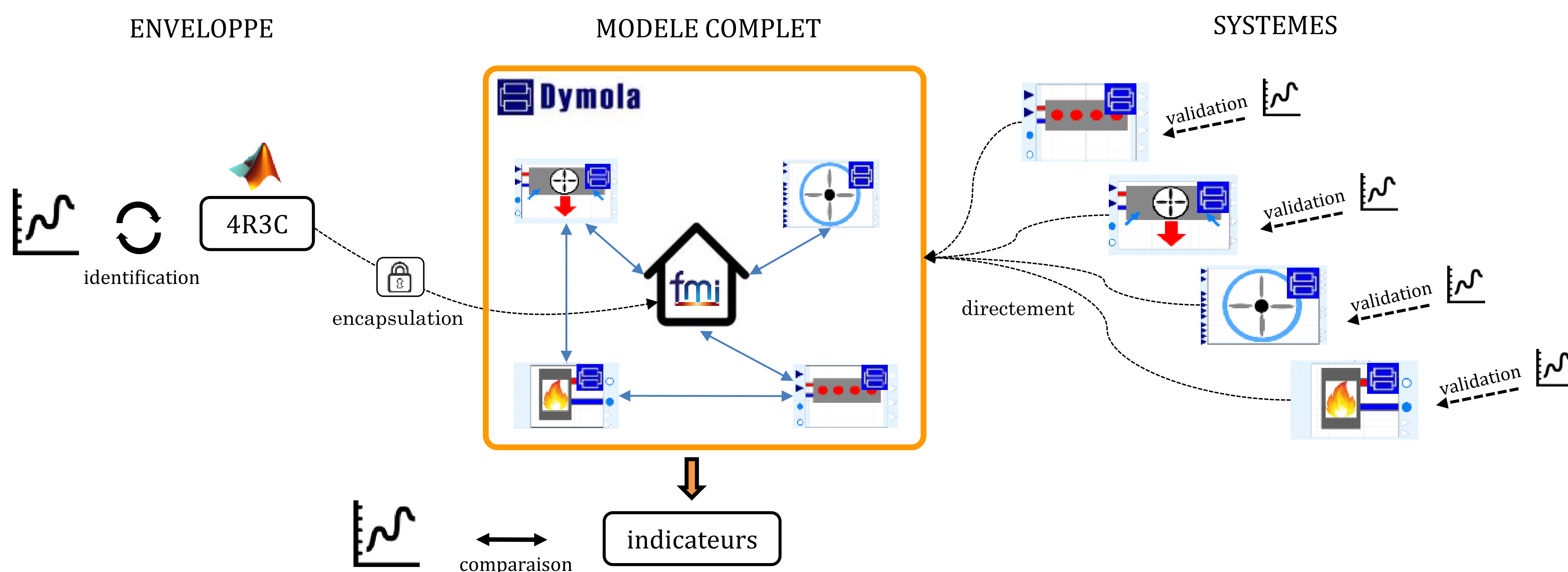


Figure 1 : Présentation schématique de la démarche employée.

Le système complet (enveloppe et systèmes) est assemblé par échange de modèles en utilisant le solveur du logiciel commercial Dymola basé sur le langage Modelica. Ainsi les modèles de systèmes sont directement intégrables alors que le modèle d'enveloppe doit être manipulé pour pouvoir interopérer avec les modèles de systèmes. Une des facettes du standard FMI, appelée « FMI for Model Exchange », permet d'exporter un modèle issu d'un environnement pour qu'il puisse être importé et simulé avec le solveur d'un autre environnement. Seul le modèle est encapsulé et présente des interfaces pour communiquer avec le solveur de destination (conditions initiales, états, entrées, variables). Le modèle standardisé ainsi généré est appelé FMU (Functional Mock-up Unit) et consiste en un fichier compressé (.fmu) qui contient un fichier XML avec les informations du modèle (nom des variables, attributs, pas de temps, unités...) et un fichier exécutable (.ddl) contenant les équations du modèle. Ainsi grâce à ce standard il est possible d'encapsuler le modèle d'enveloppe sous forme de composant FMU et de l'intégrer dans l'environnement Dymola.

3. SALLE EXPERIMENTALE SYNERGI

3.1. ENVELOPPE ET SYSTEMES

La salle expérimentale SYNERGI (Systèmes éNERGétiques Innovants) est orientée ouest et est conforme à la réglementation thermique 2005. Il s'agit d'une salle de conférence en contact avec l'extérieur par une grande façade vitrée avec bardage métallique à l'ouest et par un mur pignon non vitré isolé par l'intérieur au sud. Le plancher haut en contact avec la toiture est constitué d'un faux plafond. La paroi orientée à l'est est en contact avec un local non chauffé et la paroi nord avec un bureau adjacent chauffé. Des brises soleil fixes limitent les apports solaires en été sur la façade ouest.

Trois systèmes énergétiques sont utilisés pour la salle (Figure 2) ainsi qu'une chaudière :

- un **plancher chauffant** est régulé en température par l'ouverture d'une vanne-trois-voies qui assure le mélange entre l'eau chaude provenant de la chaudière et l'eau de retour du plancher. Le débit d'eau est constant à $2 \text{ m}^3/\text{h}$,
- des **ventilo-convecteurs (VCV)** sont installés au plafond (trois unités). La température d'eau en entrée de la batterie chaude est constante et la régulation en puissance se fait par variation de la vitesse de soufflage. La même chaudière que le plancher alimente les VCV,
- une **centrale de traitement d'air double flux (CTA)** dont l'efficacité mesurée est de 70% assure le renouvellement d'air. Elle est asservie à une sonde de CO_2 et le débit nominal est de $1080 \text{ m}^3/\text{h}$.

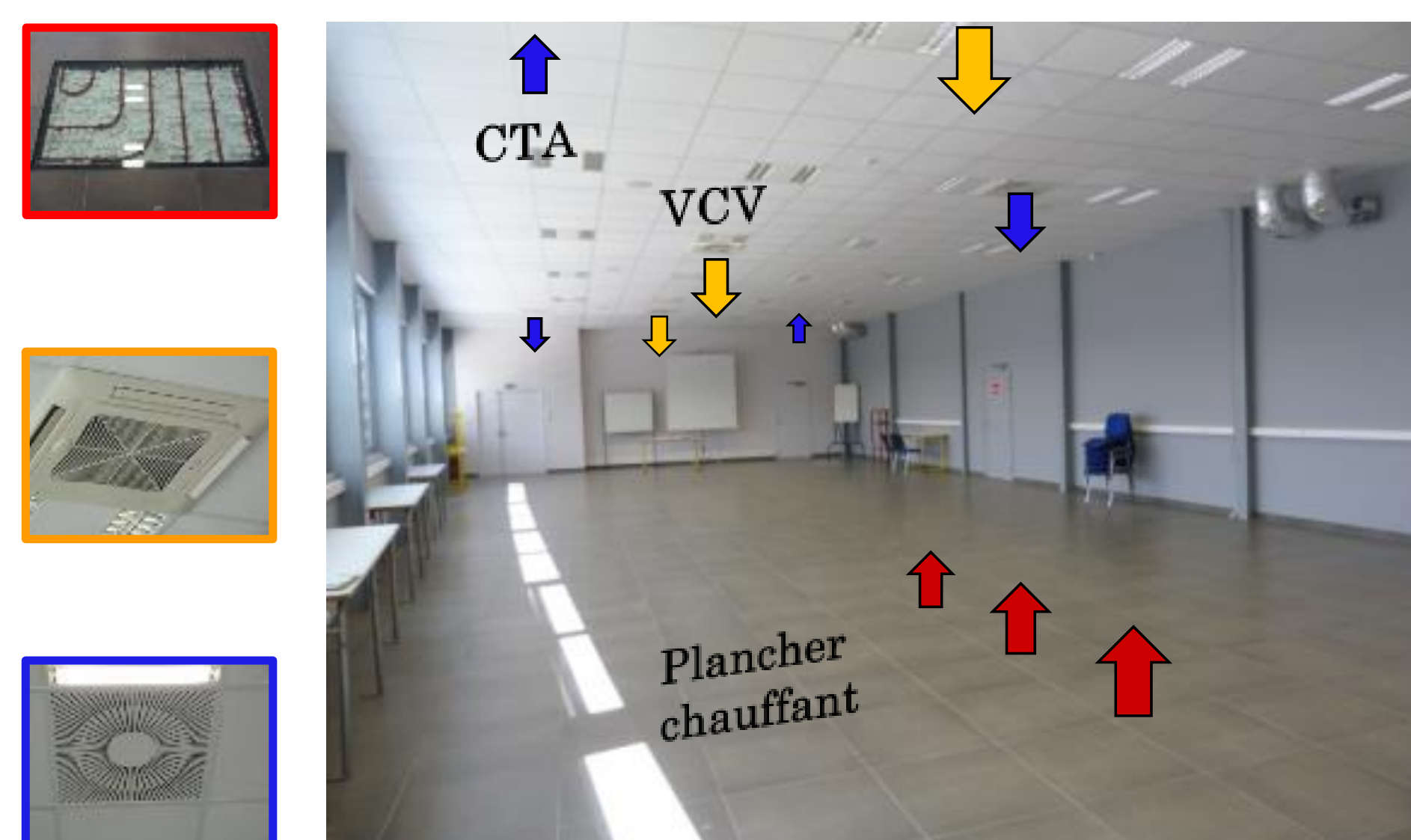


Figure 2 : Vue de la salle de conférence et des systèmes en présence.

3.2. LOGIQUES DE REGULATION

La plateforme SYNERGI fait partie d'un bâtiment d'enseignement de l'IUT Génie Civil Construction Durable de Bordeaux et est donc occupée par des étudiants et des enseignants pendant l'année scolaire. Pour piloter la salle de conférence au quotidien, une stratégie possible est d'utiliser le plancher chauffant comme système de chauffage de base et les VCV comme système d'appoint. La CTA fonctionne selon l'occupation. Les logiques de régulation sont les suivantes :

- **plancher chauffant** : une loi d'eau (1) est réglée de façon à assurer en permanence une température de base qui correspond au réduit nocturne et fixée aux alentours de 16°C. La température de départ (T_{dp}) est ajustée par action sur la vanne-trois-voies montée en mélange et pilotée par un PID auto-adaptatif.

$$T_{dp} = -0,21 * T_{ext} + 19 \quad (1)$$

- **VCV** : ils jouent le rôle de système d'appoint en période d'occupation avec une température de consigne de 20°C ($T_{confort,min}$). Une vanne-trois-voies assure l'alimentation en eau de la batterie chaude $\dot{m}_{vcv,eau}$ (2) avec une température de consigne de 35°C quand il y a occupation. Les périodes d'occupation sont définies par un planning via l'interface de gestion et la salle est considérée occupée en semaine de 8h à 12h et de 13h30 à 18h. Le suivi de consigne se fait par action sur la vitesse de soufflage $\dot{m}_{vcv,air}$ (3) des VCV en fonction de l'écart à la consigne.

$$\dot{m}_{vcv,eau} \begin{cases} inoccupé: 0 \\ occupé: \dot{m}_{vcv,eau,max} \end{cases} \quad (2)$$

$$\dot{m}_{vcv,air} \begin{cases} T_{confort,min} - 0,5°C \leq T_i \leq T_{confort,min} + 0,5°C & petite.vitesse \\ T_{confort,min} - 1°C \leq T_i \leq T_{confort,min} - 0,5°C & moyenne.vitesse \\ T_i \leq T_{confort,min} - 1°C & grandevitesse \end{cases} \quad (3)$$

- **CTA** : l'ouverture des volets (\dot{m}_{cta}) est asservie à la mesure du taux de CO₂ (4) et se fait avec un seuil de déclenchement fixé à 600ppm. En dessous de cette valeur seuil, la salle de conférence est considérée comme inoccupée et le volet reste à son ouverture minimale correspondant à 20% du débit nominal ($\dot{m}_{cta,max}$).

$$\dot{m}_{cta} \begin{cases} CO_2 > 600 ppm: \dot{m}_{cta,max} \\ CO_2 \leq 600 ppm: 0,2 * \dot{m}_{cta,max} \end{cases} \quad (4)$$

- **Chaudière** : elle alimente le plancher chauffant et les VCV. Elle possède sa propre régulation de façon à assurer une température de départ de consigne à la chaudière ($T_{dc,c}$) avec une hystérésis de 10°C (5).

$$\begin{cases} T_{dc,c} = 50°C \\ T_{dc} > T_{dc,c} + 5°C & combustion.OFF \\ T_{dc} < T_{dc,c} + 5°C & combustion.ON \end{cases} \quad (5)$$

3.3. MODELISATION

3.3.1. Enveloppe

L'enveloppe est décrite par un modèle d'ordre faible utilisant l'analogie électrique et comprenant quatre termes de résistance et trois termes de capacité (Figure 3). Il est mis sous forme de modèle d'état et ses paramètres sont identifiés à partir de données mesurées in-situ grâce à un algorithme d'optimisation Matlab comme décrit dans un précédent papier (Viot et al. 2015). Le modèle ainsi identifié (Tableau 1) décrit bien l'évolution en température de la pièce dans des conditions normales de fonctionnement avec une erreur moyenne de $0,7^{\circ}\text{C}$ (Figure 4) constatée sur une période d'un mois.

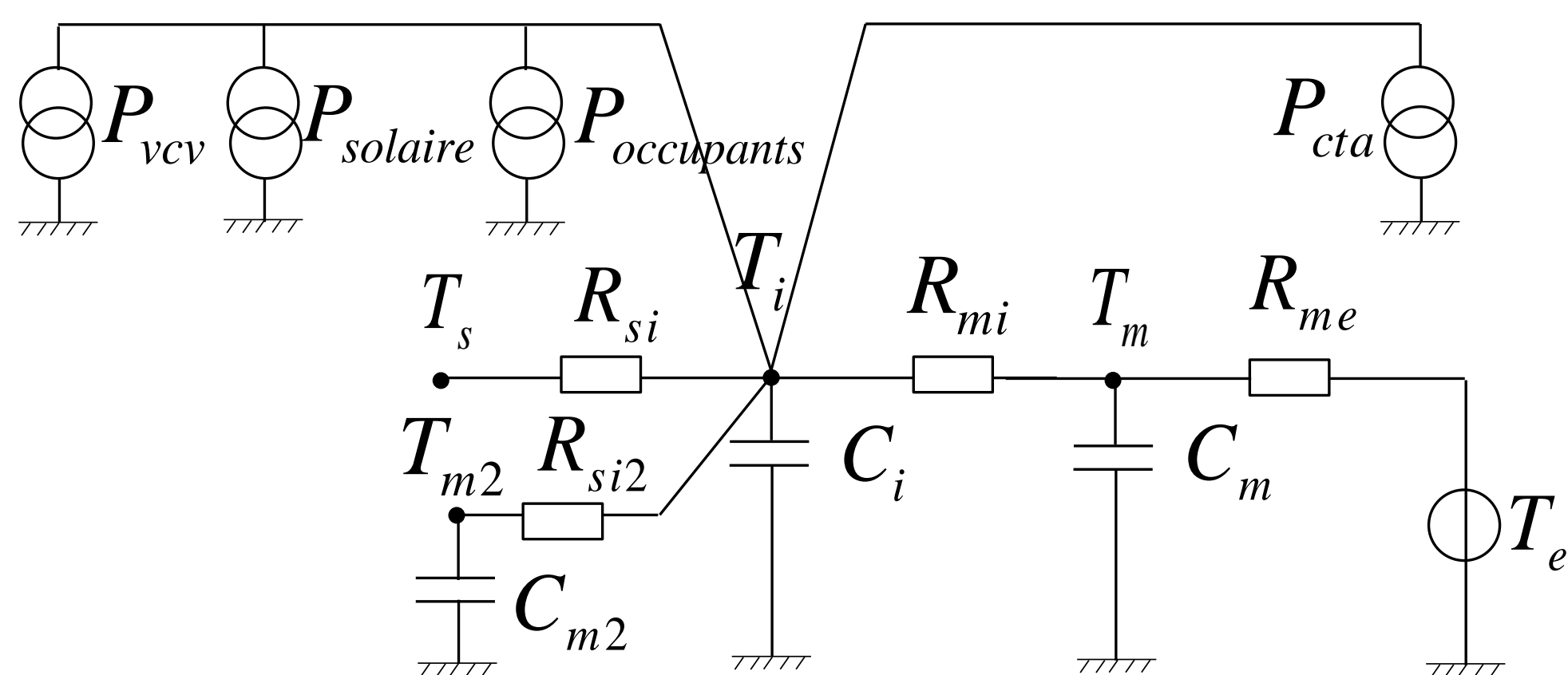


Figure 3 : Modèle 4R3C.

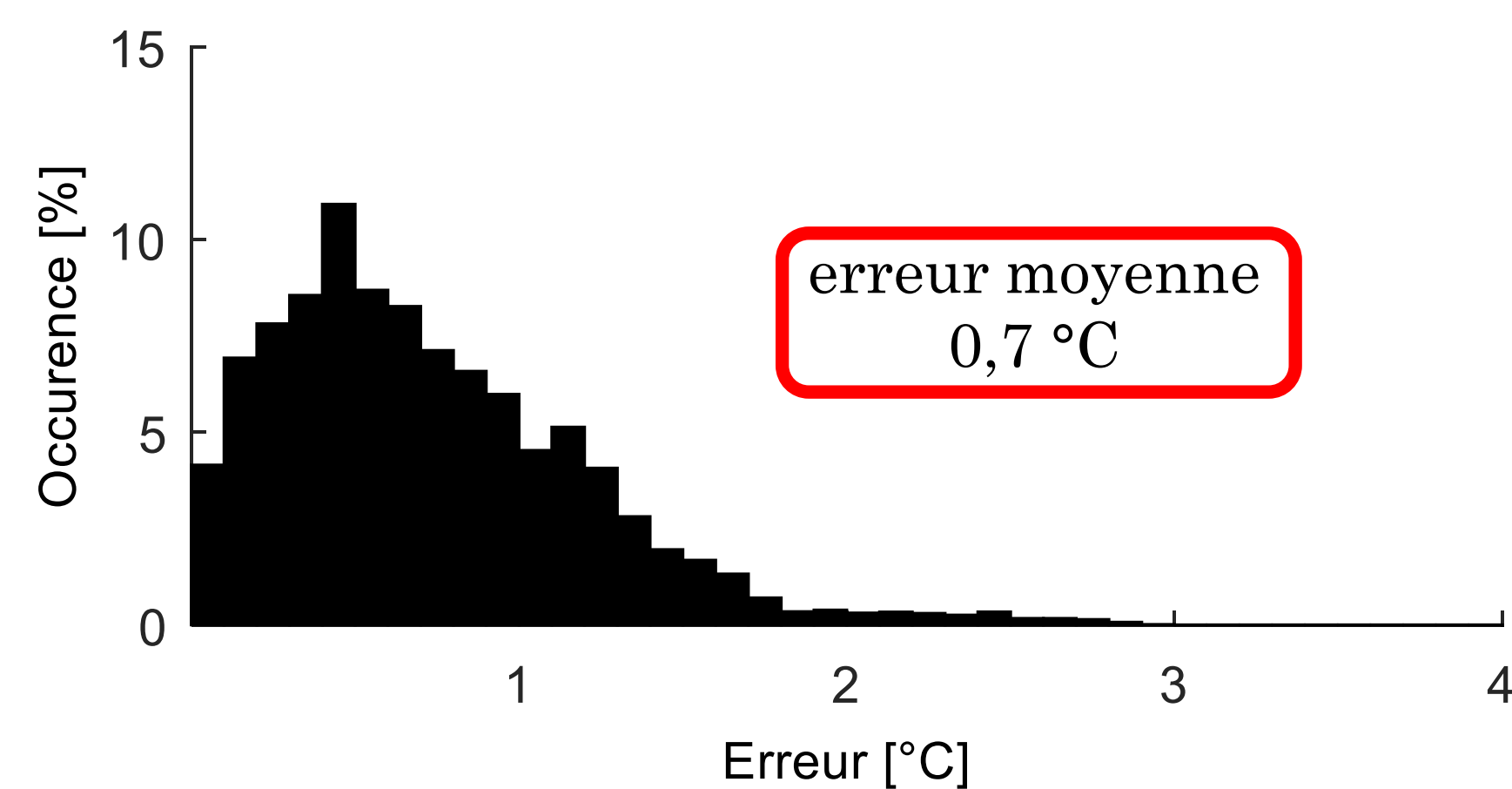


Figure 4 : Répartition des erreurs modèle/mesure.

paramètres	C_i	C_m	C_{m2}	R_{mi}	R_{me}	R_{si}	R_{si2}
unité		[J/K]			[m ² .K/W]		
valeur	1,5E+7	1E+8	7,2E+6	2,3	0,01	0,06	0,14

Tableau 1 : Valeurs des paramètres de résistances et de capacités du modèle 4R3C.

3.3.2. Systèmes énergétiques

Les systèmes énergétiques sont modélisés à l'aide du langage Modelica. C'est un langage libre orienté objet et équationnel utilisant des relations acausales. Les modèles Modelica (extension .mo) sont de simples fichiers texte. Ce langage est utilisé par des logiciels libres (OpenModelica, JModelica) ou commerciaux tel que Dymola (DYnamic MOdelling LABORatory) développé par Dassault Systèmes. Les développements orientés ingénierie du bâtiment sont récents, mais plusieurs bibliothèques ont émergé dans ce sens. La librairie « *Buildings* » (Wetter et al. 2011) développée en 2007 par le Lawrence Berkeley National Laboratory (USA) est l'une des plus abouties. Elle contient plusieurs packages permettant de modéliser les flux d'air (*Airflow*), les conditions limites (*Boundary*), le contrôle pour le suivi d'une consigne (*Control*), les fluides pour les systèmes utilisant le vecteur air ou eau (*Fluid*) ainsi que les transferts de chaleur dans les parois (*HeatTransfer*). Cette librairie est utilisée en complément de la librairie de base « *Modelica Standard Library* » :

- le plancher chauffant est décrit par un composant dédié de la librairie « *Buildings* » qui permet de renseigner les couches de matériaux et leurs épaisseurs. Ce modèle a pour entrées la température de consigne issue de la loi d'eau, la température de la pièce et celle de l'eau chaude provenant de la chaudière. Le modèle permet de connaître l'évolution de la température de surface et la puissance délivrée par le plancher et la pompe au secondaire,
- le modèle VCV présente une partie hydraulique et aéraulique. La température d'entrée dans la batterie chaude est imposée et régulée par une vanne-trois-voies. L'échange de chaleur avec l'air se fait avec un coefficient d'échange dont la valeur dépend du mode de

- vitesse. Ce modèle prend en entrée la température d'air de consigne et la température d'air issue du modèle d'enveloppe. Il permet de calculer la température de soufflage, la puissance délivrée et également celle de la pompe au secondaire,
- le réseau aéraulique complet de la CTA est modélisé bien que seule la salle de conférence soit étudiée. A partir de données d'occupation (CO_2 ou présence), le modèle simule le débit nécessaire pour chaque pièce du bâtiment, la température de l'air pour chaque branche du réseau, la puissance délivrée à la pièce (négative) et la consommation électrique des ventilateurs,
 - la chaudière est modélisée avec le modèle *BoilerPolynomial*, il permet de connaître l'appel de puissance total (plancher chauffant et unités VCV) et la consommation de la pompe au circuit primaire.

Un travail de calibration est mené à partir d'une campagne de validation idoine à chaque système. Les modèles ainsi obtenus offrent de très bons résultats en termes de profil d'appel de puissance (Figure 5).

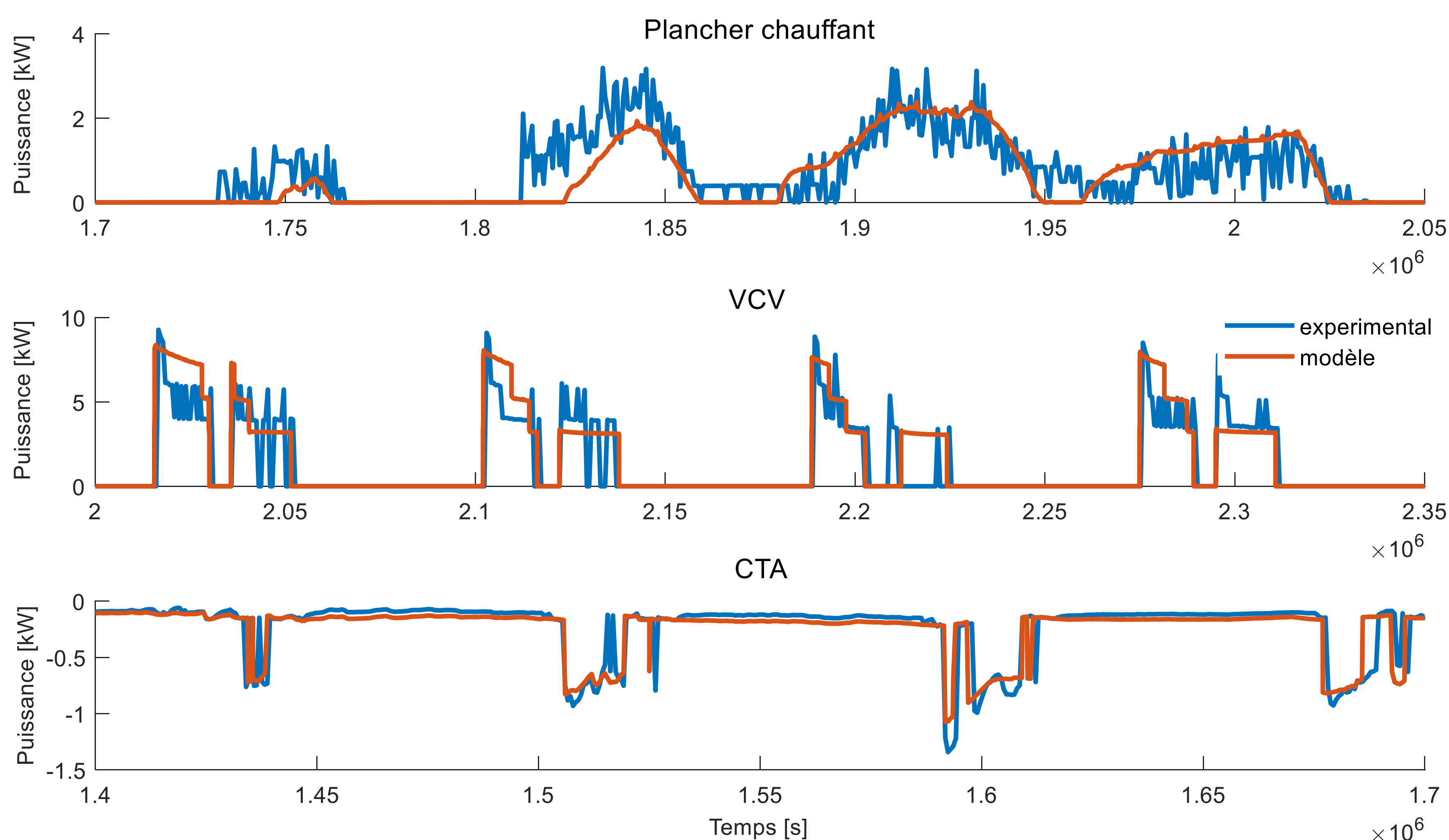


Figure 5 : Validation des modèles de systèmes à partir de données expérimentales.

4. INTEROPERABILITE DES MODELES ET INDICATEURS DE PERFORMANCE

Il existe de nombreuses voies d'interopérabilité selon les outils et les objectifs souhaités. Le couplage peut se faire de façon ad hoc, par exemple un modèle de maison passive EnergyPlus peut être intégré dans l'environnement Simulink pour optimiser le contrôle d'un plancher chauffant et le stockage d'eau chaude dans un ballon (Candanedo and Athienitis 2011). Cependant, l'utilisation du standard FMI devient courante dans la littérature scientifique. Un composant FMU peut par exemple être importé dans EnergyPlus (Nouidui et al. 2013) pour coupler un système de ventilation ou de chauffage avec l'enveloppe. Une modélisation des consommations d'énergie à l'échelle d'un quartier est réalisée dans l'environnement Dymola où chaque sous-modèle (bâtiments, comportement des occupants, systèmes de chauffage et de ventilation) est encapsulé sous forme de composant FMU

(Galtier et al. 2017). De plus, un package Python appelé PyFMI a récemment été développé pour faciliter l'utilisation et l'orchestration de composants FMU (Bueno et al. 2017).

Pour le cas d'étude présenté, le modèle d'enveloppe est importé dans l'environnement Dymola en utilisant le standard FMI for Model Exchange. Seul le modèle est importé et le solveur de Dymola (DASSL) est commun à l'ensemble des modèles. Le modèle complet est présenté à la Figure 6 où sont mentionné les données d'entrées, les données échangées entre modèles et les indicateurs de performance en sortie.

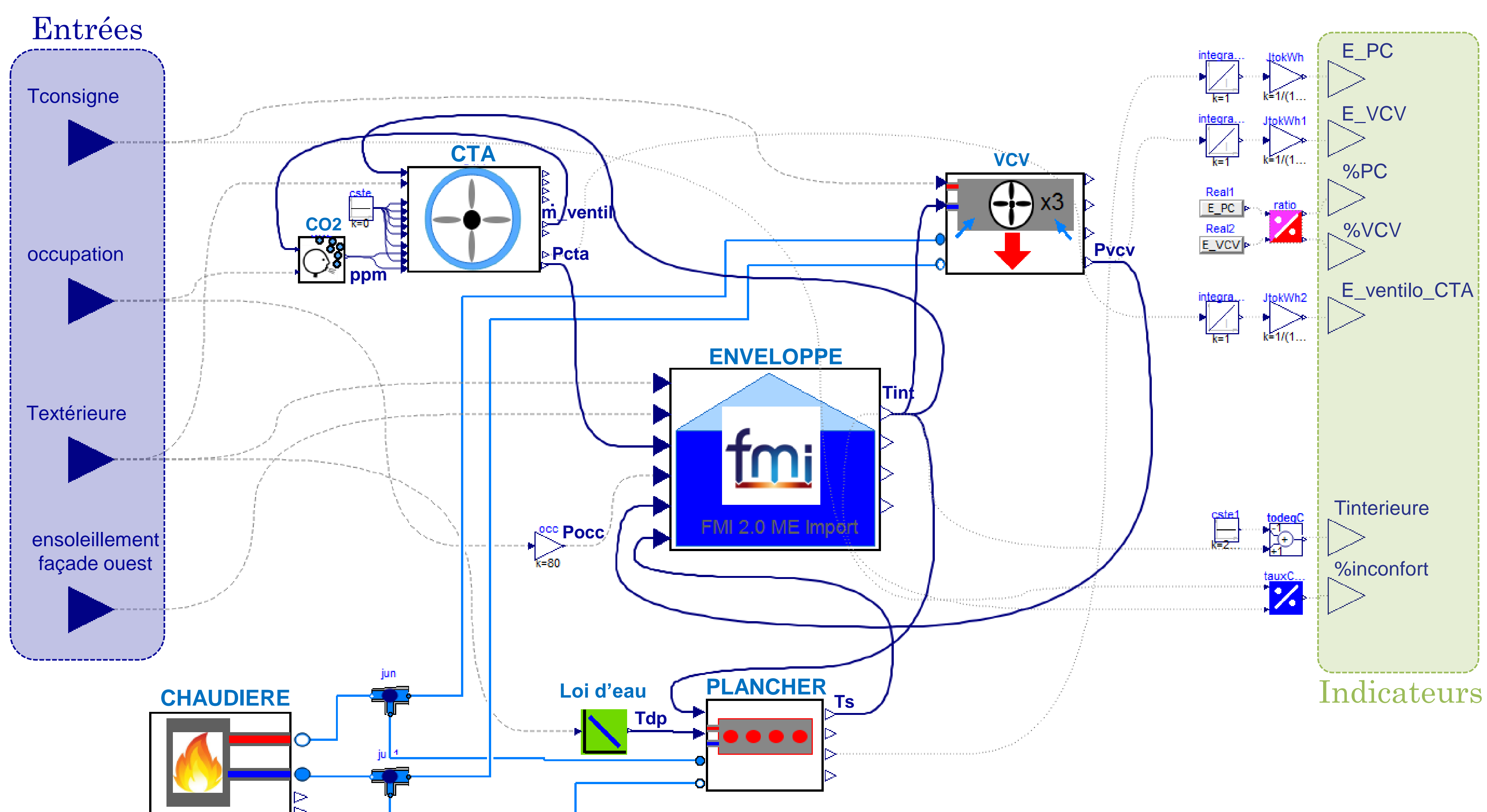


Figure 6 : Modèle complet assemblé dans l'environnement Dymola.

Ces indicateurs de performance ont été mesurés lors d'une campagne d'un mois dans les conditions de fonctionnement décrite à la section 3.2. Les données correspondantes sont imposées en entrée du modèle complet afin d'obtenir la valeur simulée de ces même indicateurs. Les résultats sont présentés dans le Tableau 2.

indicateur	description	expérimental	simulation	erreur
E_{pc}	énergie consommée par le plancher chauffant	160 kWh	140 kWh	12,5%
E_{vcv}	énergie consommée par les VCV	688 kWh	644 kWh	6,5%
$E_{ventilo_cta}$	énergie consommée par les ventilateurs de la CTA	132 kWh	126 kWh	4,5%
$\%_{pc}$	ratio d'utilisation du plancher chauffant	19%	18%	-1%
$\%_{vcv}$	ratio d'utilisation des VCV	81%	82%	+1%
$\%_{inconfort}$	taux d'inconfort en occupation (19-23°C)	14%	19%	+5%

Tableau 2 : Indicateurs de performance mesurés et simulés sur une campagne de mesure d'un mois.

L'erreur maximale observée sur la prédiction des consommations énergétiques n'est que de 12,5% (plancher chauffant) et la répartition des consommations entre les deux systèmes de chauffage est conservée. Même s'il est encore possible d'améliorer le modèle complet (erreur sur le taux d'inconfort), la bonne qualité de prédiction constatée du modèle complet est permise par le simple assemblage des sous-modèles bénéficiant d'un haut niveau de confiance au moyen d'une solution

d'interopérabilité. De plus, la liberté de création des modèles permet une description au plus près du système réel tel que l'asservissement de la ventilation en fonction du taux de CO₂ dans le cas présenté.

5. CONCLUSION

Les méthodes d'interopérabilité mises en œuvre dans la littérature scientifique montrent qu'il y a de multiples possibilités de couplage. Malgré ces nombreuses possibilités, ces développements scientifiques sont aujourd'hui peu appliqués par les professionnels du secteur. Pourtant l'interopérabilité des modèles présente de multiples intérêts que ce soit à l'échelle des développements de systèmes énergétiques pour les industriels ou à l'échelle de la conception globale de bâtiments en assistance à maîtrise d'ouvrage/d'œuvre. Elle permet de faire l'économie du temps de transposition du modèle d'un langage à un autre tout en capitalisant son degré de fiabilité.

6. BIBLIOGRAPHIE

- Bonte, Mathieu. 2014. "Influence Du Comportement de L'occupant Sur La Performance Énergétique Du Bâtiment - Modélisation Par Intelligence Artificielle et Mesures in Situ." *Thèse*.
- Bueno, Bruno, Michael Street, Thibault Pflug, and Cosima Braesch. 2017. "A Co-Simulation Modelling Approach for the Assessment of a Ventilated Double-Skin Complex Fenestration System Coupled with a Compact Fan-Coil Unit." *Energy & Buildings* 151. Elsevier B.V.: 18–27. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.04.029>.
- Candanedo, J.A., and Andreas Athienitis. 2011. "Predictive Control of Radiant Floor Heating and Solar-Source Heat Pump Operation in a Solar House." *HVAC&R Research* 17 (3): 235–56. <https://doi.org/10.1080/10789669.2011.568319>.
- Gaaloul, Sana. 2012. "Interopérabilité Basée Sur Les Standards Modelica et Composant Logiciel Pour La Simulation Énergétique Des Systèmes de Bâtiment." *Thèse*.
- Galtier, Virginie, Michel Ianotto, Mathieu Caujolle, Rémi Corniglion, José Évora, Gómez José, Juan Hernández, Cabrera Vincent, and Reinbold Enrique. 2017. "Experimenting with Matryoshka Co-Simulation : Building Parallel and Hierarchical FMUs." In *Proceedings of the 12th International Modelica Conference May*, 663–71. <https://doi.org/10.3384/ecp17132663>.
- IEA. 2008. "Energy in Buildings and Communities Programme, Annex 53: Total Energy Use in Buildings: Analysis & Evaluation Methods." <http://www.iea-ebc.org/projects/completed-projects/ebc-annex-53/>.
- MODELISAR consortium and Modelica Association Project. 2014. "Functional Mock-up Interface for Model Exchange and Co-Simulation."
- Nouidui, Thierry Stephane, Michael Wetter, Wangda Zuo, and Lawrence Berkeley. 2013. "Funtional Mock-Up Unit Import in EnergyPlus for Co-Simulation." In *Proceedings of BS2013*, 3275–82.
- Tittlein, Pierre, Peter Riederer, Mickael Albaric, and Elena Palomo Del Barrio. 2010. "DYNASIMUL : Projet ANR-06-PBAT-004-01 Rapport Scientifique Final."
- Viot, Hugo, Alain Sempey, Laurent Mora, and Jean Christophe Batsale. 2015. "Fast on-Site Measurement Campaigns and Simple Building Models Identification for Heating Control." *Energy Procedia*, 812–17. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.107>.
- Wetter, Michael, Wangda Zuo, and Thierry Stephane Nouidui. 2011. "Modeling of Heat Transfer in Rooms in the Modelica 'buildings' library." In *Proceedings of Building Simulation 2011*.
- Wurtz, F, B Delinchant, L Estrabaut, and F Pourroy. 2012. "Vers de Nouvelles Approches Théoriques et Pratiques Pour La Capitalisation Des Connaissances et La Mise En Réseau Des Compétences Autour Des Modèles Numériques Pour Le Bâtiment : L'approche DIMOCODE." In *Proceedings of the XXXe Rencontres AUGC-IBPSA*.

Modélisation des défauts d'usage d'une pompe à chaleur sous forme de réseau de Pétri.

Toan VO MINH^{*1,2}, Christophe BARRAS², Charles PELE², Emmanuel BOZONNET¹

¹ LaSIE UMR CNRS 7356, Université de la Rochelle
17042 la Rochelle, Cedex 1 – France

² Centre scientifique et technique du bâtiment
77420 Champs-sur-Marne, Cedex 2 – France

*toan.vominh@cstb.fr

RESUME. Les pompes à chaleur (PAC) sont fréquemment utilisées dans le conditionnement des ambiances des bâtiments résidentiels en France. Cependant, leurs performances réelles sont différentes de leurs performances théoriques. Plusieurs facteurs vont impacter leurs performances. Dans cet article, nous analyserons en particulier les défauts d'usage. Afin d'intégrer dans les outils de calculs l'ensemble des défauts et leurs interdépendances, le système est modélisé avec son fonctionnement réel sous la forme d'un réseau de Pétri (RdP). Grâce à cet outil, il est possible d'étudier l'influence des défauts sur le fonctionnement d'un système.

MOTS-CLÉS. Modélisation des défauts, réseau de Pétri, pompe à chaleur.

ABSTRACT. Heat pumps (HP) are frequently used in the residential buildings in France. However, their actual performance is different from their theoretical ones. Several factors will impact their performance. In this article, we will analyze the operational faults. In order to integrate all the faults and their interdependencies into the calculation tools, the system is modeled with its actual operation in the form of a Petri net (PN). This allows studying the influence of faults on the system operation.

KEYWORDS. Fault modelling, Petri net, heat pump.

NOMENCLATURE

Symboles

A	Surface	$[m^2]$
BP	Basse pression	$[Pa]$
HP	Haute pression	$[Pa]$
I	Intensité	$[A]$
Q	Débit	$[m^3/s]$
T	Temperature	$[K]$
V	Volume	$[m^3]$

Indice

b	Bouteille anti-coups de liquide
c	L'état consigne
l	L'état liquid
m	L'état maintenance
m_l	Niveau de la maintenance
R	Fluide frigorigene

1 INTRODUCTION

La sûreté de fonctionnement (SdF) est considérée comme la science des défaillances et des pannes. Elle constitue un ensemble de méthodes et de concepts pour la maîtrise des risques. Avant de modéliser

le système avec ses défauts, une étude de SdF doit être réalisée en passant par deux volets complémentaires (Schneider, 2004) : une analyse fonctionnelle qui va caractériser les fonctions du système dans toutes les phases de son cycle de vie, et une analyse dysfonctionnelle qui déterminera l'ensemble des défaillances pouvant survenir n'importe où dans le système qu'elles soient seules ou combinées entre elles tout en analysant l'impact de ces pannes. Les résultats de ces deux études sont mis en commun lors de la modélisation du système.

Afin de modéliser le système, on utilise des méthodes statiques (AMDEC, diagramme de fiabilité, arbres de défaillance, etc.) ou des méthodes dynamiques (les réseaux Bayésiens, les chaînes de Markov ou les réseaux de Pétri) (Noyes et Pérès, 2007). Une méthode statique consiste en une analyse qualitative des risques. Celle-ci est une estimation statistique qui ne peut pas rendre compte de tous les changements d'état d'un système au cours du temps. Quant à elles, les méthodes stochastiques dynamiques permettent de prendre en compte les spécificités des systèmes dynamiques.

Tout d'abord, le réseau Bayésien est un graphe acyclique qui ne permet pas de modéliser un système général. Cette méthode n'a pas été étudiée. D'une part, l'intégration de variables continues est impossible. D'autre part, la modélisation de systèmes complexes est très difficile (Pourret et al., 2008). C'est pourquoi, les chaînes de Markov et les réseaux de Pétri qui sont des graphes cycliques ont été étudiés.

Une chaîne de Markov utilise une matrice de transition pour fonctionner. Chaque cellule de la matrice indique la probabilité à chaque état fini de passer vers un autre état fini. Cette méthode trouve rapidement ses limites à cause de l'explosion rapide du nombre d'états (Seng et Barras, 2014). Cela signifie que le nombre de cellules augmente quadratiquement dès que des états sont ajoutés. Les chaînes de Markov ne sont donc pas adaptées aux systèmes complexes. Ainsi, les réseaux de Pétri ont montrés plusieurs avantages par rapport aux chaînes de Markov (Ferreira et al., 2018). La représentation graphique décrit le problème de manière intuitive. De plus, les réseaux de Pétri simulent précisément des situations complexes en permettant l'incorporation d'une multitude de règles dans le modèle. Par ailleurs, elles maintiennent la taille du modèle dans des limites raisonnables. Grâce à ses différentes caractéristiques, les réseaux de Pétri ont été choisis pour cette étude.

La pompe à chaleur (PAC) est un système de chauffage/refroidissement qui exploite des énergies renouvelables. D'après la Figure 1, elle utilise 60% d'énergie renouvelable pour chauffer le bâtiment (lors qu'elle fonctionne en mode chauffage). Aussi, on peut le constater que le chauffage par PAC génère une consommation bien inférieure à la plupart des chauffages classiques comme les chaudières à condensation ou solaire, les radiateurs électriques ou encore les panneaux rayonnants, etc. Elle est à 125% de rendement sur l'énergie primaire. Toutefois, les performances réelles des PACs sont différentes des performances théoriques qui sont calculées par simulation dans des conditions idéales de fonctionnement. Ces écarts sont d'approximativement 20% (Figure 2) et peuvent être expliqués en partie par les conditions météorologiques et l'usage réel de la PAC qui sont différents des données adoptées pour la simulation. Dans cet article, les défauts d'usage majeurs de la PAC sont étudiés, qui pourraient impacter la consommation d'énergie et le confort tout au long du cycle de vie du bâtiment.

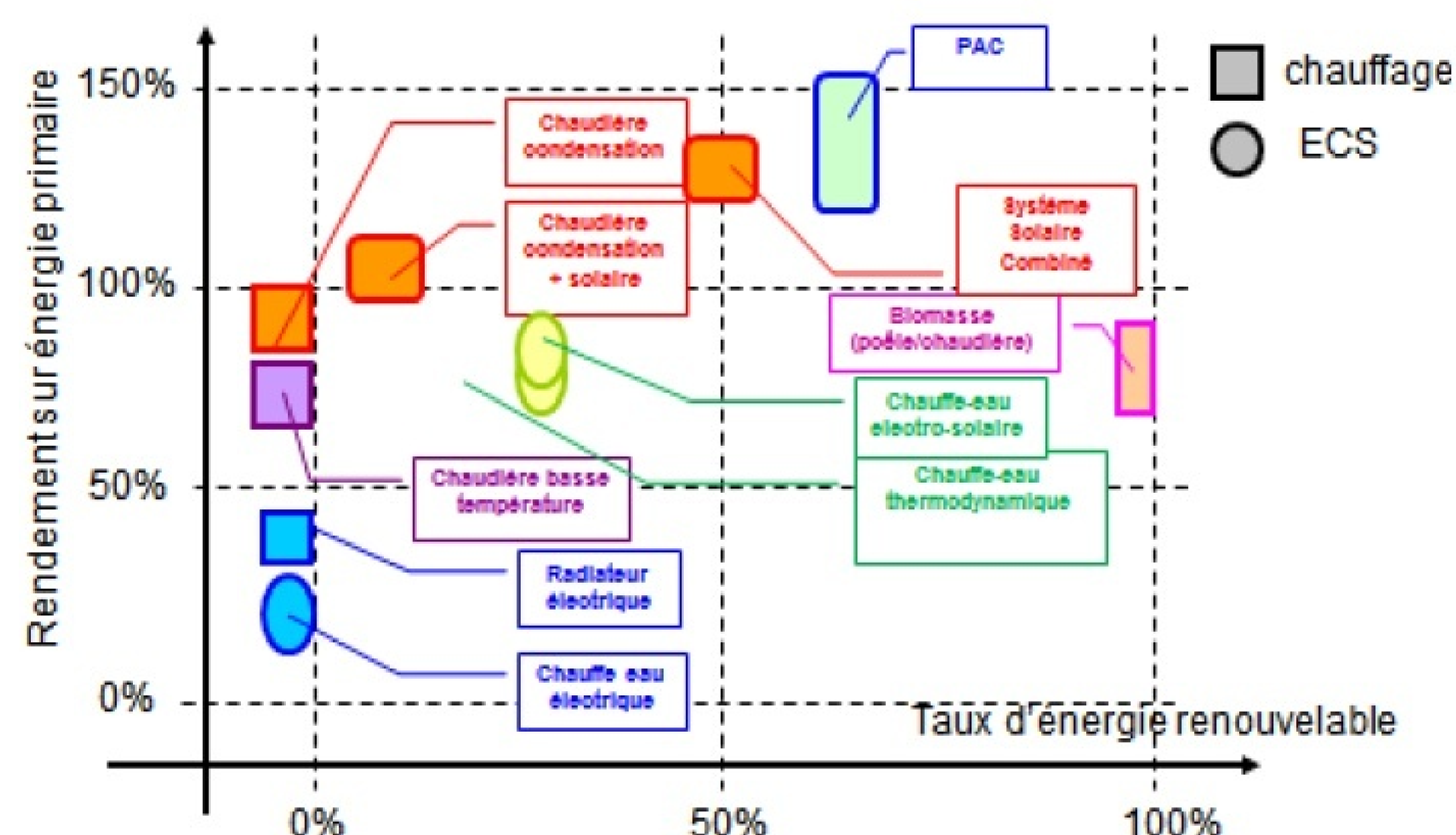


FIGURE 1. Position des performances saisonnières des solutions énergétiques (Ademe, 2014)

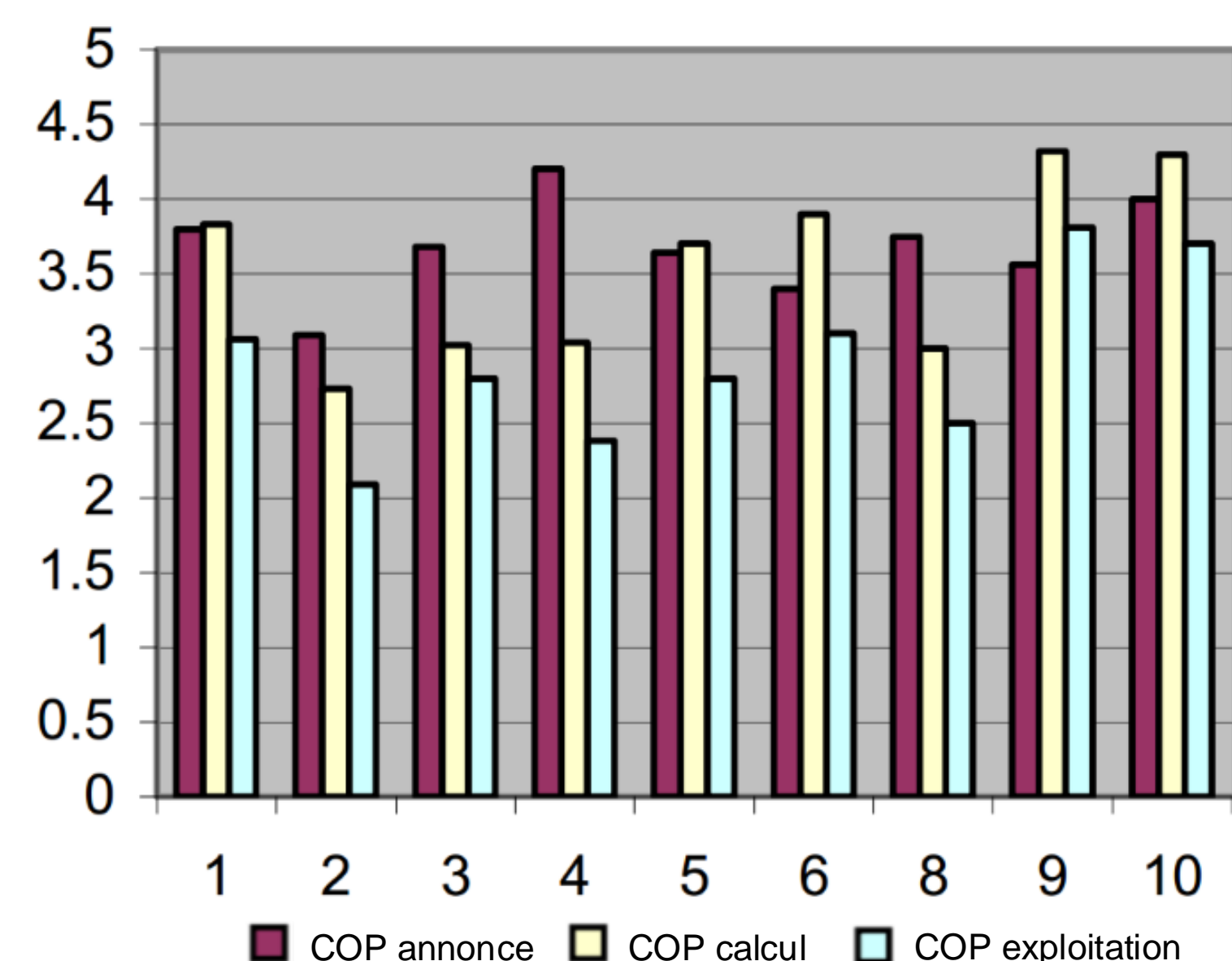


FIGURE 2. Les performances de la PAC (Ademe, 2007)

2 ANALYSE FONCTIONNELLE DU SYSTÈME

Outre les quatre éléments principaux de la PAC que sont l'évaporateur, le compresseur, le condenseur et le détendeur, d'autres composants sont utilisés dans le circuit frigorifique dans le but de permettre le fonctionnement efficace du système. Par exemple, on peut trouver la vanne électromagnétique, la bouteille anti-coups de liquide, le pressostat basse/haute pression, la vanne d'inversion 4 voies, etc. Le fonctionnement de la PAC dans des conditions normales est illustré dans le schéma en Figure 3.

Afin d'analyser le fonctionnement d'une PAC, le diagramme enthalpique (de Mollier) permet de comprendre le cycle frigorifique en suivant l'évolution du fluide au cours de chaque transformation d'un état initial à un état final en déterminant les différentes enthalpies associées. Le diagramme est disponible sur la Figure 4.

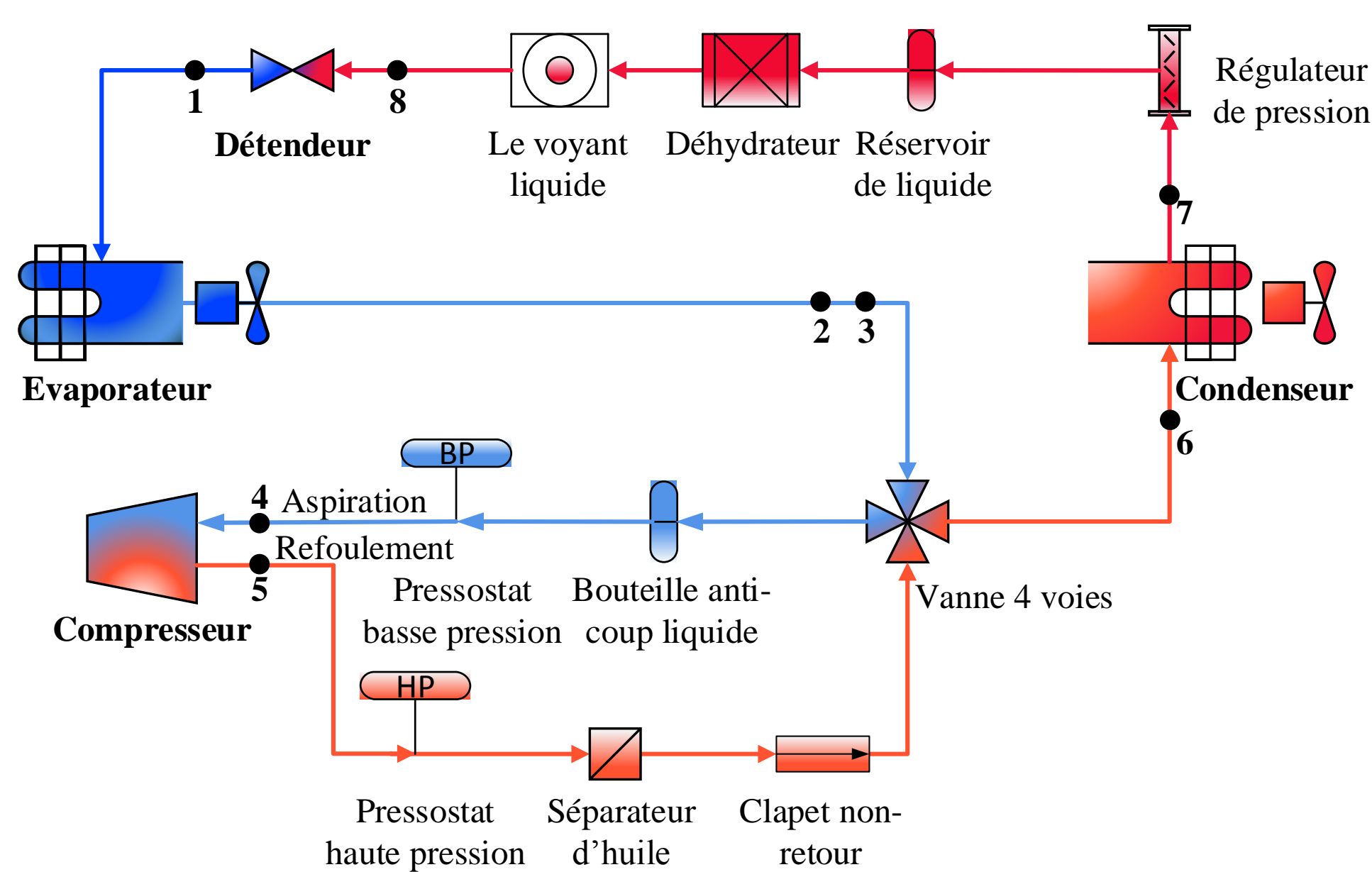


FIGURE 3. Configuration de la pompe à chaleur en mode de chauffage

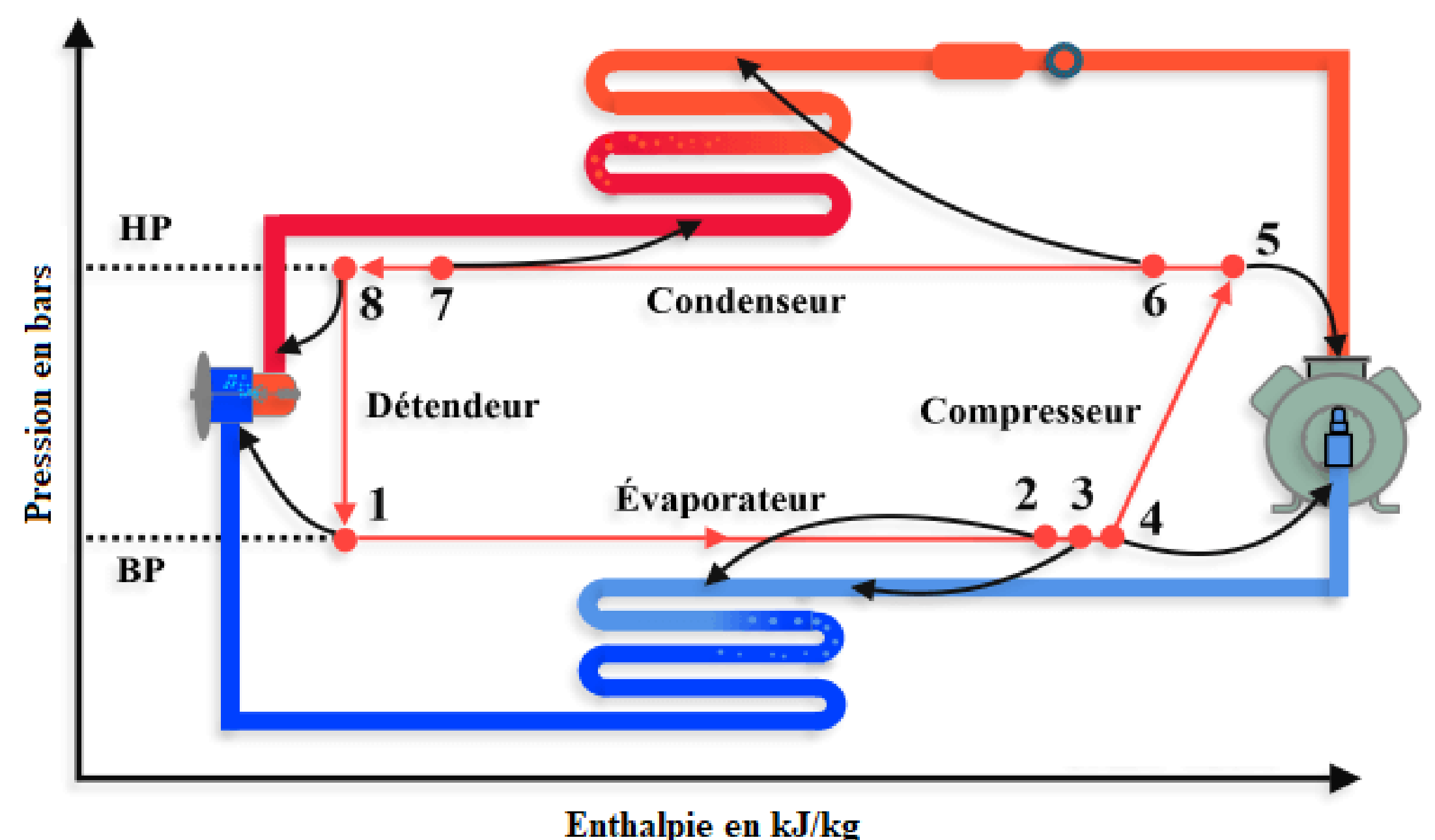


FIGURE 4. Diagramme enthalpique associé à une PAC (Clim, 2017)

2.1 LE FLUIDE FRIGORIGÈNE EN PHASE GAZEUSE

La PAC démarre dès qu'elle est alimentée en énergie. Lorsque la bobine est sollicitée (1), le clapet se soulève et permet l'écoulement du fluide. À l'entrée de l'évaporateur, le fluide frigorigène (FF) est à l'état liquide et à basse température. Au début de l'évaporation, un mélange de phase vapeur et liquide de FF peut être observé, mais la proportion de phase liquide est à ce moment-là majoritaire. Puis, le fluide s'évapore progressivement (1 → 2) tandis que sa température augmente entraînant une surchauffe (2 → 4) pendant la récupération de l'énergie thermique de la source froide (l'air, l'eau ou le sol). Cet échange thermique va permettre d'inverser la proportion de phase vapeur/ phase liquide du FF, pour avoir finalement en sortie d'évaporateur le FF à l'état gazeux qui sera aspiré par le compresseur.

À la sortie de l'évaporateur, le FF à l'état gazeux accède au compresseur par la vanne d'inversion de cycle. Elle permet d'inverser l'écoulement du fluide afin d'obtenir l'effet souhaité, à savoir chauffage ou refroidissement.

Venant de la vanne d'inversion, le FF traverse la bouteille anti-coup de liquide qui devra assurer la re-vaporisation du liquide piégé pour protéger le compresseur d'une éventuelle migration de liquide par la conduite d'aspiration qui causerait des dégâts irréversibles. Autrement dit, il est certain que le fluide est à l'état gazeux avant d'atteindre le compresseur.

Le pressostat base-pression est un organe important du circuit frigorifique. Celui-ci arrêtera le compresseur si la pression du circuit coté base-pression descend en dessous de la valeur de coupure et protégera de cette façon le circuit frigorifique.

Ensuite, le FF à l'état gazeux va entrer dans le compresseur et atteindre la pression souhaitée (4 → 5). Dans le compresseur, des appareils de sécurité jouent un rôle important. Par exemple, la résistance de carter est indispensable pour éviter que le FF migre en trop grande quantité dans le carter, notamment quand les compresseurs sont soumis à des températures plus froides que celle des évaporateurs. Le contrôleur de niveau d'huile vérifie en permanence que la quantité d'huile dans le carter est suffisante, et arrête le compresseur si celle-ci est trop basse. Le pressostat différentiel d'huile arrête également le compresseur si la différence de pression existante entre le circuit de lubrification et

le carter est inférieure à l'écart de pression normal. Le régulateur de capacité permet, en établissant un bypass entre la conduite d'aspiration et de refoulement, d'adapter la puissance du compresseur et la charge variable de l'évaporateur.

Le pressostat haute-pression situé à côté de la conduite de refoulement du compresseur qui permet de protéger l'installation en cas de pression trop élevée. Puis, le FF traverse le séparateur d'huile qui sépare celui-ci de l'huile contenue dans le carter. Ensuite, le FF traverse un clapet anti-retour qui permet de contrôler son sens de circulation. Il permet le passage du FF dans un seul sens et le bloque si le sens de celui-ci venait à s'inverser. Enfin, le FF à l'état gazeux et à haute température accède au condenseur par la vanne d'inversion.

2.2 LE FLUIDE FRIGORIGÈNE EN PHASE LIQUIDE

En passant dans le condenseur, le FF se condense progressivement ($5 \rightarrow 6$) alors que sa température baisse jusqu'à l'état de sous-refroidissement ($7 \rightarrow 8$). Il cède son énergie thermique à la source chaude (air intérieur ou eau sanitaire) ($6 \rightarrow 7$). Cet échange thermique permet d'inverser la proportion de vapeur/liquide du FF pour avoir finalement en sortie du condenseur le FF à l'état liquide.

Dans le condenseur, le régulateur de pression va maintenir celle-ci dans des valeurs acceptables quelque soient les conditions extérieures. Situé en sortie du condenseur, le réservoir de liquide, équipé d'une vanne de départ liquide, reçoit le FF à l'état liquide venant du condenseur et alimente le détendeur en FF de façon correcte. Il permet les fluctuations de volume de FF dues aux différentes températures de fonctionnement, aux ouvertures et fermetures du détendeur et aux variations de charge.

En ligne liquide, le déshydrateur est un organe important du circuit frigorifique qui possède trois principales fonctions : supprimer l'humidité, neutraliser les acides et filtrer les particules fines. Le voyant liquide qui est installé juste après le déshydrateur permet de contrôler la présence d'humidité dans le circuit frigorifique et l'état du FF dans la conduite liquide du circuit frigorifique.

Lorsque le fluide frigorigène traverse le détendeur ($8 \rightarrow 1$), sa pression et sa température diminuent. Le détendeur intègre une vanne électromagnétique qui permet d'alimenter correctement l'évaporateur en FF. Le FF est à nouveau à l'état liquide et à basse température, et le cycle peut recommencer.

3 ANALYSE DYSFONCTIONNELLE DU SYSTÈME

Un système parfait n'existe pas. En effet, différents défauts peuvent impacter le fonctionnement d'une PAC, notamment les défauts d'usage. Un défaut d'usage d'un système énergétique est une manifestation d'un phénomène anormal qui se produit pendant le fonctionnement du système (Vigan, 2015). Le dysfonctionnement d'une PAC est analysé dans cette partie ci-dessous.

3.1 LE FLUIDE FRIGORIGÈNE EN PHASE GAZEUSE

Dans le cas où la vanne électromagnétique du détendeur est trop ouverte (défaut 1 ou transition T1.12 sur la Figure 5), celle-ci laisse passer trop de FF à l'état liquide dans l'évaporateur. Le volume de FF est donc supérieur à la capacité de surchauffe de l'évaporateur. Ainsi, à la sortie de l'évaporateur, il subsiste un mélange liquide/gaz de FF. Au contraire, si la vanne électromagnétique du détendeur n'est pas assez ouverte (défaut 2 ou transition T1.11 sur la Figure 5), celle-ci ne laisse passer que peu de FF à l'état liquide. Le FF est donc en quantité réduite, inférieure à la quantité nécessaire pour garantir un fonctionnement stable de chacun des composants, les cycles de fonctionnement du système sont longs.

Le ventilateur (dans le cas d'un système à air) ou la pompe (dans le cas d'un système à eau) est essentiel au processus d'évaporation. Pendant l'utilisation de la PAC, plusieurs défauts peuvent survenir à ce niveau (défaut 4 ou transition T2.22 sur la Figure 5). Par exemple, des pales du ventilateur peuvent être détériorées (par la grêle ou le vandalisme), l'hélice peut patiner sur l'axe du moteur, le moteur du ventilateur peut tomber en panne ou ne pas être correctement alimenté en énergie, le filtre à air peut s'encrasser (à cause de poussières, d'insectes ou de feuilles qui peuvent réduire la surface échange au niveau de l'évaporateur), le ventilateur peut se mettre à tourner à l'envers (par vent violent par exemple) ou peut ne plus tourner à sa vitesse nominale. Tous ces événements peuvent provoquer des chutes de débit d'air à l'évaporateur, et provoquer le givre de l'évaporateur. Plus faible est le débit

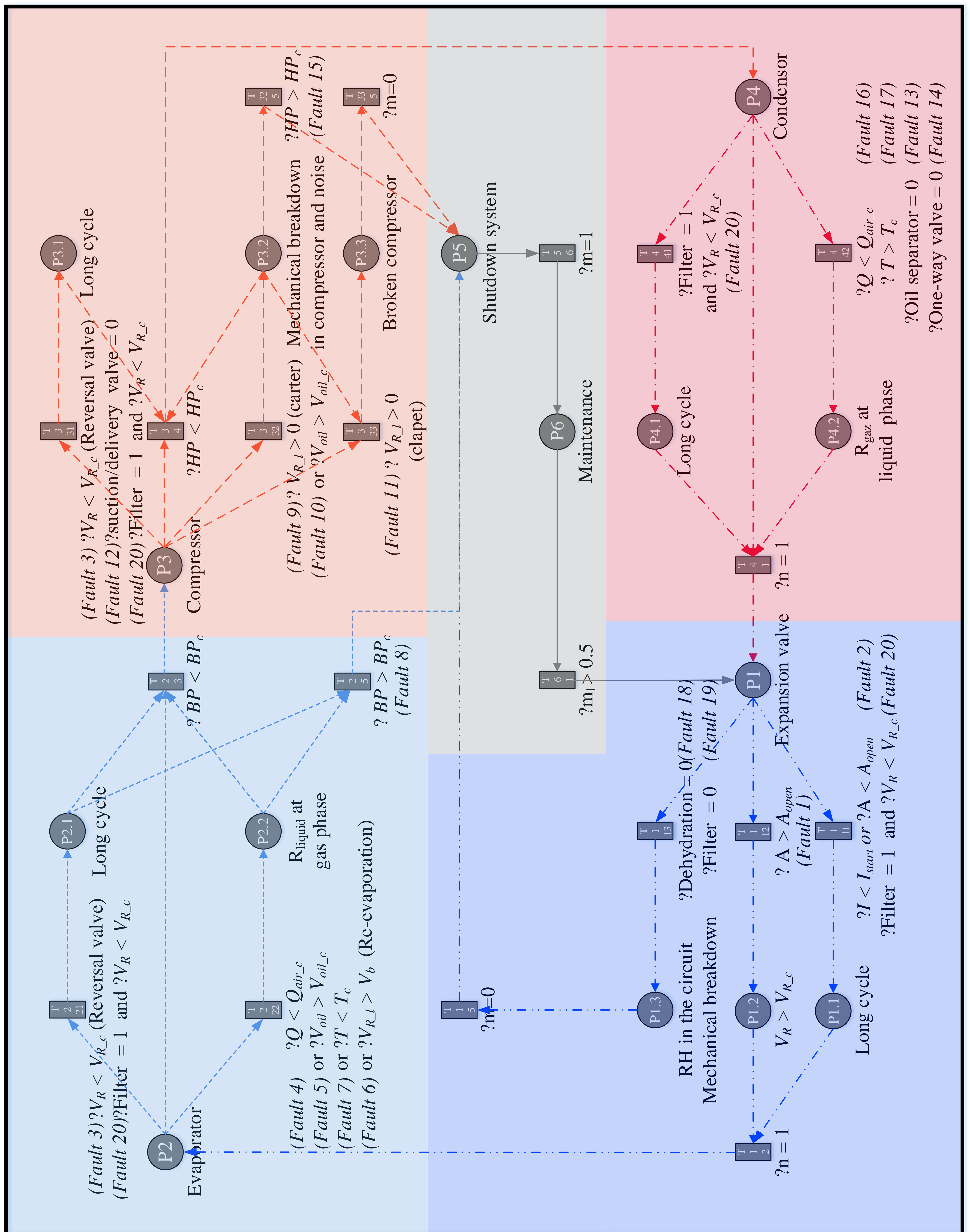


FIGURE 5. Réseau de Pétri de la PAC

d'air à l'évaporateur, moins efficace sera la surchauffe. C'est pourquoi, le FF reste à l'état liquide en sortie de l'évaporateur.

Pendant l'utilisation de la vanne d'inversion, des défauts mécaniques peuvent survenir (défaut 3 ou transition T2.21 sur la Figure 5). Par exemple, la bobine peut être défectueuse ou non alimentée, la vanne peut être coincée mécaniquement, les capillaires peuvent être bouchés. Après avoir traversé celle-ci, il n'y a donc pas assez de FF.

Concernant la bouteille anti-coup de liquide, si l'huile de lubrification de l'évaporateur migre de façon soudaine et en quantité élevée dans la bouteille, notamment au démarrage de la PAC (défaut 5 ou transition T2.22 sur la Figure 5) ou si le volume du FF à l'état liquide est supérieur la capacité de stockage de liquide de la bouteille (défaut 6 ou transition T2.22 sur la Figure 5), alors le FF reste à l'état liquide en sortie de la bouteille anti-coup de liquide.

Quand le FF n'est pas assez surchauffé (défaut 7 ou transition T2.22 sur la Figure 5), celui-ci se retrouve en phase liquide dans le carter du compresseur (défaut 9 ou transition T3.32 sur la Figure 5). En effet, le niveau d'huile continue dans le carter augmente artificiellement par la présence de FF à l'état liquide. Cela peut occasionner une défaillance mécanique, ou une formation de mousse. Par ailleurs, le FF à l'état liquide peut désamorcer la pompe d'huile (défaut 10 ou transition T3.33 sur la Figure 5) qui peut ne plus lubrifier correctement le compresseur. Dans ce cas précis, les parties mobiles du compresseur seront mal lubrifiées provoquant une usure des pièces accélérée. Dans le cas où le FF à l'état liquide arrive directement au niveau des clapets du compresseur (défaut 11 ou transition T3.31 sur la Figure 5), le FF à l'état liquide étant incompressible, le compresseur peut être endommagé. De plus, pendant l'utilisation du compresseur, le clapet d'aspiration ou de refoulement du compresseur peut être hors service (défaut 12 ou transition T14 sur la Figure 5) qui peut provoquer une chute de débit du FF, les cycles de fonctionnement du compresseur sont longs et la température de consigne est difficile à atteindre.

Dans le cas où le séparateur d'huile (défaut 13 ou transition T4.42 sur la Figure 5) ou le clapet anti-retour (défaut 14 ou transition T4.42 sur la Figure 5) ne fonctionne pas bien, l'huile est mélangée avec le FF à l'état gazeux sortant du compresseur et reste dans le circuit frigorifique. Cela peut modifier la qualité, les propriétés physiques et thermodynamiques du FF.

3.2 LE FLUIDE FRIGORIGÈNE EN PHASE LIQUIDE

Comme l'évaporateur, le condenseur possède des défauts mécaniques similaires (défaut 16 ou transition T4.42 sur la Figure 5) qui peuvent survenir pendant son utilisation. Dans ce cas, plus faible est le débit d'air du condenseur, moins efficace sera le sous-refroidissement. Quand le FF n'est pas assez sous-refroidi (défaut 17 ou transition T4.42 sur la Figure 5), celui-ci ne se condense que partiellement par rapport au fonctionnement normal du condenseur. Le FF est donc encore à l'état gazeux en sortie du condenseur.

Dans le circuit frigorifique, les causes d'introduction d'humidité sont nombreuses. Lors du remplacement d'un composant sans précaution ou suite à une fausse manœuvre, le givre ou la condensation peuvent facilement se former dans un conduit ou un composant dans lequel s'est introduit de l'air humide. Dans le cas où le déshydrateur est en mauvais état (défaut 18 ou transition T1.13 sur la Figure 5) ou le filtre des 4 composants principaux est cassé (défaut 19 ou transition T1.13 sur la Figure 5), cela peut entraîner la formation de cristaux de glace dans le détendeur, la formation d'acide dangereux qui oxyde les métaux provoquant notamment une corrosion des composants, la formation de boues préjudiciables à la rigidité diélectrique de l'huile. Tous ces événements peuvent entraîner des frottements répétés dans les différents composants, notamment pendant l'utilisation du détendeur.

Dans tous les cas, si le filtre des 4 composants principaux est partiellement bouché (défaut 20 ou transition T1.11, T2.21, T3.31, T4.41 sur la Figure 5), la quantité de FF traversant ces composants est diminué et la production d'énergie associée au FF est donc faible.

4 MODÉLISATION DU FONCTIONNEMENT RÉEL DU SYSTÈME SOUS FORME DE RÉSEAU DE PÉTRI

4.1 RÉSEAU DU PÉTRI

Le principe du RdP est de représenter toutes les évolutions possibles d'un système. Il s'agit d'une modélisation du comportement d'un système dynamique à événements discrets basée sur des places et des transitions. Chaque place permet de modéliser un état du système tandis que chaque transition représente un événement qui va entraîner une évolution du système.

Outre les deux éléments principaux, le RdP contient également un jeton. Il est disposé dans les places, dont sa position évolue dans le temps et indique l'état du système. Enfin, chaque place et chaque transition sont reliées par des arcs orientés. Chaque arc est associé à un nombre entier appelé le poids de l'arc. Dans cette étude, le RdP n'utilise qu'un jeton, donc tous les arcs sont de poids 1, on parle de RdP ordinaire. De plus, chaque transition a exactement une entrée et une sortie, on parle de réseau automate fini. Chaque transition contient des assertions et des prédicats qui permettent respectivement de modifier des paramètres du modèle et d'interroger une ou plusieurs variables du système. Une fois qu'une transition est sensibilisée, c'est-à-dire que la place en entrée reliée à cette transition contient un jeton et que le prédicat associé à cette transition est vérifié, alors le jeton de la place en entrée de cette transition est retiré et ajouté à la place en sortie.

Nous avons ainsi modélisé la PAC et ses défauts selon le RdP du schéma de la Figure 5 qui est explicité dans la partie 3. Les couleurs des arcs (bleu ciel : flèche demi trait, orange : flèche trait, rouge : flèche tiret-point, bleu foncé : flèche tiret-point-point) utilisées dans le RdP correspondent aux celles utilisées dans les Figure 3 et Figure 4. Cela permet d'identifier à quelle partie du système est associé l'évolution modélisée dans le RdP.

4.2 FONCTIONNEMENT DU RÉSEAU DE PÉTRI

Le RdP de la PAC modélisé sur le schéma de la Figure 5 possède les places $P1$ à $P6$, les transitions, un jeton et des arcs orientés représentés par les flèches. Avant le démarrage du système, le jeton est dans la *place P1*. Dès que la PAC démarre, le FF entre dans le circuit frigorifique. Dans le cas où la vanne électromagnétique du détendeur est trop ouverte (*transition T1.12*), celle-ci laisse passer trop de FF à l'état liquide dans l'évaporateur et le jeton se déplace dans la *place P1.2*. Le volume de FF est donc supérieur à la capacité de surchauffe de l'évaporateur. Si, en traversant la bouteille anti-coup de liquide, le FF à l'état liquide s'évapore correctement alors le FF n'est qu'à l'état gazeux à la sortie de la bouteille. Le système fonctionne donc en continu dans des conditions normales. Au contraire, le volume du FF à l'état liquide est supérieur la capacité de stockage de liquide de la bouteille (*transition T2.22*), alors le FF reste à l'état liquide en sortie de la bouteille anti-coup de liquide (*place P2.2*). Ensuite, celui-là se retrouve dans le carter du compresseur (*transition T3.32*). Cela peut occasionner une défaillance mécanique (*place P3.2*). Dans le cas où le FF à l'état liquide arrive directement au niveau des clapets du compresseur (*transition T3.33*), le FF à l'état liquide étant incompressible, le compresseur peut être endommagé (*place P3.3*). Au contraire, si le compresseur est cassé, le système s'arrête tout de suite, le jeton est dans la *place P5*. Dans ce cas, si l'intervention de maintenance est ponctuelle (*transition T5.6*), le système est à l'état de maintenance corrective. Il a besoin d'un technicien très qualifié. Si la maintenance est bien fait (*transition T6.1*), le système retourne à l'état de la fonctionne normales (*place P1*). Dans des cas négatives, si l'entretien n'est pas bien réalisé, le système retourne à l'état des défauts.

5 CONCLUSION ET PERSPECTIVE

Le principal objectif de cette étude est de modéliser des défauts d'usage d'une PAC sous forme d'un RdP. Nous avons réalisé une analyse fonctionnelle et dysfonctionnelle sur la circulation du FF d'une PAC. D'après ces deux études, nous avons pu constater que des défauts d'usage peuvent survenir tout au long du cycle de vie d'une PAC. Les défauts sont majoritairement situés au niveau du fluide frigorigène en phase gazeuse. Ils sont ensuite modélisés sous forme d'un RdP. Ce RdP est cyclique

puisque'il correspond au fonctionnement cyclique de la PAC. Grâce au RdP, il est possible de décrire le fonctionnement de la PAC et de modéliser l'influence sur sa performance des défauts recensés lors de l'analyse dysfonctionnelle.

Dans la suite de nos recherches sur le sujet, nous réaliserons le couplage entre le RdP et un modèle physique de la PAC à l'aide d'un code Python. Ainsi, il sera possible de modéliser le comportement dynamique de ce système. Enfin, nous le couplerons à l'outil de simulation énergétique dynamique du CSTB (Centre Scientifique et Technique du Bâtiment) : COMETh. Par la simulation, nous pourrions donner une distribution de probabilité des performances réelles d'une PAC en intégrant ses défauts d'usage.

Il est essentiel de mentionner les limites de l'étude actuelle, qui devraient être abordées dans la recherche future. Cette étude n'a été réalisée que sur la circulation du FF d'une PAC. Par la suite, nous avons également prévu de prendre en compte la circulation de l'huile (dans des 04 composants principaux), la circulation d'air/eau (dans les échangeurs thermiques) et la régulation du système. D'ailleurs, nous prendrons en compte également les défauts de mise en oeuvre puisqu'ils jouent un rôle important dans le fonctionnement et la performance d'une PAC. En intégrant les informations ci-dessus, il sera possible de modéliser le fonctionnement général d'une PAC.

RÉFÉRENCES

- Ademe (2007). *Instrumentation de sites équipés de PACS géothermiques et air ou eau en résidentiel*. Group Ademe.
- Ademe (2014). *Modes de chauffage dans l'habitat individuel*. Group Ademe.
- Clim, A. (2017). *L'ABC de la climatisation*. ABC Clim.
- Ferreira, C., Neves, L. C., Silva, A., et de Brito, J. (2018). Stochastic petri net-based modelling of the durability of renderings. *Automation in Construction*, 87 :96–105.
- Noyes, D. et Pérès, F. (2007). Analyse des systèmes-sûreté de fonctionnement. *Techniques de l'ingénieur*.
- Pourret, O., Naïm, P., et Marcot, B. (2008). *Bayesian networks : a practical guide to applications*, volume 73. John Wiley & Sons.
- Schneider (2004). *La Sûreté de Fonctionnement*. Le magazine Schneider Electric de l'enseignement technologique et professionnel.
- Seng, B. et Barras, C. (2014). Développement d'une méthode de prise en compte des dysfonctionnements et du vieillissement des composants et systèmes de ventilation.
- Vigan, J. (2015). *Le dictionnaire général du Bâtiment*. Grand Dicobat.

La classification et les bâtiments type au service de la rénovation énergétique des parcs immobiliers

Sergeï Agapoff*¹, Mathieu Rivallain¹, Yunseok Lee¹

¹*CSTB (Centre Scientifique et Technique du Bâtiment)*

84 avenue Jean Jaurès – Champs-sur-Marne

77447 Marne-la-Vallée cedex,

**sergei.agapoff@cstb.fr*

RESUME. Dans le cadre de la rénovation énergétique des bâtiments, les bailleurs sociaux, les gestionnaires de parc, les pouvoirs publics territoriaux doivent pouvoir disposer d'une photographie de leur parc immobilier pour prendre des décisions quant au renouvellement des systèmes de chauffage, des ouvrants ou encore de l'isolation des bâtiments. Dans cet article, nous proposons une méthodologie basée sur l'apprentissage supervisé pour compléter la carte d'identité des bâtiments d'un tel parc immobilier. Cette utilisation de ce type d'algorithmes, novatrice dans le domaine du bâtiment, constitue une alternative moins coûteuse mais aussi moins précise aux audits énergétiques réalisés sur le terrain. Les travaux de recherche sont toujours en cours de réalisation et une procédure d'évaluation des performances de la méthode sur le parc de l'Office Public de l'Habitat Montreuillois (Montreuil, 93) est développée.

MOTS-CLÉS : rénovation énergétique, bâtiment type, classification.

ABSTRACT. When it comes to building energy retrofit, it becomes necessary for a building stock manager, social housing company or local administration to have a clear picture of their building stock to make the right decisions for HVAC systems, windows or insulation renewal. In this paper, we propose a methodology based on supervised machine-learning algorithms to complete the identity card of such buildings. This innovative use of such algorithms – for buildings – is an alternative, less expensive but also less precise, to building energy audits. This is on-going research and a performance assessment procedure with data from "Office Public de l'Habitat Montreuillois" (Montreuil, France) is exposed.

KEYWORDS : energy retrofit, typical buildings, classification.

1. INTRODUCTION

Dans le cadre de la rénovation énergétique des bâtiments, les bailleurs sociaux, les gestionnaires de parc, les pouvoirs publics territoriaux doivent pouvoir disposer d'une photographie de leur parc immobilier pour prendre des décisions quant au renouvellement des systèmes de chauffage, des ouvrants ou encore de l'isolation des bâtiments. Cette photographie est habituellement réalisée sur la base des connaissances expertes sur les bâtiments du parc ou, lorsque ces informations ne sont pas suffisantes, sur la base d'audits qui permettent de dresser la carte d'identité de chacun des bâtiments du bailleur. De telles informations sont précieuses pour réaliser des simulations numériques des différents scénarios envisagés afin d'appuyer le processus de décision. Cependant, cette collecte de données par mobilisation d'experts ou audit énergétique est coûteuse tant sur le plan économique que sur le plan temporel. Des outils numériques, certes moins précis mais surtout moins chers et plus rapides à mettre en œuvre, sont alors nécessaires pour permettre à un bailleur – ou tout autre maître d'ouvrage – d'utiliser les

connaissances minimales qu'il détient sur ses bâtiments (surfaces, usages...) afin de compléter leur carte d'identité.

Pour répondre à ce besoin, nous proposons une méthodologie d'identification des bâtiments réels (partiellement caractérisés) à des bâtiments types (totalement caractérisés). Cette identification permet de caractériser les éléments inconnus des bâtiments réels afin d'obtenir une représentation des bâtiments étudiés comme sur la Figure 1 qui présente le processus général dans lequel s'inscrit la méthodologie d'identification. Une fois le bâtiment type identifié, il est nécessaire de développer des méthodes pour représenter le bâtiment et fournir des informations pertinentes pour la rénovation énergétique. La méthodologie proposée se base sur des algorithmes de classification pour identifier le bâtiment type associé à un bâtiment réel et la caractérisation des bâtiments réels est complétée grâce aux informations des bâtiments type.



Figure 1 : Processus général de représentation des bâtiments d'un parc

L'utilisation de méthodes d'apprentissage supervisé dans le domaine du bâtiment étant peu répandue, nous proposons en premier lieu un état l'art des approches par classification. La méthodologie proposée est ensuite détaillée avant de décrire la procédure de d'évaluation des performances sur le cas de l'Office Public de l'Habitat de Montreuil (93).

2. ETAT DE L'ART DES APPROCHES PAR CLASSIFICATION

Le concept de classification recouvre un ensemble de méthodes de *supervised learning* (apprentissage supervisé d'une structure de données par un outil informatique) : ces méthodes exploitent une loi de correspondance entre entrées (objets) et sorties (classes) obtenue à partir d'objets pour lesquels la classe est connue. La construction de cette loi de correspondance est communément appelée « étape d'entraînement » dans la description d'algorithmes de classification. Les méthodes les plus répandues sont les suivantes (Lee 2015) :

- **Decision Tree (DT)** : la classe d'un objet est définie par partitions successives selon la valeur de ses attributs (qui peuvent être catégoriques et numériques). La visualisation de l'arbre de décision permet une approche simple et intuitive de la loi de classification ;
- **k-Nearest Neighbors (k-NN)** : la classe d'un objet est déterminée par vote majoritaire des k objets d'apprentissage les plus proches. Puisqu'une distance doit être définie, ce type de méthode ne fonctionne qu'avec des attributs numériques ;
- **Artificial Neural Networks (ANN)** : la classe d'un objet est définie via une « boîte noire » composée de plusieurs couches de noeuds (neurones) qui traitent les données grâce à des fonctions d'activation. Ce type d'algorithme permet de fournir des lois de classification robustes (même pour des jeux de données complexes et volumineux) mais est difficilement interprétable du fait de son caractère boîte noire ;
- **Support Vector Machine (SVM)** : ce type d'algorithme permet de résoudre les problèmes de classification binaires en cherchant la frontière entre les deux classes considérées. Cette

frontière est choisie comme celle qui a la distance la plus grande aux objets les plus proches (marge maximale). La loi résultante d'une telle classification est difficile à interpréter lorsqu'elle n'est pas linéaire.

Dans la littérature étudiée, la méthode SVM est souvent utilisée et lorsqu'elle est comparée à d'autres méthodes (DT et Random Forest dans (Z. Lu et al. 2014) ou Linear Discriminant Analysis et Naïve Bayes dans (J. Lu, Mamun, and Chau 2015)), cette méthode semble donner de meilleurs résultats. Les outils les plus populaires pour l'implémentation de ces méthodes sont RapidMiner, MS-EXCEL et KNIME pour les outils dédiés et R, SQL et Python pour les langages de programmation. Parmi ces outils, R et Python sont de plus en plus utilisés par la communauté scientifique du fait de leur facilité de prise en main et leur adaptabilité. Les langages R et Python disposent de modules dédiés au *machine learning* (caret pour R (Kuhn 2008) et scikit-learn pour Python (Pedregosa et al. 2011)) : la force de ces modules est d'avoir un seul format de données utilisables avec toutes les méthodes disponibles.

Les méthodes de classification sont largement employées dans des applications de traitement du signal pour automatiser la détection et l'identification de motifs dans :

- une image : photographie aérienne/satellite (Diwediga et al. 2015; Z. Lu et al. 2014; Belgiu and Drăguț 2014; Kluckner and Bischof 2010; Matikainen, Hyypä, and Hyypä 2003), photographie 3D urbaine (Serna and Marcotegui 2014; Hernandez 2008), trafic routier (Zangenehpour, Miranda-Moreno, and Saunier 2015), analyse chimique (Milanez and Pontes 2014) ;
- un son : analyse chimique (Morizet et al. 2016) ;
- une impulsion électrique : analyse médicale (Djemili, Bourouba, and Amara Korba 2015), interface cerveau-machine (J. Lu, Mamun, and Chau 2015) ;
- un déplacement : aide à la conduite (Boyalı, Hashimoto, and Matsumoto 2015), diagnostic mécanique (Fedala et al. 2015; Li et al. 2015).

Le traitement du signal nécessite l'extraction de données pour caractériser le signal (*features extraction*) avant de procéder à la classification, tandis que dans d'autres domaines le point de départ peut être une collection d'objets déjà caractérisés (état d'une exploitation minière (Zhou et al. 2013)).

Lorsque des attributs nécessaires à la classification ne sont pas disponibles pour les objets étudiés, il est nécessaire d'adapter la méthodologie (Saar-Tsechansky and Provost 2007) : retirer les objets partiellement décrits, obtenir les valeurs manquantes (faire une campagne de mesures, remplacer un capteur défectueux ...), estimer les valeurs manquantes en fonction d'objets connus (valeur la plus probable, valeur par défaut, distribution probable de valeurs ...) ou encore recalibrer la loi de classification pour ne prendre en compte que les attributs connus pour l'objet étudié (modèles réduits).

Dans la littérature étudiée, les applications dans le domaine du bâtiment (Z. Lu et al. 2014; Belgiu and Drăguț 2014; Kluckner and Bischof 2010; Matikainen, Hyypä, and Hyypä 2003; Serna and Marcotegui 2014; Hernandez 2008) se focalisent sur l'analyse d'image pour détecter et identifier des bâtiments dans une zone donnée. De plus, les méthodes proposées ne permettent en général que la distinction entre les objets « bâtiment » et les autres objets « non-bâtiment » (végétation, voiture, lampadaire) : seuls Lu et al. proposent une distinction entre les bâtiments détectés (Z. Lu et al. 2014).

Une dernière approche qui ne fait pas intervenir de phase d'entraînement, mais peut être assimilée à de la classification, nous paraît importante à mentionner : l'association d'un objet à une classe par minimisation de la distance entre l'objet et un objet fictif représentant la classe. S'il est possible de définir un objet représentatif de chaque classe par des attributs représentatifs de la classe, alors la minimisation de la distance entre les attributs de l'objet étudié et ceux du représentant de la classe constitue une forme de classification.

3. METHODOLOGIE D'IDENTIFICATION

3.1. BATIMENTS TYPES, CLASSES ET LOIS DE CLASSIFICATION ASSOCIEES

L'objectif de la méthodologie proposée est d'identifier un bâtiment réel, dont on ne connaît que quelques attributs (surface, nombre d'étages, année de construction, localisation...), à un bâtiment type qui possède des caractéristiques techniques plus précises (nature des parois, taux de vitrage, type de systèmes de chauffage, ventilation, climatisation...). Le sujet des « bâtiments type » est l'un des plus vastes sujets de la recherche sur la caractérisation des bâtiments (Fery and Lahrech 2010) : il existe quantité de bibliothèques de bâtiments types pour différents périmètres et de méthodes pour les définir. Pour la méthodologie que nous proposons nous faisons l'hypothèse qu'une bibliothèque de bâtiments type a été identifiée pour le périmètre de bâtiments étudié. Nous inscrivons notre démarche dans le périmètre des bâtiments résidentiels existants et neufs.

Dans notre méthodologie, chaque bâtiment type constitue une classe de bâtiment : dire qu'un bâtiment réel B_x est de type T_i signifie que ce bâtiment peut être assimilé au bâtiment type i et donc qu'il appartient à la classe i . Les concepts de classe (au sens du *machine learning*) et de type (au sens de la caractérisation des bâtiments) sont donc confondus dans notre méthodologie. L'assimilation d'un bâtiment réel à bâtiment type est le processus de classification, qu'il s'agisse de classification naturelle lorsqu'il n'y a pas besoin d'intermédiaire pour déterminer la classe, de classification experte lorsqu'elle est réalisée par un humain ou de classification par apprentissage lorsqu'elle est réalisée par un algorithme. Pour que la classification par apprentissage soit efficace il est nécessaire de mettre en évidence des fonctions ou lois qui permettent d'analyser les caractéristiques connues du bâtiment étudié et de déterminer la classe de bâtiment dans lequel le ranger. Dans notre cas, la construction de ces lois, ou « étape d'entraînement », résulte de la classification experte de bâtiments bien caractérisés. Ces bâtiments constituent ce que nous appelons un parc « référence » : c'est par rapport à ce parc référence et les bâtiments types sélectionnés que les lois de classification vont être construites. L'ensemble des attributs retenus pour entraîner l'algorithme de classification est déterminant dans la construction de la loi de classification, modifier cet ensemble résultera en une nouvelle loi de classification. Notons enfin que chaque loi de classification est naturellement liée à un algorithme de classification donné (DT, SVM, ANN, etc.)

3.2. PRINCIPE

La méthodologie que nous proposons se compose de 4 étapes principales résumée dans la Figure 2.

1 : Construction d'une loi de classification**1a : Choix des bâtiments type, du parc référence, de l'algorithme de classification et des attributs de classification****1b : Association experte entre les bâtiments référence et les bâtiments type****1c : Entraînement de l'algorithme de classification sélectionné****2 : Sélection des bâtiments réels à identifier****3 : Application de la loi de classification sur les attributs choisis à l'étape 1****4 : Pour chaque bâtiment réel, identification du bâtiment type associé grâce à la classe obtenue à l'étape 3***Figure 2 : Méthodologie pour l'identification des bâtiments*

La première étape permet de traduire la connaissance experte sur l'association de bâtiments réels et de bâtiments type au travers de l'apprentissage automatique. Une fois la loi de classification construite, l'étape de sélection des bâtiments réels à identifier doit mettre en évidence, parmi l'ensemble des bâtiments étudiés, ceux qui sont compatibles avec la loi construite : il est impératif que les bâtiments sélectionnés soient au moins caractérisés par les attributs choisis lors de l'étape 1. Si un attribut est manquant, le bâtiment en question ne peut être sélectionné à moins de mettre en œuvre une technique d'adaptation telles que celles proposées par Saar-Tsechansky et Provost. Enfin les étapes 3 et 4 constituent le cœur de la méthodologie à savoir la classification et l'association entre la classe obtenue et le bâtiment type. Une fois le bâtiment type obtenu, les caractéristiques manquantes pour le bâtiment étudiées sont assimilées à celles du bâtiment type.

4. EVALUATION DES PERFORMANCES**4.1. PROCEDURE**

Pour évaluer la qualité de la méthodologie d'identification des bâtiments, nous proposons de réunir un panel d'experts dont le rôle est d'associer les bâtiments type aux bâtiments réels pour confronter les résultats de la méthodologie à ceux d'une classification experte. Les identifications effectuées par le panel d'expert permettent de rendre compte de la variabilité d'interprétation des caractéristiques des bâtiments. Pour garantir la validité de la procédure, les experts mobilisés pour effectuer l'identification manuelle sont différents de celui ou ceux mobilisés pour l'initialisation de la méthodologie (construction de la loi de classification). Pour permettre une évaluation de la chaîne complète, les attributs de classification doivent être choisis dans un sous-ensemble des attributs connus pour le parc de bâtiments réels étudié. Ainsi, il est possible de comparer les caractéristiques obtenues après identification des bâtiments type et les caractéristiques réelles des bâtiments étudiés.

Ainsi, pour un ensemble de bâtiments réels, les performances suivantes seront calculées :

- A_b : accord algorithme-expert pour chaque bâtiment b étudié. Il s'agit du pourcentage d'experts ayant classé le bâtiment de la même manière que l'algorithme ;
- P_b^2 : précision de la représentation de chaque bâtiment b . Il s'agit de la somme des carrés des écarts entre les caractéristiques réelles et les caractéristiques estimées.

- τ_{alg} : temps moyen d'identification par l'algorithme. Il s'agit du temps nécessaire à l'algorithme pour identifier un bâtiment (étapes 3 et 4 de la méthodologie) moyenné sur l'ensemble des bâtiments étudiés ;
- τ_{exp} : temps moyen d'identification par les experts. Il s'agit du temps nécessaire à un expert pour identifier un bâtiment (étapes 3 et 4 de la méthodologie) moyenné sur l'ensemble des bâtiments étudiés et des experts mobilisés.

4.2. CAS D'ETUDE ENVISAGE

L'Office Public de l'Habitat Montreuillois est le premier propriétaire et gestionnaire de logements sur la ville de Montreuil et le troisième Office Public de l'Habitat en Seine-Saint-Denis (93). Le parc de bâtiments de ce gestionnaire est constitué de plus de 11000 logements présentant des caractéristiques variées. Cette structure dispose de données techniques exhaustives sur ses bâtiments ce qui fait de ce parc un bon terrain d'expérimentation pour la méthodologie proposée.

Un sous-ensemble de ce parc immobilier sera choisi pour réaliser l'évaluation des performances de la méthodologie. Entre 10 et 20 bâtiments seront sélectionnés selon leur caractérisation : nous nous focaliserons sur des bâtiments pour lesquels un grand nombre d'attributs sont caractérisés.

5. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Dans cet article nous présentons une méthodologie d'identification des bâtiments réels sur la base de classification pour les associer à des bâtiments type. Cette méthodologie représente une alternative à des méthodes plus longues et plus coûteuses de caractérisation des bâtiments telles que l'audit énergétique. La qualité de notre méthodologie n'est pas encore démontrée et nous proposons une procédure d'évaluation de ses performances. Les performances seront évaluées sur une partie du parc de l'OPH Montreuil.

Dans la suite de ces travaux, nous envisageons de proposer une méthodologie avancée pour l'identification des bâtiments. Sur la Figure 2, il est évident que l'étape 1 peut être commune à plusieurs itérations de la méthodologie. En fixant la bibliothèque de bâtiments type et le parc référence, il est possible de créer une base de lois de classification pour différents algorithmes et différents ensembles d'attributs. Sur le principe des « modèles réduits » exposé par Saar-Tsechansky et Provost, le fait d'envisager des lois de classification adaptées à différents ensembles d'attributs permet d'adapter l'identification aux seules caractéristiques connues sur les bâtiments étudiés. Cette base de lois de classification nous permettra donc de proposer une méthodologie avancée (Figure 3) qui s'adapte aux bâtiments étudiés et permet à l'utilisateur de choisir l'algorithme le plus adapté à son cas d'étude.

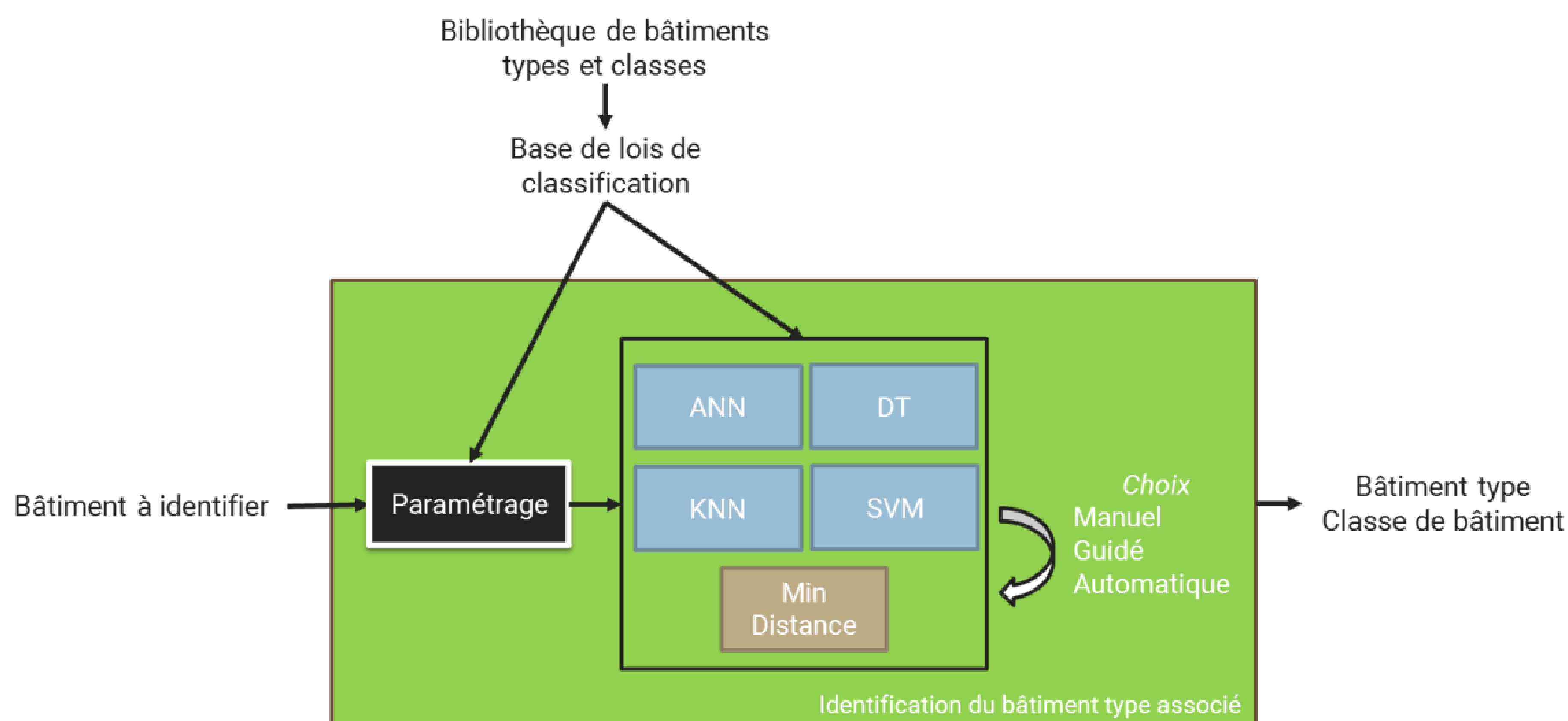


Figure 3 : Méthodologie avancée pour l'identification des bâtiments

La phase de « Paramétrage » proposée dans cette méthodologie avancée correspond à l'analyse des attributs connus pour le bâtiment à identifier afin de sélectionner les lois de classification applicables selon les attributs auxquelles elles sont associées. Cette méthodologie avancée permettra aussi de choisir l'algorithme de classification utilisé selon les performances observées lors de la construction de la base de lois de classification.

6. REMERCIEMENTS

Ces travaux ont bénéficié d'une aide de l'Agence Nationale de la Recherche (projet REHA-PARCS, ANR-15-CE22-0011).

7. BIBLIOGRAPHIE

- Belgiu, Mariana, and Lucian Drăguț. 2014. 'Comparing Supervised and Unsupervised Multiresolution Segmentation Approaches for Extracting Buildings from Very High Resolution Imagery'. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 96 (October): 67–75. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2014.07.002>.
- Boyalı, Ali, Naohisa Hashimoto, and Osamu Matsumoto. 2015. 'A Signal Pattern Recognition Approach for Mobile Devices and Its Application to Braking State Classification on Robotic Mobility Devices'. *Robotics and Autonomous Systems* 72 (October): 37–47. <https://doi.org/10.1016/j.robot.2015.04.008>.
- Diwediga, Badabate, Kperkouma Wala, Fousseni Folega, Marra Dourma, Yao A. Woegan, Koffi Akpagana, and Quang Bao Le. 2015. 'Biophysical and Anthropogenous Determinants of Landscape Patterns and Degradation of Plant Communities in Mo Hilly Basin (Togo)'. *Ecological Engineering* 85 (December): 132–43. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2015.09.059>.
- Djemili, Rafik, Hocine Bourouba, and M. C. Amara Korba. 2015. 'Application of Empirical Mode Decomposition and Artificial Neural Network for the Classification of Normal and Epileptic EEG Signals'. *Biocybernetics and Biomedical Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.bbe.2015.10.006>.
- Fedala, S., D. Rémond, R. Zegadi, and A. Felkaoui. 2015. 'Contribution of Angular Measurements to Intelligent Gear Faults Diagnosis'.
- Fery, Augustine, and Rofaïda Lahrech. 2010. 'Base de Connaissances Batiments Existants, Recensement Batiments Types - Rapport Final'. ESE/DE/PEB-2010.018RR. CSTB.

- Hernandez, Jorge. 2008. 'Segmentation et Interprétation de Nuages de Points Pour La Modélisation d'Environnements Urbains'. *Revue Française de Photogrammetrie et de Télédétection* 191: 28–35.
- Kluckner, Stefan, and Horst Bischof. 2010. 'Image-Based Building Classification and 3d Modeling with Super-Pixels'. In *ISPRS Technical Commission III Symposium on Photogrammetry Computer Vision and Image Analysis*, 233–238.
<http://www.isprs.org/proceedings/XXXVIII/part3/a/pdf/zwi/41-XXXVIII-part3A.pdf>.
- Kuhn, Max. 2008. 'Building Predictive Models in R Using the Caret Package'. *Journal of Statistical Software* 28 (5): 1–26.
- Lee, Yunseok. 2015. 'Modeling Segmentation of Building Stocks for Energy Management and Retrofit'. Internship Report. Ecole des Ponts - CSTB.
- Li, Chuan, René-Vinicio Sanchez, Grover Zurita, Mariela Cerrada, Diego Cabrera, and Rafael E. Vásquez. 2015. 'Multimodal Deep Support Vector Classification with Homologous Features and Its Application to Gearbox Fault Diagnosis'. *Neurocomputing* 168 (November): 119–27.
<https://doi.org/10.1016/j.neucom.2015.06.008>.
- Lu, J., K.A. Mamun, and T. Chau. 2015. 'Pattern Classification to Optimize the Performance of Transcranial Doppler Ultrasonography-Based Brain Machine Interface'. *Pattern Recognition Letters* 66: 135–43. <https://doi.org/10.1016/j.patrec.2015.07.020>.
- Lu, Zhenyu, Jungho Im, Jinyoung Rhee, and Michael Hodgson. 2014. 'Building Type Classification Using Spatial and Landscape Attributes Derived from LiDAR Remote Sensing Data'. *Landscape and Urban Planning* 130 (October): 134–48.
<https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2014.07.005>.
- Matikainen, Leena, Juha Hyyppä, and Hannu Hyyppä. 2003. 'Automatic Detection of Buildings from Laser Scanner Data for Map Updating'. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 34 (3/W13): 218–224.
- Milanez, Karla Danielle Tavares Melo, and Márcio José Coelho Pontes. 2014. 'Classification of Edible Vegetable Oil Using Digital Image and Pattern Recognition Techniques'. *Microchemical Journal* 113 (March): 10–16. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2013.10.011>.
- Morizet, N., N. Godin, J. Tang, E. Maillet, M. Fregonese, and B. Normand. 2016. 'Classification of Acoustic Emission Signals Using Wavelets and Random Forests : Application to Localized Corrosion'. *Mechanical Systems and Signal Processing* 70–71 (March): 1026–37.
<https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2015.09.025>.
- Pedregosa, Fabian, Gaël Varoquaux, Alexandre Gramfort, Vincent Michel, Bertrand Thirion, Olivier Grisel, Mathieu Blondel, et al. 2011. 'Scikit-Learn: Machine Learning in Python'. *The Journal of Machine Learning Research* 12: 2825–2830.
- Saar-Tsechansky, Maytal, and Foster Provost. 2007. 'Handling Missing Values When Applying Classification Models'. <http://archive.nyu.edu/handle/2451/27813>.
- Serna, Andrés, and Beatriz Marcotegui. 2014. 'Detection, Segmentation and Classification of 3D Urban Objects Using Mathematical Morphology and Supervised Learning'. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 93: 243–255.
- Zangenehpour, Sohail, Luis F. Miranda-Moreno, and Nicolas Saunier. 2015. 'Automated Classification Based on Video Data at Intersections with Heavy Pedestrian and Bicycle Traffic: Methodology and Application'. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 56 (July): 161–76. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2015.04.003>.
- Zhou, Jian, Xibing Li, Mitri Hani S., Shiming Wang, and Wei Wei. 2013. 'Identification of Large-Scale Goaf Instability in Underground Mine Using Particle Swarm Optimization and Support Vector Machine'. *International Journal of Mining Science and Technology* 23 (5): 701–7.
<https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2013.08.014>.

Méthode statistique de classification automatique des mesures de consommations de bâtiments d'enseignement en eau, gaz et électricité pour la mise en évidence d'anomalies de fonctionnement

Mostafa AKIL^{*1}, Didier DEFER¹, Pierre TITTELEIN¹, Frédéric SUARD²

¹ Laboratoire de Génie Civil et géo-Environnement LGCgE, Université d'Artois, Pôle Béthune, Faculté des Sciences Appliquées, Technoparc Futura, 62400 Béthune, France

² LIANES - Laboratoire Intelligence Artificielle pour les Energies NouvelleS, Département des Technologies Solaires - CEA/Liten, Département Métrologie, Instrumentation et Information – CEA/List Lynx 3, 50 avenue du Lac Léman -| F-73375 Le Bourget-du-Lac

* mostafa_akil@ens.univ-artois.fr

RESUME. Les gestionnaires de parc équipent de plus en plus leurs bâtiments avec de nombreux capteurs. L'analyse des données issues de ces mesures reste pourtant compliquée et se limite souvent à la définition de seuils d'alerte. Cet article vise à développer une méthodologie d'analyse basée sur l'élaboration d'indicateurs statistiques. Leur suivi pourra permettre de détecter des évolutions de comportement ou de performance des systèmes. La mise en évidence automatisée d'anomalies de fonctionnement pourra déclencher des alertes. Notre première approche se concentre sur le traitement de données issues de collèges gérés par le département de Pas de Calais. 117 bâtiments de collège sont instrumentés avec différents capteurs (eau, électricité, gaz, température intérieure et extérieure, ...) et fournissent des données depuis 2015. Plusieurs cycles de saisons sont exploitables.

Des méthodes de Data Mining, y compris l'approche de Clustering, ont été utilisées pour extraire des informations à partir des mesures en 2015 et 2016. Les résultats de la classification des données ont permis de mettre en évidence des jours de fonctionnement rares en exploitant les résultats de la classification des données.

MOTS-CLÉS : Data Mining, K-Means, Arbre de décision, données énergétiques, maintenance de bâtiment.

ABSTRACT. Fleet managers are increasingly equipping their buildings with many sensors. The analysis of the data resulting from these measurements remains complicated and is often limited to the definition of alert thresholds. This article aims to develop an analysis methodology based on the development of statistical indicators. Their monitoring will make it possible to detect changes in the behavior or performance of the systems. The automated highlighting of malfunctions and changes may trigger alerts. Our first approach focuses on data processing from colleges managed by the department of Pas de Calais. 117 college buildings are instrumented with different sensors (water, electricity, gas, indoor and outdoor temperature...) and provide data since 2015. Several seasons cycles are exploitable

Data Mining methods, including the Clustering approach, were used to extract information from the measurements in two colleges in 2015 and 2016. The results of the data classification were able to detect rare days of operation. exploiting the results of the classification of the data.

KEYWORDS : Data Mining, K-Means, decision tree.

1. INTRODUCTION

Le département du Pas-de-Calais gère 117 bâtiments de collège. Un plan d'instrumentation a été mis en œuvre depuis plusieurs années pour aboutir au suivi en quasi temps réel des consommations (eau, électricité, gaz) et des températures (intérieure, extérieure). La simple définition de seuils d'alerte sur les consommation d'eau a déjà permis de faire des économies très conséquentes en détectant rapidement

les fuites. L'analyse des autres mesures est plus lourde et complexe, notamment par la dépendance aux usages et à l'environnement. Cet objectif relève des techniques de traitement statistique des données.

Ces techniques ont déjà été fréquemment utilisées pour soutenir et améliorer les aspects fondamentaux de la gestion de l'efficacité énergétique. Citons par exemple Yu et al. (Yu et al. 2010) qui ont proposé l'utilisation d'arbres de décision pour développer des modèles prédictifs de la demande d'énergie de constructions puisqu'ils sont plus facilement interprétés que d'autres techniques de classification. Xaio et Fan (Xiao et Fan 2014) ont utilisé le Clustering pour identifier les modèles de consommation d'énergie quotidienne. Morbitzer et al. (Morbitzer, Strachan, et Simpson 2004) ont également appliqué des algorithmes de Clustering pour traiter les données de surveillance des bâtiments et découvrir des facteurs non évidents de surconsommation d'énergie dans les infrastructures du bâtiment. Capozzoli et al. (Capozzoli, Lauro, et Khan 2015) décrivent une approche simplifiée pour détecter automatiquement les défauts dans les équipements énergétiques du bâtiment. Chicco et al. (Chicco et al. 2004), regroupent les clients en classes, en fonction de leur comportement de consommation électrique.

L'idée est donc ici de développer une méthodologie d'analyse basée sur l'élaboration d'indicateurs statistiques. Leur suivi pourra permettre de détecter des évolutions de comportement ou de performance des systèmes. La première étape de la démarche consiste à se focaliser sur chaque collègue indépendamment des autres en vue de combiner les décisions dans la deuxième étape. Elle se focalise sur les mesures de consommation en eau, gaz et électricité. Le but est d'exploiter ces données afin d'élaborer des indicateurs calculés automatiquement, pour mettre en évidence des comportements inhabituels et détecter les anomalies de fonctionnement.

2. METHODE

Notre démarche de travail est d'extraire des informations des consommations quotidiennes des collèges fournis par les systèmes de télé-relève sur la période 2015 et 2016 (eau, électricité et gaz) pour tenter de mettre en évidence d'éventuelles anomalies. Ce travail est initié sur un des collèges notés par la suite « collègue B ». Le graphe (Fig 1) affiche le calendrier de 2015 en représentant verticalement les 7 jours de chaque semaine de l'année. Certaines périodes sont inexploitables à cause de problèmes de télérelève (le 17/03/2015 et la période du 26/10/2015 au 31/10/2015). Elles ne concernent cependant que moins de 2% sur l'ensemble des données, la qualité des données ne nécessite donc pas de traitement correctif approfondi.

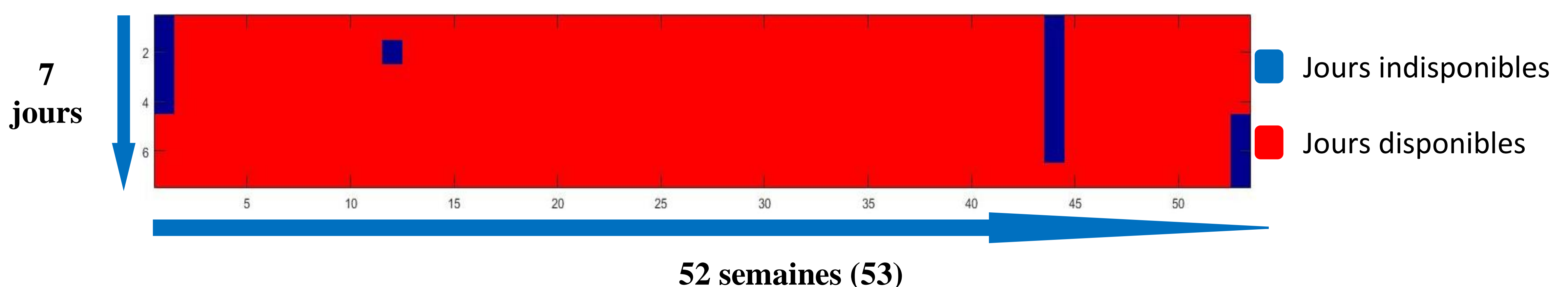


Figure 1 : Calendrier des jours disponibles et indisponibles pour le collègue B en 2015

Les consommations sont généralement étudiées quotidiennement. Pourtant dans le mode de fonctionnement des collèges, on peut distinguer des jours complets d'activité (lundis, mardis, jeudis, vendredis), un fonctionnement par demi-journées les mercredis et des jours complets d'inactivité les week-ends. Ceci a conduit à opter pour un découpage de chaque jour en 3 périodes :

- La nuit : de 19h la veille à 5h du matin (pour ne pas inclure la relance du chauffage)
- Le matin : de 5h à 12h
- L'après-midi : de 12h à 19h

Cette répartition a été établie après concertation avec le gestionnaire et la prise en compte de la programmation du scénario de consigne de chauffage. Les données mesurées au pas d'acquisition de 10 minutes sont cumulées en niveaux de consommation dans chaque période aboutissant ainsi à 9 données par jour : 3 pour la consommation d'eau, 3 pour l'électricité et 3 pour le gaz. On doit donc traiter 9 séries de données sur toute l'année.

L'objectif du travail est de proposer un modèle automatisable qui puisse être appliquée à l'ensemble des 117 collèges. Notre première étape proposée, est de trouver une méthode capable de regrouper les jours en familles selon leurs niveaux de consommation. Mais le problème c'est qu'à priori, aucune information n'existe dans les données sur les consommations des 3 pôles dans chaque étape de la journée. Pour cela une approche non supervisée qui permet d'exploiter les données sans information a priori est privilégiée. La méthode de clustering K-Means qui a été retenue vise à regrouper dans des familles (classes), les individus (séries de mesures sur une période donnée dans notre cas) qui se « ressemblent ». Dans ce cas, elle va définir des classes de consommation.

Soit k le nombre de classes dans lesquelles, on souhaite répartir les données. La procédure mise en œuvre dans la méthode K-Means (Usman, Ahmad, et Ahmad 2013) suit la séquence suivante :

1. Etape initiale : Dans l'ensemble des éléments à classer, un tirage aléatoire permet de choisir au hasard k éléments constituant les centres initiaux des k classes.
2. Affectation dans les classes : Chaque individu ou élément de l'ensemble est affecté à la classe dont il est le plus proche du centre. Différentes mesures permettent de quantifier cette proximité. La distance euclidienne retenue dans ce travail exprime la distance entre l'élément $x_i^{(j)}$ et la classe c_j par $\|x_i^{(j)} - c_j\|^2$.

La fonction objectif J que l'on doit minimiser vise à minimiser la dispersion de chaque classe et s'écrit comme la somme des distances de chaque élément au centre de classe auquel il est rattaché

$$J = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k \|x_i^{(j)} - c_j\|^2 \quad (1)$$

3. Dans chaque classe qui vient d'être constituée, on détermine le nouveau barycentre qui devient le nouveau centre de la classe. Deux cas sont possibles :
 - Les k nouveaux centres de classes sont inchangés et alors la classification est terminée
 - Le nouveau groupe de centres de classe est modifié et alors on réitère la phase 2 d'affectation avec le nouveau groupe.

A l'issue de ce processus itératif, les k classes sont déterminés.

Le nombre k de classes doit être fixé. Dans le cadre d'une procédure automatisée de traitement, c'est-à-dire n'impliquant pas de paramétrage par un utilisateur non expert, le critère Davies-Bouldin (DB) a été utilisé pour retenir le nombre optimal de classes. Il se calcule de la façon suivante :

$$DB = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \max_{j \neq i} \left\{ \frac{I(C_i) + I(C_j)}{I(C_i, C_j)} \right\} \quad (2)$$

Pour chaque classe i de la partition, on cherche la classe j qui maximise l'« indice de similarité » décrit comme suit :

$$R_{ij} = \frac{I(C_i) + I(C_j)}{I(C_i, C_j)} \quad (3)$$

$I(C_i)$, représente la moyenne des distances entre les individus appartenant à la classe C_i et son centre alors que $I(C_i, C_j)$ représente la distance entre les centres des deux classes C_i et C_j . La meilleure partition est donc celle qui minimise la moyenne de la valeur calculée pour chaque classe. En d'autres termes, la meilleure partition est celle qui minimise la similarité entre les classes (Davies et Bouldin 1979).

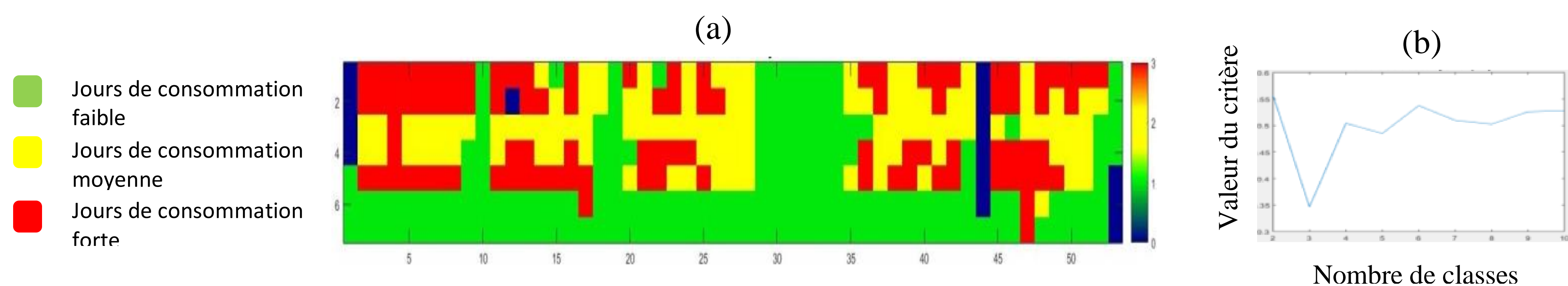


Figure 2 : (a) classification automatique avec K-Means de consommation d'eau le matin de B en 2015, (b) Nombre de classe optimal pour la classification automatique avec DB.

La figure 2 montre (a) le résultat d'une classification par K-Means des consommations d'eau pour la période du matin. Le critère de DB (b) est ici minimisé pour une répartition en 3 classes. Chaque classe « famille » comporte les jours qui se ressemblent par leurs niveaux de consommation d'eau sans définir a priori de niveau de seuil pour passer d'une classe à l'autre. Une couleur a été associée à chaque classe : vert pour la famille des jours de consommation faible, jaune pour une consommation moyenne, et rouge pour une consommation classée forte. On obtient une représentation équivalente pour chacune des 9 séries de données.

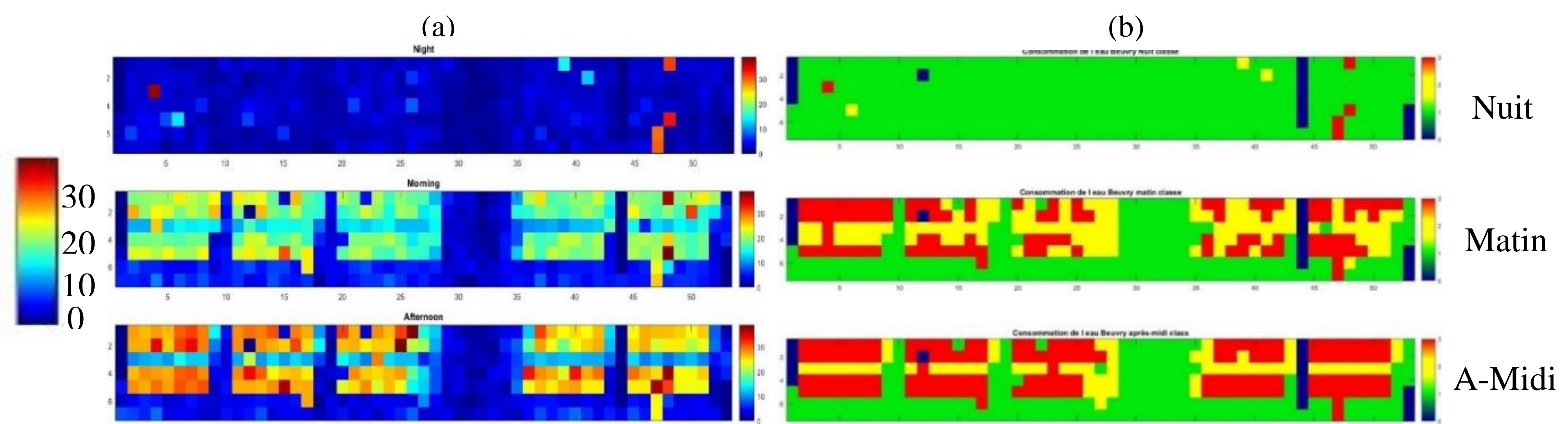


Figure 3 : (a) Calendriers de valeurs brutes de consommation d'eau, (b) leur regroupement avec la classification automatique K-Means de B en 2015.

Sur la figure 3 (a), les calendriers représentent les consommations d'eau codées sur une échelle de couleur allant du bleu pour les plus faibles consommations au rouge pour les plus fortes. Sur la partie de droite (b), on observe le résultat de la classification réalisée par K-Means. Les jours du calendrier de nuit en (a) qui se ressemblent par leur couleur bleue, sont regroupé dans une famille ensemble par K-Means et ils sont représentés par une couleur verte en (b). Alors, en général, la classe des jours de consommations faibles est représentée en vert, la classe moyenne en jaune et la classe forte en rouge. Visuellement, on peut entamer une analyse qui permet de distinguer les jours d'activité, les week-ends, les périodes de vacances, les mercredis. On constate logiquement que la consommation quotidienne d'eau est très liée à la présence des étudiants dans le collège. La consommation d'eau est toujours supérieure à zéro. Pendant les périodes de vacances, cette consommation diminue pour atteindre son minimum.

On peut aussi observer des pics de consommation d'eau durant certaines nuits dans le collège. La consommation d'eau l'après-midi est généralement supérieure à celle du matin. On constate que la présence le mercredi est inférieure à celle des autres journées de la semaine même le matin. On visualise notamment les week-ends où l'activité est réduite (2 rangées du bas de chaque calendrier).

Si on croise les classifications des 3 pôles de consommation, on peut remarquer des combinaisons rares qui peuvent conduire à entamer une analyse plus fine et experte des consommations correspondantes.

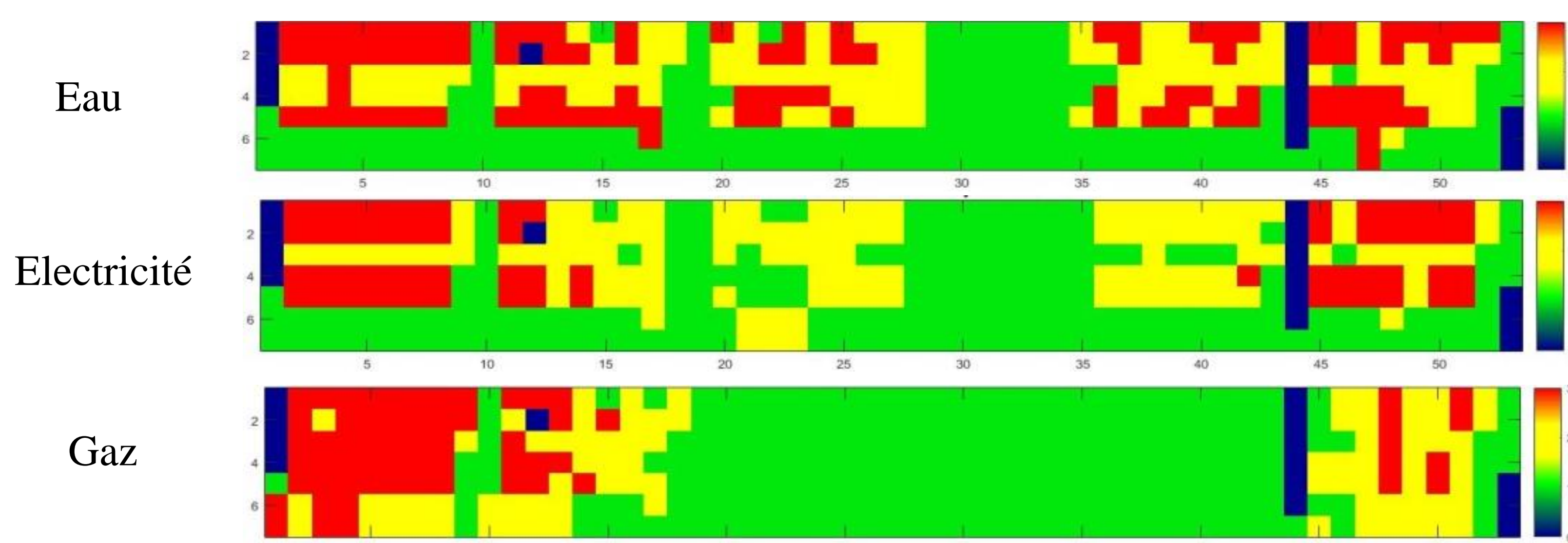


Figure 4 : classification automatique avec K-Means des consommations d'eau, d'électricité et du gaz le matin en 2015

Sur la figure 4 on peut observer par exemple, en bas à gauche, le week-end de la première semaine de l'année 2015. Dans ce cas, on a une forte consommation du gaz combinée avec une faible consommation d'eau et d'électricité. Il s'agit d'une situation qui ne se retrouve que rarement les autres week-ends. Ces jours particuliers nécessiteraient une analyse plus poussés. Cette approche visuelle est intéressante mais elle est difficilement généralisable à l'ensemble des bâtiments instrumentés. Pour automatiser l'analyse, le clustering est complété par la construction d'un arbre de décision qui va combiner les résultats obtenus sur les classifications des 3 pôles de consommation, dans le but de trouver des proportions pour chaque situation de fonctionnement des jours et définir après celles de statuts rares et celles de statuts fréquents.

Un arbre de décision est un classificateur non paramétrique. Le processus de construction de l'arbre de décision est présenté dans (Otakei et Blaschke 2010). La structure de base de l'arbre de décision

consiste en un nœud racine, un certain nombre de nœuds internes et enfin un ensemble de nœuds terminaux. Les données sont réparties récursivement dans l'arbre de décision selon le cadre de classification défini. A chaque nœud, une règle de décision est requise et ceci peut être implémenté en utilisant un test de division souvent de la forme

$$F(\mathbf{x}) = \begin{cases} \mathbf{x}_j > \mathbf{c} & \text{pour les arbres de décision univariés} \\ \sum_{j=1}^n a_j \mathbf{x}_j \leq \mathbf{c} & \text{pour les arbres de décision multivariés} \end{cases} \quad (4)$$

Où \mathbf{x}_j représente les vecteurs de mesure sur les n entités sélectionnées et a_j est un vecteur de coefficients de discrimination linéaire alors que \mathbf{c} est le seuil de décision (Otakei et Blaschke 2010).

3. RESULTATS ET DISCUSSION

La figure 5 représente le résultat du traitement des consommations d'électricité du matin obtenu automatiquement pour le collège en inférant des règles de décision sur les autres variables descriptives : eau et gaz. On aboutit à un arbre de décision qui permet de repérer les combinaisons de classification observables de façon rare ou fréquente.

- L : consommation électrique faible
- M : consommation électrique moyenne
- H : consommation électrique forte

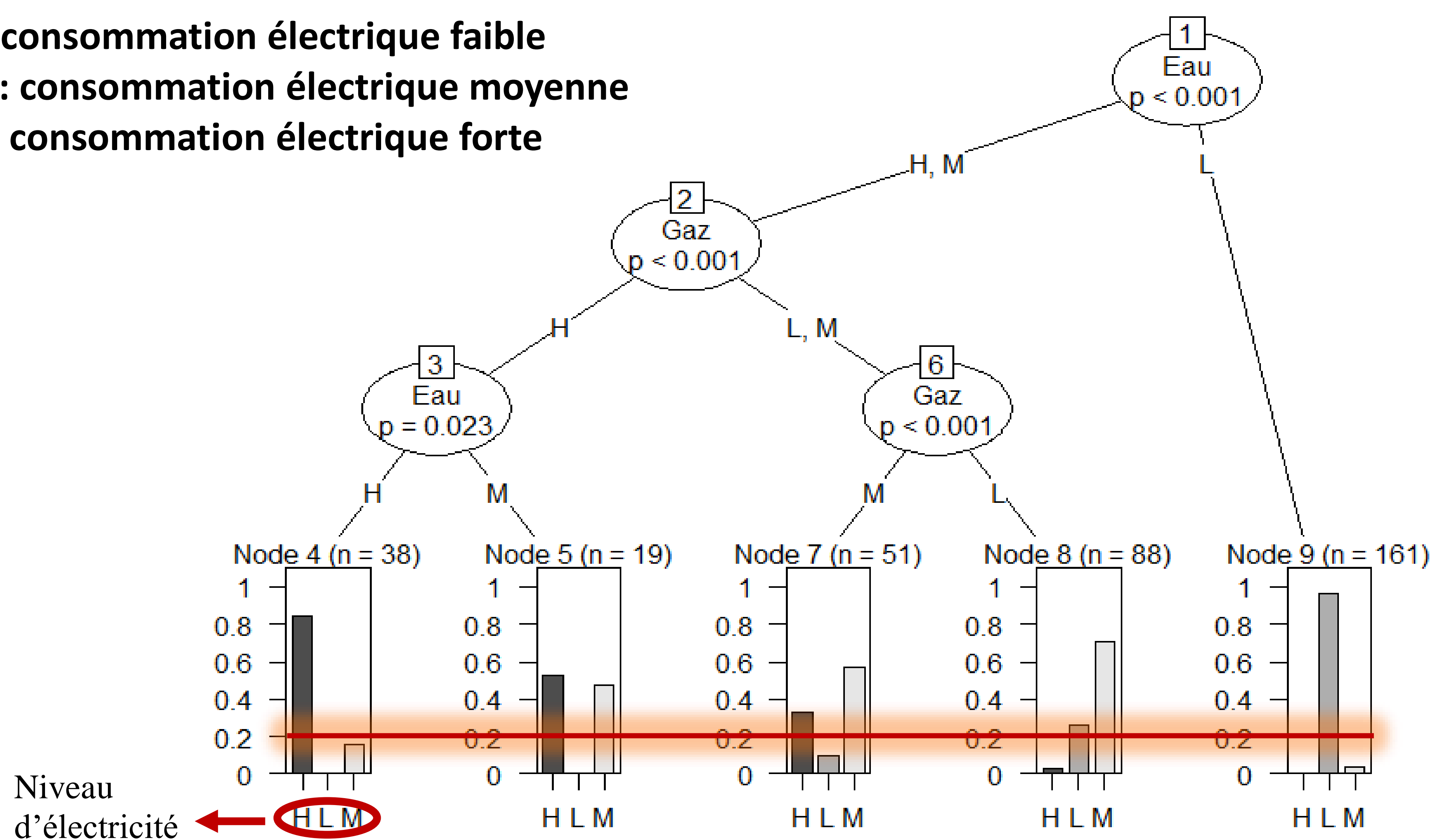


Figure 5 : arbre de décision pour le matin de l'année 2015

D'après la figure 5, certaines combinaisons de consommation apparaissent dans de faibles proportions. Par exemple en prenant la première branche tout à droite de l'arbre, on a observé 161 matinées de 2015 dans le collège B présentant une faible consommation d'eau. Parmi ces individus statistiques, presque 98% sont associés à un faible niveau de consommation en électricité et ce, quel que soit le niveau de consommation du gaz. Seuls 2% de ces jours présentent un niveau moyen de consommation d'électricité. Ces situations de « petits pourcentages » sont répétées dans plusieurs cas

comme le montre la figure 5. Nous avons considéré de façon arbitraire que tous les cas de proportion inférieure à 20%, sont considérés comme des cas des jours de fonctionnement rare et les autres cas sont des jours de fonctionnement fréquent. Ce dernier critère devrait être défini pour chaque branche de l'arbre en accord avec le gestionnaire du bâtiment.

Quand un jour est classé dans la catégorie « rare », une alarme pourra être déclenchée et la personne en charge du suivi pourra analyser plus finement les évolutions des consommations correspondantes et le cas échéant prendre les décisions s'imposant.

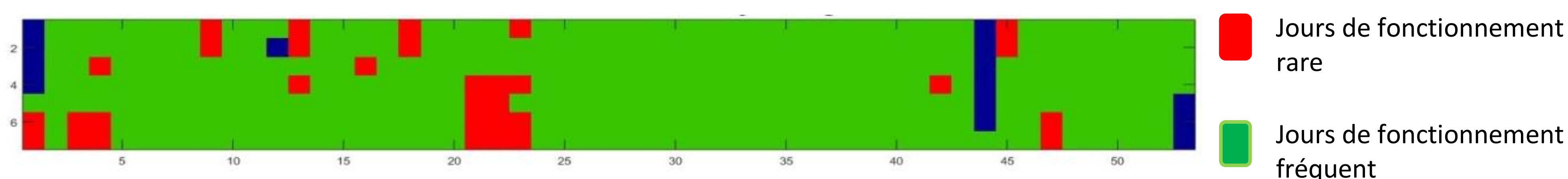


Figure 6 : Jours de fonctionnement rares et fréquents au collège B 2015 le matin

La figure 6 permet de repérer sur la représentation en calendrier les jours correspondant à une situation rare de combinaison pour l'année 2015.

Un autre arbre a été construit pour l'année 2016 dans le but de confirmer les répartitions des combinaisons obtenues en 2015. Les deux arbres ont donné des proportions similaires pour les branches. La très bonne concordance qui a été constatée permet de valider le modèle statistique obtenu. Au final, parmi 27 ($=3^3$) combinaisons possibles des 3 pôles de consommations, 15 sont considérés comme cas rares et 12 comme cas fréquents.

4. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Notre premier objectif dans la démarche d'exploitation des données issues de relevés de consommation dans un établissement scolaire était de proposer une procédure automatisable de détection de jours de fonctionnement rare en étudiant les combinaisons de consommation. Pour réaliser cette mission, les jours ont été regroupés tout d'abord dans des familles selon leurs ressemblances de niveaux de consommation des 3 pôles par K-Means. Ensuite, un arbre de décision a combiné les résultats obtenus sur les classifications des 3 pôles de consommation, et des proportions pour chaque catégorie de fonctionnement des jours ont été trouvées. Enfin les jours rares et les jours fréquents ont été définis par un critère spécifique. Une fois les jours rares détectés, l'expert gestionnaire des flux peut analyser la situation plus finement et éventuellement mettre en place des actions pour corriger le problème si une anomalie est détectée. L'association d'une classification et de la constitution d'un arbre de décision a permis de répondre à cette première attente.

La suite du travail qui est en cours vise à utiliser ce modèle statistique pour analyser les consommations des années suivantes dans le but de :

- Classifier les jours de 2017 selon leurs consommations quotidiennes en se basant sur les classes trouvées dans les deux années précédentes.

- Utiliser le modèle pour traiter le jour même les données issues de la télérelève et générer une alerte automatisée.

5. REMERCIEMENTS

Ce travail a été réalisé dans le cadre d'une collaboration avec le Conseil Départemental du Pas-de-Calais qui prévoit une mise à disposition des données de télé-relève. Les auteurs tiennent en particulier à remercier le Service Innovation Energie du département pour ses contributions.

6. BIBLIOGRAPHIQUES

- Capozzoli, Alfonso, Fiorella Lauro, et Imran Khan. 2015. « Fault detection analysis using data mining techniques for a cluster of smart office buildings ». *Expert Systems with Applications* 42 (9): 4324-38. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2015.01.010>.
- Chicco, G., R. Napoli, F. Piglione, P. Postolache, M. Scutariu, et C. Toader. 2004. « Load pattern-based classification of electricity customers ». *IEEE Transactions on Power Systems* 19 (2): 1232-39. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2004.826810>.
- Davies, D. L., et D. W. Bouldin. 1979. « A Cluster Separation Measure ». *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* PAMI-1 (2): 224-27. <https://doi.org/10.1109/TPAMI.1979.4766909>.
- Morbitzer, Christoph, Paul Strachan, et Catherine Simpson. 2004. « Data mining analysis of building simulation performance data ». *Building Services Engineering Research and Technology* 25 (août): 253-67. <https://doi.org/10.1191/0143624404bt098oa>.
- Otukei, J. R., et T. Blaschke. 2010. « Land cover change assessment using decision trees, support vector machines and maximum likelihood classification algorithms ». *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, Supplement Issue on « Remote Sensing for Africa – A Special Collection from the African Association for Remote Sensing of the Environment (AARSE) », 12 (février): S27-31. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2009.11.002>.
- Usman, Ghousia, Usman Ahmad, et Mudassar Ahmad. 2013. « Improved K-Means Clustering Algorithm by Getting Initial Centroids », 9.
- Xiao, Fu, et Cheng Fan. 2014. « Data mining in building automation system for improving building operational performance ». *Energy and Buildings* 75 (juin): 109-18. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.02.005>.
- Yu, Zhun, Fariborz Haghighat, Benjamin C.M. Fung, et Hiroshi Yoshino. 2010. « A Decision Tree Method for Building Energy Demand Modeling ». *Energy and Buildings* 42 (10): 1637-46. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.04.006>.

Etude numérique de l'impact des conditions aux limites générées par les stratégies de refroidissement sur les charges de climatisation en milieu urbain.

Étude de cas d'un quartier méditerranéen à Beyrouth, Liban.

Jeff Fahed¹, Stéphane Ginestet*¹, Elias Kinab², Luc Adolphe³

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

² Université Libanaise, Faculté de génie, Roumieh, Lebanon.

³ LRA, Université de Toulouse, ENSA, France

*sgineste@insa-toulouse.fr

RESUME. L'interaction entre le bâtiment et le microclimat est prépondérante dans les zones urbaines. Ainsi, les îlots de chaleur urbains influencent grandement la consommation d'énergie, en particulier sous climat méditerranéen. Cette communication vise à présenter l'impact de paramètres microclimatiques sur la performance énergétique des bâtiments dans un quartier compact de Beyrouth. Des simulations numériques de microclimat sont réalisées à l'aide du logiciel ENVI-met. L'étude se concentre sur l'effet des stratégies d'atténuation de l'ICU qui affectent les façades des bâtiments durant les conditions estivales. Les stratégies sont basées sur l'augmentation des surfaces végétalisées, sur la mise en place de jets d'eau et de fontaines, et sur l'augmentation de l'albédo des façades et toitures des bâtiments. L'effet des mesures d'atténuation de l'ICU sur la demande de refroidissement est évalué à l'aide du logiciel Hourly Analysis Program. Les résultats montrent la capacité des scénarios proposés à modifier les charges de climatisation à la fois sensibles et latentes.

MOTS-CLÉS : Îlot de chaleur urbain, Performance énergétique, charge de climatisation.

ABSTRACT. It is clear that a direct interaction exists between building and microclimate mostly in the urban areas. Therefore, urban heat islands "UHI" is an important factor in the energy building consumption especially in the Mediterranean climate. This research aims to present the impact of microclimate parameters on building energy performance in a compact district of Beirut. Numerical microclimate simulations are realized using Envi-met software. The study focuses on the effect of the UHI mitigation scenarios on the building façades and roof temperatures during summer conditions. The strategies are based on the increase of vegetation surfaces, implementation of water sprays and fountains, and increase the albedo of the urban surfaces and buildings facades and roofs. The effect of the ICU mitigation measures on the cooling demand is evaluated using Hourly Analysis Program. Furthermore the effect of the proposed adaptation measures on the energy cooling demand is also evaluated showing the capacity of the suggested scenarios to decrease the air conditioning load.

KEYWORDS: Urban heat island, Building energy performance, cooling load.

1. INTRODUCTION

Le phénomène d'urbanisation a induit en saison chaude un microclimat connu sous le nom d'îlot de chaleur urbain qui est défini par une augmentation significative de la température des zones urbaines par rapport aux zones environnantes. Ce phénomène qui a des impacts sur l'environnement, la santé humaine, les écosystèmes terrestres et aquatiques, présente aussi des conséquences sur la

performance des bâtiments ainsi que sur les consommations énergétiques. L'effet du microclimat urbain sur la performance des bâtiments a fait l'objet de plusieurs études numériques. (Bozonnet 2006) a étudié au moyen des simulations thermo-aérauliques, l'effet d'îlot de chaleur urbain sur la demande énergétique de climatisation d'un bâtiment dans le cas typique d'une rue canyon. (Bouyer 2011) a réalisé le couplage d'un modèle thermo-radiatif avec le logiciel Fluent pour étudier l'énergétique des bâtiments dans un contexte urbain. Enfin, la performance énergétique d'un bâtiment individuel a été le sujet des travaux de simulation de Yang et al (Yang 2012) au moyen des logiciels Envi-met et EnergyPlus. L'objectif de cette étude est ici d'étudier l'interaction entre le microclimat urbain et le bâtiment, en termes de charges de climatisation, dans le cas d'un quartier méditerranéen à Beyrouth, notamment lorsque l'on a recours à des méthodes de réduction des ICU.

2. LE PHENOMENE D'ÎLOT DE CHALEUR URBAIN A BEYROUTH

Le Liban est un pays méditerranéen ayant une superficie totale de 10 452 km². 87% de sa population vit dans les villes et les zones urbaines (Kaloustian 2015). Sa capitale Beyrouth est classée comme étant un territoire artificialisé (DAR-IAURIF 2005), avec une densité urbaine très élevée de 400 000 habitants répartis sur 21,47 km² (MOE 2001). Ces données soulignent l'importance de l'étude du phénomène d'îlot de chaleur urbain dans une ville dense comme Beyrouth. Les travaux de McCarthy ont montré que l'intensité de l'îlot de chaleur à Beyrouth est importante. En effet, celle-ci est plus élevée que celle observée à Athènes et Alexandrie (McCarthy 2009). En 2015, Kaloustian et al (Kaloustian 2015) utilisent le modèle TEB de MétéoFrance pour comparer 5 différentes zones de Beyrouth ; une différence de température de 6 °C est observée entre une région végétalisée « Horsh Beyrouth » et une autre région très dense « Bachoura ».

3. METHODOLOGIE

3.1. LOGICIEL DE SIMULATIONS MICROCLIMATIQUES

Les simulations microclimatiques sont réalisées avec le modèle tridimensionnel disponible dans le logiciel Envi-met (Huttner 2012). Ce logiciel développé par M. Bruse (Bruse 2004) permet d'intégrer un grand nombre de phénomènes physiques à l'échelle d'un quartier, comme l'écoulement d'air entre les bâtiments, l'échange entre le sol et les parois des bâtiments, et l'effet de la végétation et des sources d'eau. Ce modèle tridimensionnel permet aussi de modéliser une scène urbaine avec une résolution spatiale ajustable allant de 0,5 à 10 m et un pas de temps variant entre 1 et 10 s.

3.2. MODELE DU CALCUL DES CHARGES

Pour calculer les charges de climatisations, HAP Hourly Analysis Program (programme d'analyse horaire des charges) version 4.9 a été utilisé (Carrier 2015). Celui-ci, très répandu en bureaux d'études, permet de calculer les charges de climatisation et les consommations énergétiques des bâtiments. Ce logiciel utilise la méthode de la fonction de transfert « TFM » appelée aussi la méthode des facteurs de réponse qui a été validée par l'ASHRAE (ASHRAE 1997).

3.3. COUPLAGE ENTRE ENVI-MET ET HAP

Les données météorologiques de température et d'humidité extraites des simulations réalisées avec Envi-met définissent les entrées météorologiques de HAP. Les valeurs moyennes horaires entourant le bâtiment étudié extraites de chaque simulation, définissent les données météorologiques dans HAP. L'effet de l'ombre sur le profil du flux solaire maximal est pris en considération en utilisant un facteur

multiplicateur. La méthodologie consiste à comparer les charges de climatisation d'une journée d'été entre le cas initial et plusieurs scénarios de limitation d'ICU.

4. ETUDE DE CAS

4.1. DESCRIPTION DU QUARTIER

Le quartier étudié se situe dans la région « Dora » qui est une banlieue située au Nord-Est de la capitale Beyrouth. Le quartier choisi, de dimensions surfaciques 210 mx350 m, est très dense comme indiqué sur la figure 1. La hauteur des bâtiments varie entre 5 m et 36 m. La largeur des rues secondaires séparant les bâtiments est très étroite et ne dépasse pas les 5 mètres dans certaines zones.

Les surfaces végétalisées dans le quartier étudié sont presque négligeables avec un pourcentage d'environ 0,3% comme indique le tableau 1. On remarque dans le tableau 2 que les surfaces recouvrant le quartier sont à faible albédo.



Figure 1 : Image du quartier étudié à Dora Beyrouth, Google Earth (à gauche), modèle 2D créé avec Envi-met (à droite).

Cas étudié de la région Dora	Bâtiment	Route en asphalte	Trottoirs en béton	Surface végétalisée	Total
Aire (m ²)	24875	46228	2175	222	73500
Pourcentage (%)	33,84	62,9	2,96	0,3	100

Tableau 1 : Fraction des surfaces couvrant le quartier.

Surface	Murs extérieurs	Toiture	Route en asphalt	Trottoirs en béton
Albédo	0,3	0,3	0,2	0,4
Emissivité	0,9	0,9	0,9	0,9

Tableau 2 : Albédo et émissivité des parois des bâtiments, des routes et des pavements pour le modèle initial.

4.2. SIMULATION AVEC ENVI-MET

La maille créée avec Envi-met est formée de 105x140x30 pixels dont chaque pixel correspond à une résolution réduite de 2m x 2,5m x 2,5m (dx=2m, dy=2.5m et dz=2.5m). 12 récepteurs sont installés dans le modèle dont la distribution est indiquée dans la figure 1. Il est à noter que les récepteurs correspondent à une station permettant de capter les résultats microclimatiques simulés comme la température et l'humidité. Les simulations sont effectuées pour une journée typique d'été durant une période de 24 heures. Le temps de départ du calcul est 7h pour la journée 9 juillet. Pour les conditions initiales, nous avons retenu : vitesse de vent de 1 m/s, direction du vent 245° avec le nord,

température 26,85 °C et humidité relative de 65%. La fonction « forçage simple » a été utilisée pour créer un profil des conditions aux limites pour chaque heure de la simulation. Les valeurs représentent la moyenne des températures et d'humidité relative aux alentours des bâtiments extraites d'un sous-modèle simulé avec Envi-met. Pour identifier l'effet des techniques de limitations d'îlot de chaleur, une comparaison entre le modèle initial et 3 autres modèles, a été réalisée :

1. Modèle « Vert » : 5380 m² du quartier ont été végétalisés par implémentation du gazons et des rangées d'arbres.
2. Modèle « Blanc » : Utilisation d'un albédo plus élevé pour le sol et les surfaces extérieures des bâtiments. L'albédo 0,2 de l'asphalte ordinaire a été remplacé par 0,5 en utilisant l'asphalte à texture rouge. Un revêtement plus clair est choisi pour les trottoirs (albédo de 0,8 au lieu de 0,4). Les façades du modèle initial d'albédo 0,3 sont remplacées par des façades en PVC d'albédo 0,7. Les toitures sont aussi modifiées en les recouvrant par des tuiles « Terracotta » d'albédo 0,5 au lieu de 0,7.
3. Modèle « Bleu » : Mise en place de 5 fontaines d'eau de hauteur 4 m, et des brumisateurs d'eau P1 et P2 avec un jet d'eau à une hauteur de 3,75 m, comme indique-la figure 2. P1 correspond à une ligne continue de jet d'eau, alors que P2 désigne que la distance entre une source et une autre correspond à un pixel dx ou dy. L'émission horaire des sources d'eau est de 5 µg/s et le diamètre de la particule est de 10 µm.

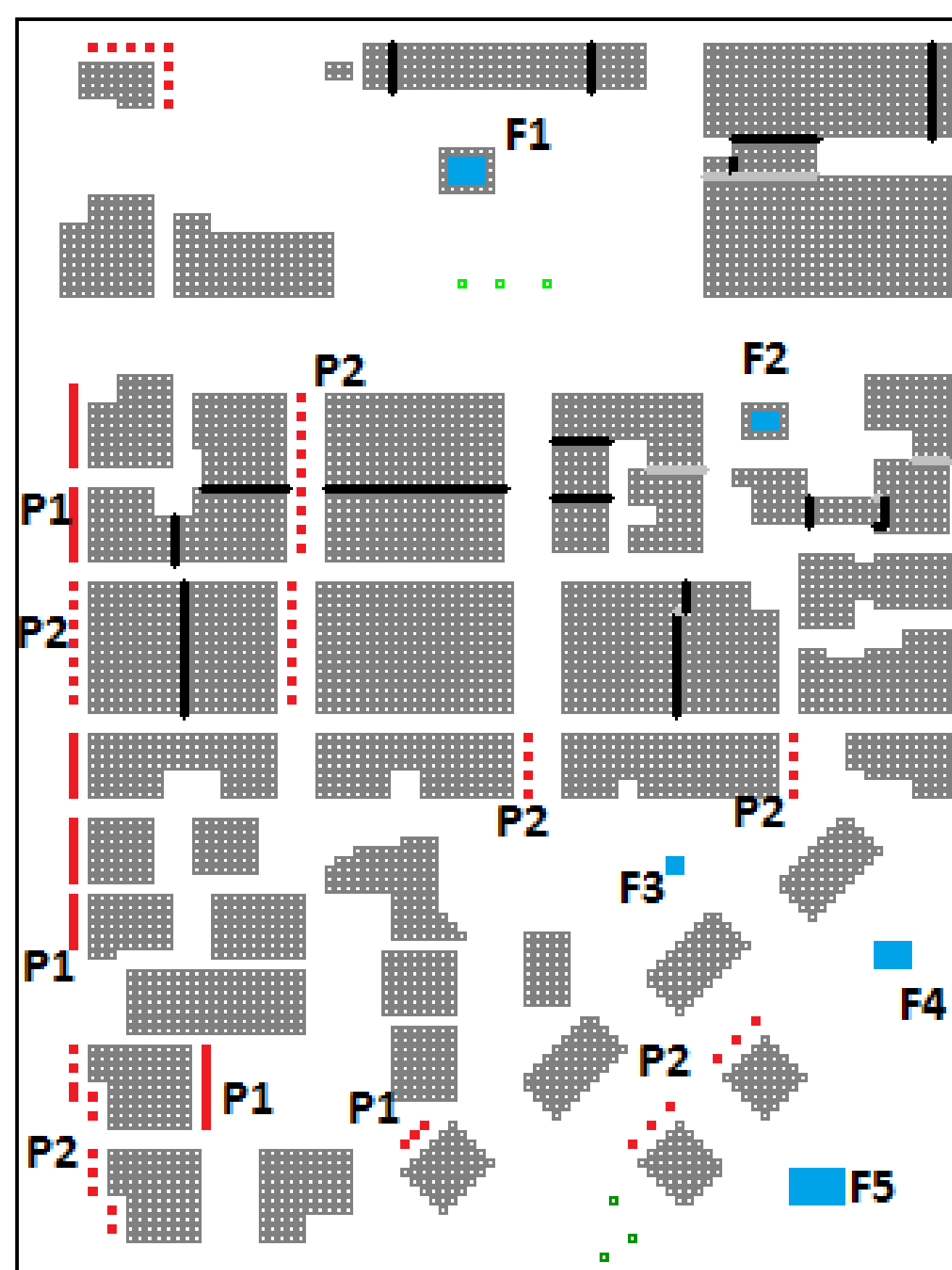


Figure 2 : Modèle 2D du modèle « Bleu » créée par Envi-met.

Fontaine	F1	F2	F3	F4	F5
Surface (m ²)	60	30	20	60	120

Tableau 3 : Surface des fontaines placées dans le modèle « bleu ».

4.3. CHOIX DU BATIMENT ET DONNEES D'ENTREE DE HAP

Le bâtiment choisi pour le calcul des charges de climatisations est illustré dans la figure 3. Cet immeuble est choisi comme étant le bâtiment le plus sensible en même temps aux trois scénarios « Vert », « Blanc » et « Bleu ». Les calculs effectués avec Envi-met ont montrés que l'effet des 3 modèles de limitation d'ICU est ici bien remarquable à la fois sur la température et l'humidité, le jour

comme la nuit. La hauteur du bâtiment est de 28 m, avec une surface de 225 m² pour chaque étage. Les fenêtres sont à simple vitrage : le coefficient de transmission thermique « U » est de 5 W/m².K, le coefficient d'ombre total « SC » est de 0,78. Les caractéristiques des parois extérieures du bâtiment sont conformes aux données utilisées dans Envi-met. Le débit d'air d'infiltration ou de renouvellement d'air est de 1 volume par heure. Pour les gains internes, nous supposons : 25W/m² pour l'éclairage, équipements électriques 900W, et 20 personnes dégageant chacune une chaleur sensible de 71,8 W et chaleur latente de 60,1 W.

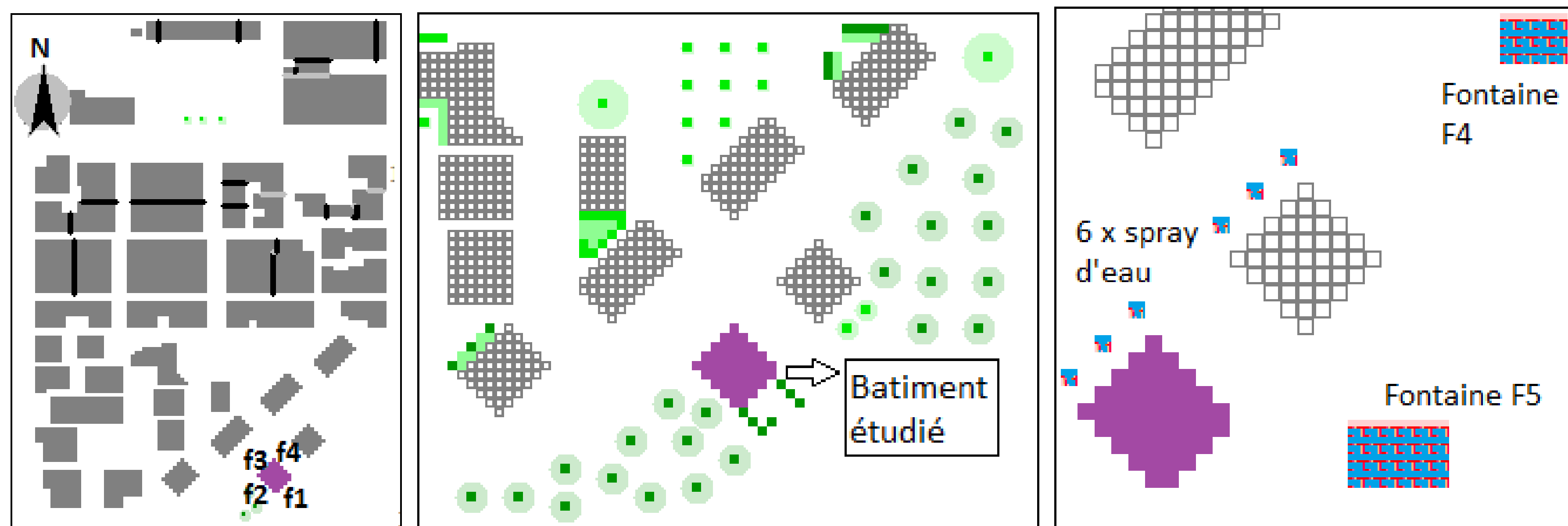


Figure 3 : Modèle 2D du cas initial montrant l'orientation du bâtiment choisi avec ses 4 façades (à gauche), le bâtiment dans le modèle vert (au milieu) et dans le modèle bleu (à droite).

5. RESULTATS

5.1. TEMPERATURES SURFACIQUES DES PAROIS DU BATIMENT

Dans cette partie nous discutons l'effet des 3 scénarios sur la température surfacique des façades à une hauteur de 1,75m, ainsi que leurs impacts sur la température surfacique des toits. Les résultats montrent que l'effet de ces scénarios varie d'une façade à une autre et dépend de la position de la végétation et des sources d'eau installées. La variante verte donne des températures surfaciques plus fraîches surtout dans les heures ensoleillées. L'effet maximal est observé au niveau de la façade f1 orienté vers le sud-est avec une diminution de 12,15 °C à 9h, dû à l'ombre créée par les arbres rajoutés juste devant cette façade. Pour la variante bleue, une faible diminution de la température surfacique est observée de jour comme de nuit. Autour de minuit, cette diminution atteint sa valeur maximale de 1,6°C sur les façades f3 et f4. En effet l'évaporation des gouttelettes d'eau conduit à une diminution de la température de l'air, et par suite de la température des façades.

Finalement, comme attendu, la variante blanche conduit à des températures des façades plus fraîches durant la nuit du fait du pouvoir réfléchissant des façades. Cet écart atteint une valeur maximale de 1,5°C à 3h sur la façade f3. En revanche un comportement contradictoire est observé dans certaines heures ensoleillées de la journée. La température des façades a augmenté et atteint un maximum de 2,5°C pour f3 et de 1,5°C pour f4. Ce comportement est expliqué par la réflexion des rayonnements entre le sol et les bâtiments et la position d'autres bâtiments devant les façades f3 et f4 qui conduit aux piégeages des rayonnements.

D'une autre part, pour la température des toits, l'effet des modèles « vert » et « bleu » sur la température surfacique du toit est presque négligeable. Ce résultat est attendu étant donné que la hauteur des bâtiments est très élevée par rapport aux arbres (hauteur maximale de 15 m) et aux effets des sources d'eau. Pour la variante blanche, l'effet est bien remarquable. La variation horaire de la température surfacique du toit du bâtiment choisi est montrée dans la figure 4 pour le modèle initial et

le modèle blanc. Le graphe montre clairement que le pouvoir réfléchissant de l'albédo élevé permet une diminution importante de la température surfacique du toit. A 13h, l'écart maximal d'environ 13°C est observé. Par contre durant la nuit, les températures des toits sont presque semblables à celles du modèle initial. Ceci est lié au fait qu'une surface à fort albédo provoque une réflexion élevée seulement dans un environnement radiatif solaire (courtes longueurs d'onde).

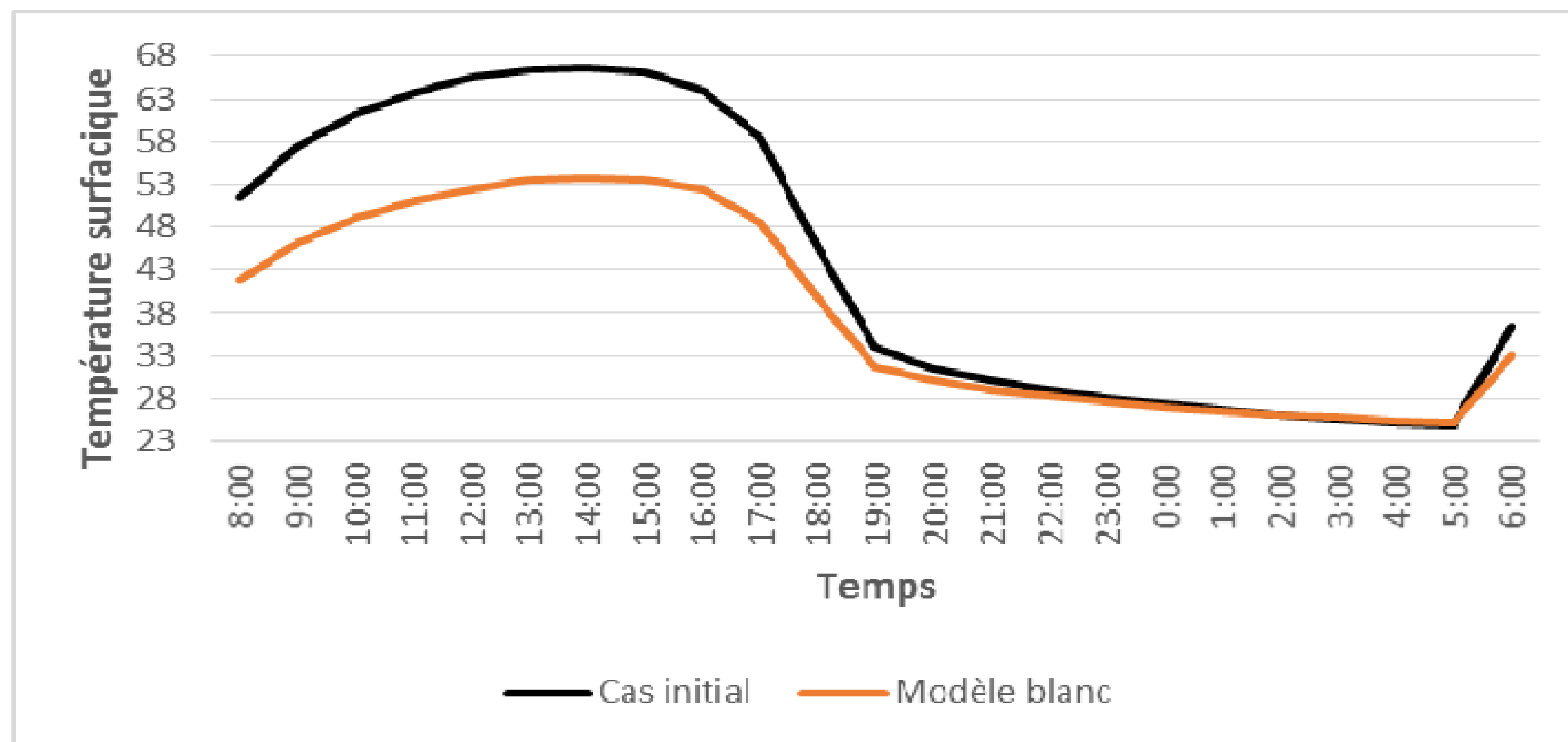


Figure 4 : Température du toit du bâtiment choisi pour le modèle initial et le modèle blanc.

5.2. CALCUL DES CHARGES DE CLIMATISATION

Les résultats précédents ont clairement montré qu'une interaction directe existe entre l'îlot de chaleur urbain et le bâtiment. Dans ce qui suit, l'effet des dispositifs de limitation d'ICU sur les charges de climatisations du premier étage du bâtiment étudié, est présenté. Le graphe de la figure 5, montre clairement que les variantes « verte » et « bleue » provoquent une diminution de la charge sensible tout au long de la journée, alors que le modèle blanc conduit à une augmentation de cette charge. A 16h, lors de la charge sensible maximale, le modèle vert produit une diminution de 2,9 kW (environ 8%) par rapport au cas initial. Cette réduction est due principalement à l'effet d'ombrage créée par les arbres qui réduit les flux solaires totaux tombant sur l'enveloppe de l'étage. D'autre part, la variante bleue permet de diminuer la charge sensible à 16h de 4%. En effet les sources d'eau ont provoqué une diminution de la température ambiante d'environ 1,2°C permettant la réduction de la charge sensible. A contrario, le modèle blanc a conduit à une augmentation de la charge sensible qui

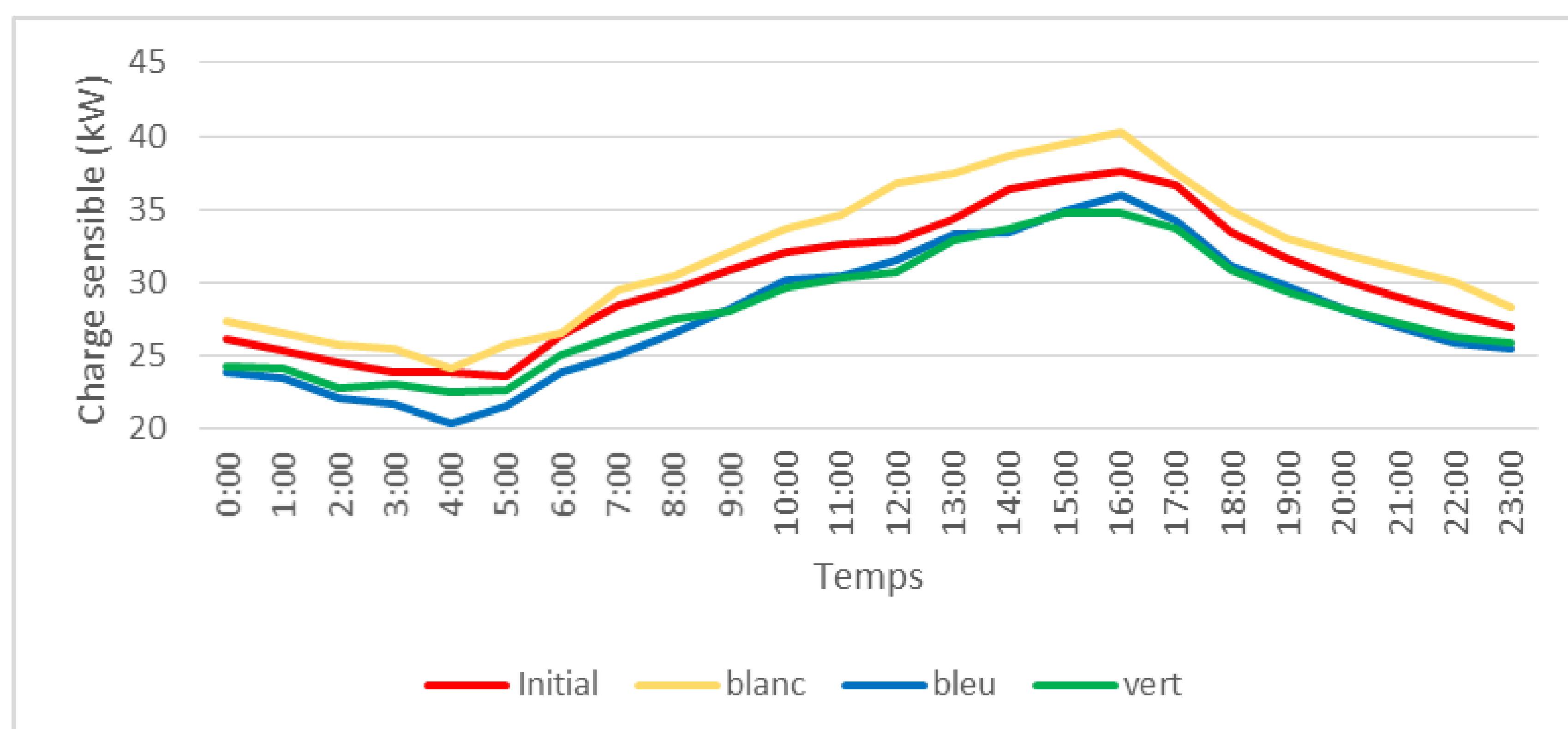


Figure 5 : Variation horaire des charges sensibles pour les 4 modèles.

est de l'ordre de 7% à 16h au moment où la charge est maximale. L'albédo élevé du sol ainsi que celui des façades des bâtiments, provoquent des multi-réflexions des rayons solaires qui sont responsables de cette augmentation de la charge sensible. Cependant l'adoption d'un albédo élevé pour toutes les surfaces du quartier n'est pas efficace sur la consommation énergétique.

Pour la charge latente, comme prévu le modèle bleu provoque un accroissement de cette charge durant les 24 heures de simulation due à l'augmentation de l'humidité relative causée par l'évaporation de l'eau. L'écart de l'humidité relative atteint les 13% dans certaines heures. A 16h, la charge latente a augmenté d'environ 17%, à contrario les modèles « vert » et « blanc » affectent faiblement la charge latente en la diminuant de 100W, soit un pourcentage de 2%.

Pour la charge totale de climatisation, le modèle vert semble le plus efficace avec une diminution de 7% à 16h. Bien qu'il ait conduit à une augmentation importante de la charge latente, le modèle bleu permet une diminution de 2% de la charge totale. Alors que pour le modèle blanc, les simulations ont montré que ce modèle provoque une augmentation des charges de climatisation qui atteint les 6% à 16h.

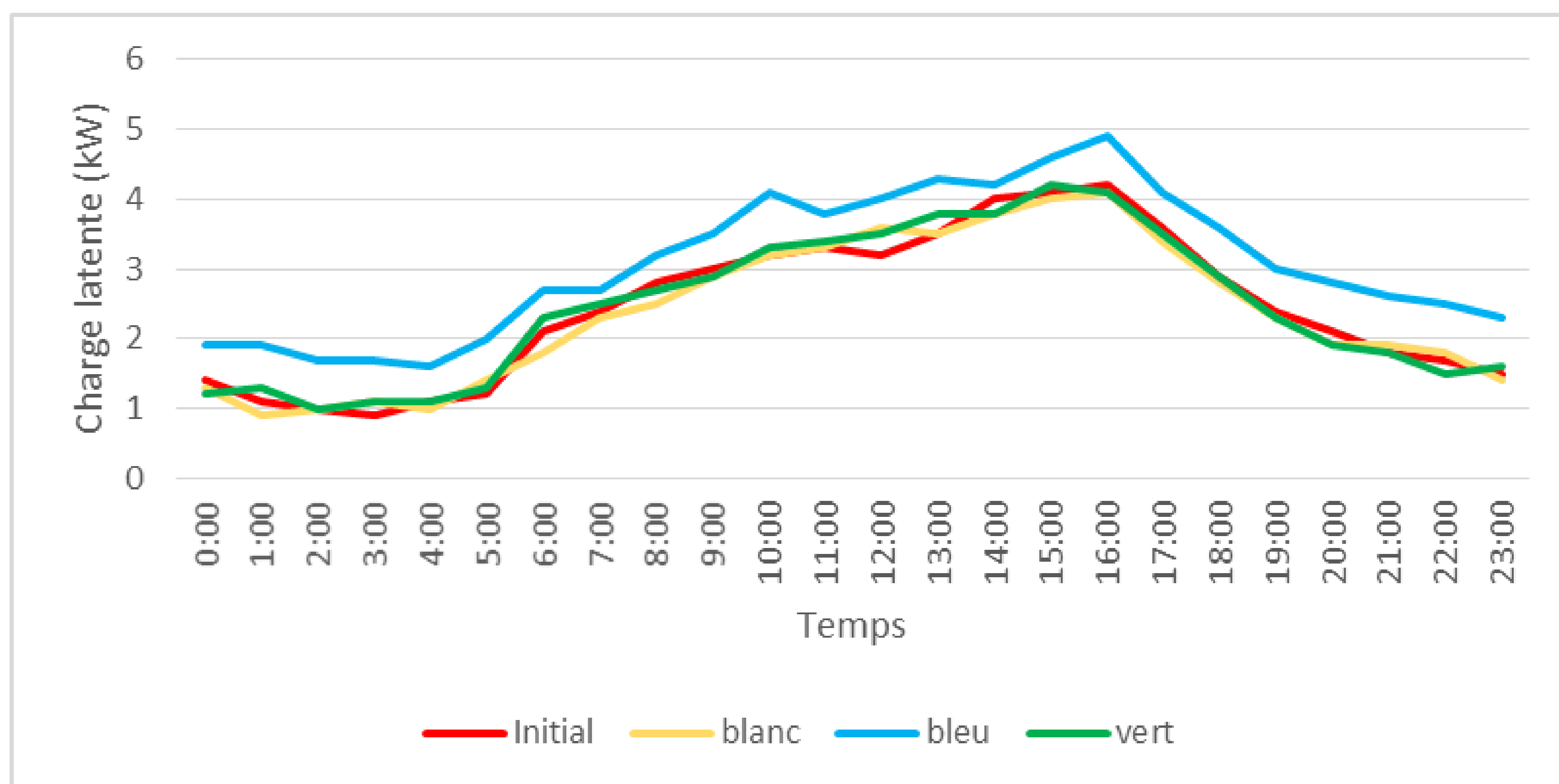


Figure 6 : Variation horaire des charges latentes pour les 4 modèles.

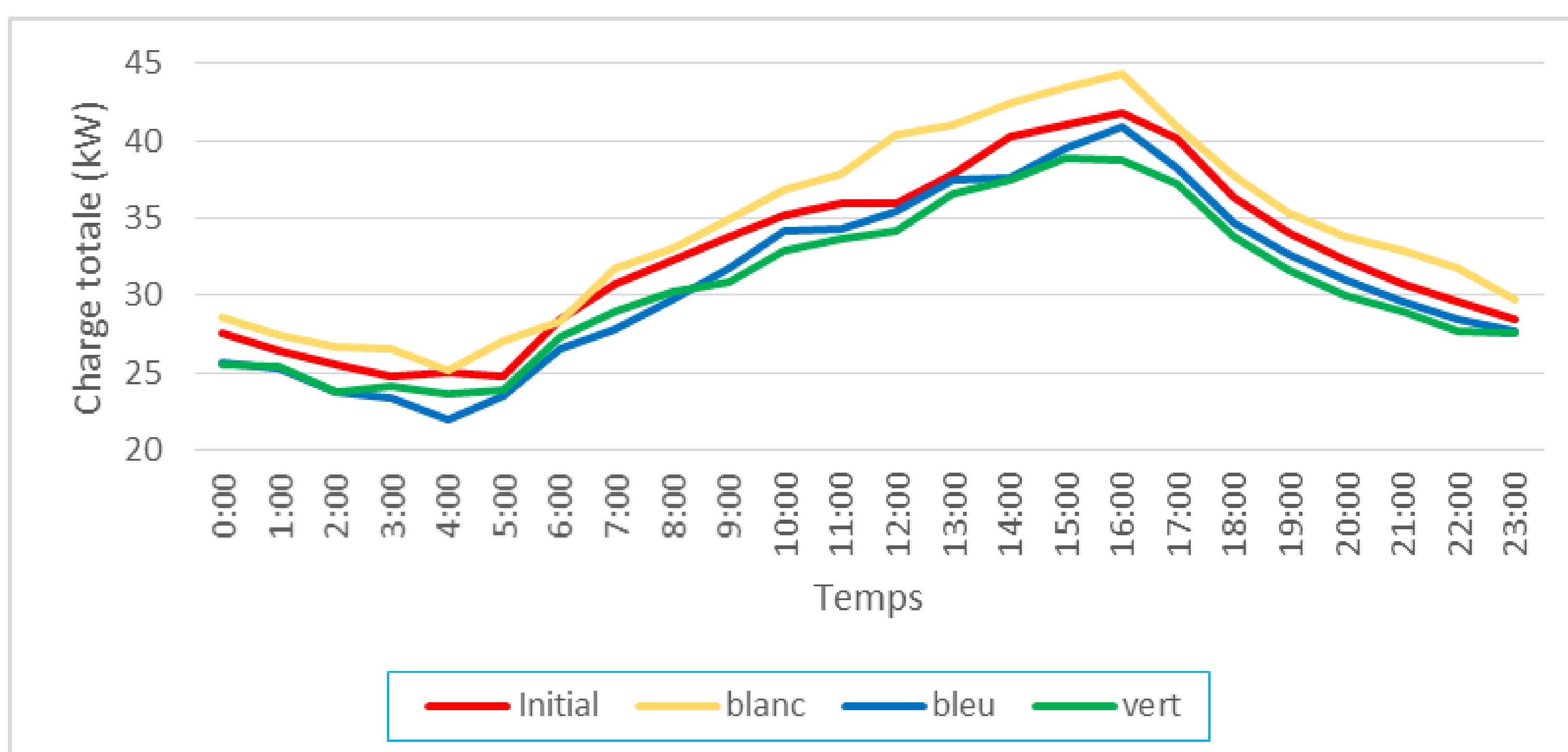


Figure 7 : Variation horaire des charges totales pour les 4 modèles.

Les charges en kWh sur toute la journée sont indiquées dans le tableau 4. Le modèle vert se montre le plus efficace pour la réduction des charges totales de climatisation avec un écart de 46,2 kWh, provoquant une diminution d'environ 6%. Pour la variante bleue, l'augmentation de la charge latente est observée tout au long de la journée provoquant une augmentation de 15,2 kWh. Mais cette variante a conduit à une diminution importante de la charge totale qui atteint les 5% par rapport au cas initial. L'albédo élevé du modèle blanc entraîne une augmentation de la charge totale de 6%.

Charges	Modèle initial	Modèle blanc	Modèle bleu	Modèle vert
Sensible (kWh)	720,7	761	667,5	673,9
Latente (kWh)	58,5	57,2	73,7	59
Totale (kWh)	779,2	818,2	741,2	732,9

Tableau 4 : Charges de climatisation en kWh intégrées sur la journée étudiée.

6. CONCLUSION

Notre travail, basé sur le couplage du logiciel microclimatique Envi-met avec HAP, a permis d'évaluer l'effet de dispositifs d'atténuation d'ICU sur les charges de climatisations, sous climat méditerranéen. Les résultats semblent mettre en avant l'efficacité des modèles verts dans la réduction de la charge climatique surtout en ce qui concerne la part sensible. Notre étude a aussi montré que les sources d'eau provoquent une augmentation importante de la charge latente, alors que le modèle blanc ne semble pas une solution fiable pour obtenir une réduction des charges en été sous climat méditerranéen.

7. BIBLIOGRAPHIE

ASHRAE. 1997. *ASHRAE Handbook 1997, Fundamentals*.

Bozonnet, E. 2006. "Les microclimats urbains et la demande énergétique du bâti." *XXIVèmes Rencontres Universitaires de Génie Civil 2006*.

Bouyer J., C. Inard, M. Musy. 2011. "Microclimatic coupling as a solution to improve building energy simulation in an urban context." *Energy and Buildings* 43 1549–1559..

Bruse, M. 2004. "ENVI-met 3.0: Updated model overview. Research gate."

Carrier 2015. "HOURLY ANALYSIS PROGRAM. QUICK REFERENCE GUIDE. HAP v4.91. 9th Edition."

DAR-IAURIF. 2005. "National Physical Master Plan of the Lebanese Territory (NPMPLT) (Final). Prepared for: Council for Development and Reconstruction (CDR)."

Huttner, S. 2012. "Further Development and Application of the 3D Microclimate Simulation ENVI-met". Ph.D. Thesis, Mainz university.

Kaloustian N., Diab Y., 2015. "Effects of urbanization on the urban heat island in Beirut." *Urban Climate* 14 154–165.

McCarthy, M., 2009. "CIRCE (Climate Change and Impact Research: The Mediterranean Environment). D11.3.3 Report on the CIRCE urban heat island simulations. Project No. 036961-CIRCE (Final)."

MOE, LEDO, ECODIT. 2001. "Lebanon State of the Environment Report."

Yang X., Zhao L., Bruse M., Meng Q. 2012. "An integrated simulation method for building energy performance assessment in urban environments." *Energy and Buildings* 54 243–251.

Mise en place de Contrat de Performance Énergétique pour le parc hôtelier alpin – Le projet CREnHOM, une approche pluridisciplinaire d'une problématique transfrontalière

Hugo Geoffroy*¹, Christophe Broche², Catherine Buhé¹, Hervé Boileau¹, Gérard Sauce¹

¹ Univ. Grenoble-Alpes, Univ. Savoie Mont-Blanc, CNRS, LOCIE, 73000 Chambéry, France.

² Univ. Grenoble-Alpes, Univ. Savoie Mont-Blanc, CDPPOC, 73000 Chambéry, France.

*hugo.geoffroy@univ-smb.fr

RESUME. Dans le cadre du programme Interreg France-Suisse, le projet CREnHOM, s'inscrit dans l'attente d'une réponse à des préoccupations tant françaises que suisses concernant la réhabilitation énergétique du parc hôtelier alpin et le maintien d'une activité économique en montagne. Ce projet ambitionne de montrer le potentiel du contrat de performance énergétique (CPE) dans le financement de mesures d'amélioration de l'efficacité du parc d'hôtels familiaux de montagne, actuellement vieillissant et énergivore. Pour cela, une réflexion transverse est nécessaire sur les aspects (1) énergétique : préconisation des mesures de rénovation et vérification des performances, (2) sociologique : implication des parties prenantes, (3) juridique : faisabilité réglementaire du contrat et (4) économique : rentabilité du modèle de financement. L'originalité étant de fournir une solution réaliste, efficace et robuste, reposant sur des disciplines interconnectées, mais rarement considérées dans leur ensemble.

MOTS-CLÉS : approche pluridisciplinaire, contrat de performance énergétique, réhabilitation énergétique.

ABSTRACT. As part of the Interreg France-Switzerland program, the CREnHOM project is in anticipation of a response to both French and Swiss concern regarding the energy refurbishment of alpine hotel mid-size scale complexes and preserve economic activity in this mountain. This project aims to show the energy performance contracting (EPC) capacity to pay for the mountain family hotels stock energy increasing measures, which is nowadays made up of an aging and energy intensive heritage. To reach this goal, a transversal reflexion was made on (1) the energy field: refurbishment measure recommendations, and performances verification, (2) sociological: implication of the stakeholders, (3) legal: juridical possibility to create an EPC and (4) economical: profitability of the financial model. Therefore, this interdisciplinary project aims to remove the obstacles related to investment in the energy rehabilitation of mountain family hotels through these different lines of research. The originality is to provide a realistic, efficient and robust solution, based on interconnected disciplines, but rarely considered as a whole.

KEYWORDS: multidisciplinary approach, energy performance contract, energy rehabilitation.

1. INTRODUCTION

Dans le cadre des objectifs européens d'amélioration de l'efficacité énergétique, fixés dans le paquet sur le climat et l'énergie¹, visant à porter à 27% les économies d'énergies d'ici à 2030, un certain nombre de mesures ont été mises en place sur le territoire français telles que la loi de Transition Énergétique pour la Croissance verte ou la loi de Finances 2018. L'un des objectifs de ces mesures est de faciliter, entre autre, la rénovation des bâtiments vieillissants et énergivores. Du côté suisse, la loi Weber fixe la quantité de résidence secondaire (comprenant l'hôtellerie) à 20% du parc immobilier (valeur déjà atteinte dans les zones touristiques), afin de limiter la propagation des « lits froids »,

¹ https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies_fr

ouvrant ainsi un champ à la rénovation du patrimoine existant. C'est dans ce contexte d'objectif commun de réhabilitation et de rénovation que s'inscrit le projet Interreg CREnHOM². En effet, avec un patrimoine hôtelier alpin vieillissant, et une nécessité de regain d'attractivité dû à l'avènement de nouvelles formes d'hébergement (de type location entre particulier e.g. Airbnb), entraînant des difficultés à l'investissement pour la France, ainsi qu'une impossibilité législative d'augmenter le nombre de bâtiments hôteliers pour la Suisse, l'hôtellerie de cette région va devoir s'adapter. La région transfrontalière Alpine s'est fixé comme objectif à travers ce projet de favoriser la rénovation énergétique du parc hôtelier familial à travers la promotion du contrat de performance énergétique (CPE). Le changement du modèle économique de la rénovation, autorisé par le CPE, permettrait de moderniser l'offre de service des hôteliers, réduire (avec des garanties) leurs coûts de fonctionnements, et maintenir, voire développer leur attractivité. Pour ce faire, ce projet international regroupe des partenaires académiques (USMB, UFC, HES-SO, HEIG-VD), institutionnels (avec des communes et des cantons), ainsi que des industriels (dix au total dont Barel & Pelletier, Eneos, Cena ingénierie, pour les principaux côté français) afin d'assurer sa faisabilité, d'un point de vue scientifique comme opérationnel.

L'un des atouts de ce projet est son approche pluridisciplinaire du sujet. En effet, contrairement aux démarches habituelles, l'objet d'étude sera analysé à travers plusieurs axes de recherche, permettant ainsi de répondre à la problématique de façon plus globale. Le sujet de la réhabilitation énergétique de l'hôtellerie de montagne à travers le CPE sera donc développé conjointement du point de vue des domaines juridique, sociologique et énergétique. Lors de ce projet une phase de recherche amont, doit servir à la mise en place de méthodologie opérationnelle dans les domaines du droit et de l'énergie. Cette méthode de travail devrait permettre de conduire des actions réalistes, efficaces et applicables, permettant de répondre immédiatement à ce besoin réel.

Les objectifs fixés par le projet CREnHOM sont de comprendre les motivations et les freins des parties prenantes lors de la rénovation énergétique, de trouver des leviers pour augmenter le taux de rénovation grâce au CPE, et donc le nombre d'hôtels rénovés. Il s'agit également de comprendre quel modèle économique mettre en place pour diminuer le risque et assurer un rendement financier des fonds investis, ainsi qu'informer et former des gestionnaires, des professionnels de la construction et des investisseurs.

2. ASPECT ECONOMIQUE

L'aspect économique dans le cadre du projet CREnHOM, concerne la promotion du CPE, et plus particulièrement d'un de leur moyen de financement. En fonction des contraintes juridiques identifiées, le projet s'attachera aussi à étudier l'opportunité de la mise en place d'un tiers investissement par les entreprises parties prenantes du CPE. Dans cette configuration, des entreprises de service énergétique (*Energy Service COmpagny* ou ESCO), financent les travaux à mettre en œuvre dans le cadre du CPE, leur investissement est ensuite remboursé par un pourcentage des économies réalisées durant la durée du contrat. Ce principe est illustré par la *Figure 1*. Cette méthode bien que pratiquée à travers le monde (USA, Chine, Russie...) (Lee, Lam, et Lee 2015; Garbuzova-Schlifter et Madlener 2016), appelée en français « CPE partage d'économie », peine à être mis en œuvre en France. Pourtant celle-ci permet de lever l'un des principaux freins à la rénovation énergétique, à savoir l'investissement, en permettant de relancer l'économie locale, en donnant la possibilité à des entreprises de prendre à sa charge, une partie des risques liés à l'investissement contre rétribution.

² <http://www.crenhom.org/>

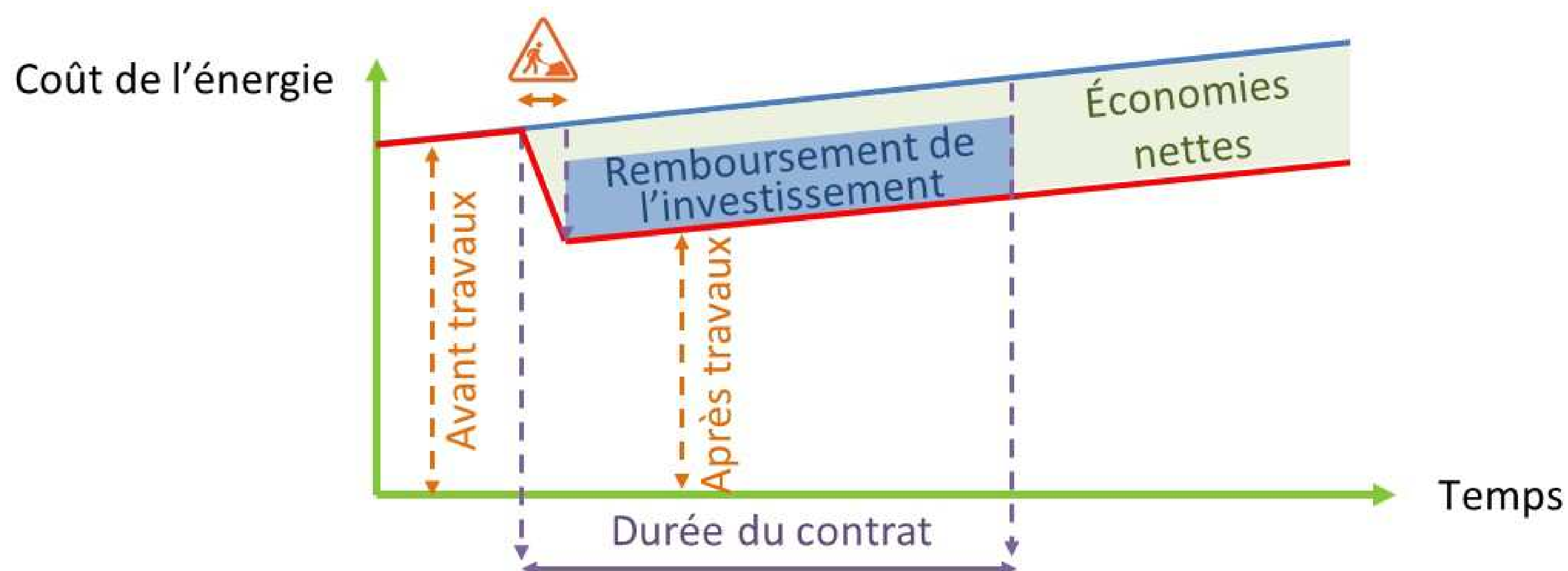


Figure 1 : Tiers investissement adapté de (CDC 2010)

La présence dans le projet de différents acteurs économiques tel que Barel & Pelletier, Eneos, ou Cena côté français, souhaitant vérifier la faisabilité de la mise en place de tiers investissement dans le cadre du CPE de bâtiment privé de petite taille, démontre l'envie des acteurs économiques du bâtiment de se lancer dans ce « modèle économique ».

3. ASPECT JURIDIQUE

Concernant la partie juridique, le travail est effectué par le CDPPOC de l'université Savoie Mont-Blanc. Leur intervention dans le projet doit conduire à l'élaboration de contrat de performance type pour l'hôtellerie de montagne. Pour y parvenir leur travail peut être résumé en deux parties principales qui sont un état de l'art juridique du CPE, ainsi que son élaboration. Le CPE devant avant tout assurer la sécurité juridique des opérations, c'est à dire, minimiser les risques et tendre vers la stabilité et la prévisibilité de la relation contractuelle. C'est pour garantir cet objectif que le travail d'élaboration du CPE type est assuré sous la responsabilité de juristes.

Le travail d'état de l'art a conduit à la conclusion que le CPE ne possède à ce jour aucune réglementation particulière. Il n'est pas directement défini dans les textes de loi français, bien qu'à travers plusieurs lois, le droit français s'intéresse à la performance énergétique. Pour avoir une définition « juridique » du CPE, il faut se référer aux directives européenne (Parlement Européen et Conseil 2006, 2012), le définissant comme « un accord contractuel entre le bénéficiaire et le fournisseur d'une mesure visant à améliorer l'efficacité énergétique, vérifiée et surveillée pendant toute la durée du contrat, aux termes duquel les investissements (travaux, fournitures ou services) dans cette mesure sont rémunérés en fonction d'un niveau d'amélioration de l'efficacité énergétique qui est contractuellement défini ou d'un autre critère de performance énergétique convenu, tel que des économies financières. ».

Néanmoins, cette définition, n'est pas satisfaisante car elle ne fournit pas les éléments constitutifs dudit contrat permettant son élaboration. C'est pourquoi le travail de recherche s'est poursuivi sur les contrats de performance énergétique issus de la pratique. Il en ressort que deux étapes clés doivent être retenues : l'identification du destinataire et du type de CPE. Par identification du destinataire on entend : à qui s'adresse le CPE. En effet et surtout dans la configuration de CREnHOM, avec la mise en place de ces contrats dans l'hôtellerie, l'identification du destinataire et de son statut juridique est essentiel. Par exemple le fait que le gérant de l'hôtel exerce son activité à travers un bail hôtelier (le gérant n'est donc pas propriétaire des murs) alors s'il veut effectuer des rénovations il sera soumis à certains articles du Code du commerce et du tourisme. Il est donc indispensable de connaître le destinataire et son statut juridique, pour concilier l'opération avec les règles spécifiques existantes. Concernant l'identification du type de CPE à mettre en place, cela dépend des mesures et actions qui

seront mises en place en vue d'effectuer des économies d'énergie. Le type du CPE retenu (service, fourniture, travaux, global...) conditionnera l'application des règles ne pouvant pas être écartées par les parties, ainsi que les garanties venant s'ajouter à la garantie de performance énergétique contractuelle (comme la garantie décennale, de parfaite achèvement, ou de vices cachés). Par ailleurs il a été listé le contenu minimal devant être présent pour pouvoir établir un contrat de performance énergétique, ainsi que les clauses permettant de garantir son efficacité, parmi lesquelles on peut lister « la clause de durée des travaux et de suivi de performance énergétique », « la clause objectifs de performance énergétique », « la clause d'investissement », « la clause situation de référence », « la clause d'ajustement », « la clause garantie de performance énergétique ».

La phase d'identification du contenu présent dans le CPE étant effectuée, la seconde partie du travail de recherche mené par les juristes porte sur l'élaboration et la mise en place d'un « contrat type ». En effet dans l'optique de la simplification de ce type de contrat prévue dans le cadre du projet CREnHOM, les différentes configurations du CPE pouvant être envisagées, devront être référencées, afin de permettre l'élaboration de contrat type convenant à toutes les attentes. Ensuite un outil permettant l'élaboration d'un contrat répondant aux attentes spécifiques des bénéficiaires, de façon simplifiée, sera développé.

L'intégralité de ce travail a donc pour objectif final de permettre la création de CPE particularisés, protégeant l'ensemble des parties prenantes, et pouvant être émis de façon simple par des personnes extérieures au domaine du droit.

4. ASPECT SOCIOLOGIQUES

Concernant les enjeux sociologiques, plusieurs axes de recherche sont menés par trois entités de recherche différentes, le LLSETI de l'université Savoie Mont-Blanc, le THÉMA de l'université de Franche-Comté et l'Institut Entrepreneuriat et Management (IEM) de HES-SO Valais Wallis. Ainsi les freins à l'investissement et aux économies d'énergie seront étudiés via des méthodologies de travail et des angles d'approche différents, permettant d'avoir des réponses aux questions soulevées dans le projet.

Les études menées par le LLSETI, sont orientées vers les bénéficiaires directs (gestionnaire) ou indirects (client de l'hôtel) du CPE. L'une d'elle porte sur l'identification des freins et des motivations à utiliser le contrat de performance énergétique. Ces informations seront recueillies via une méthode d'enquête par conversation, issue de l'approche dite coopérative. Cette méthode est également utilisée pour étudier et appréhender les usages des gestionnaires et des clients. Elle permet par le biais de conversation libre, dans une optique itérative, de recueillir des données sans influencer, ni censurer les enquêtés. À la suite de ces entretiens enregistrés, les réponses des enquêtés sont analysées afin de créer une « cartographie » des éléments fournis (attentes, croyances, manière de faire... au regard de l'objet d'étude), permettant de mettre en évidence l'importance et ou l'intrication de ces dernières. Puis de nouveaux entretiens seront réalisés avec le sujet afin de « co-analyser » les premiers éléments dégagés. Conjointement à cette seconde série d'entretiens, des expérimentations peuvent être réalisées pour valider certaines informations fournies par le sujet et étudier leur intrication, afin de retenir un ou des scénarii d'action à retenir.

Une seconde étude menée par l'IEM, est complémentaire à celle menée par le LLSETI. Elle portera aussi sur la recherche des freins et motivations à l'établissement d'un CPE, mais orientée, cette fois, vers les parties prenantes du CPE, via l'approche dite « *quadruple helix* », collaboration de quatre différents acteurs (académiciens, industriels, institutionnels et la société civile). Concrètement, après avoir répertorié les différentes parties prenantes du CPE, elles seront classées d'après leur pouvoir de

décision et leur intérêt à participer au projet. Puis une phase de validation des hypothèses avancées concernant les freins et motivations sera menée grâce à une série d'entretiens qualitatifs semi orientés. Puis viendra une phase de mise en relation de ces différents acteurs afin de trouver des terrains d'ententes pour les différentes parties prenantes, concernant la façon de lever les barrières du CPE. Ainsi ce co-développement permettra d'adapter le CPE actuel à l'hôtellerie.

Les travaux effectués par le THÉMA, reposent sur l'influence sur le long terme des *nudges*. Les *nudges* sont des suggestions indirectes, permettant d'orienter les comportements (Pasche 2013; Thaler et Sunstein 2008; Kendel, Lazaric, et Maréchal 2017), comme des panneaux indiquant les bonnes pratiques en matière d'entretien du linge ou des smileys comparant la consommation d'un individu à celle des voisins. L'objectif de l'étude sera d'analyser l'influence des *nudges* sur le comportement des clients, puis de comparer leur impact vis-à-vis de celles de recommandations orales directes (comme d'éviter des températures de consigne intérieure supérieure à 21°C). Cette étude issue des sciences comportementales dites de communication sera menée via des expérimentations in situ. Pour ce faire des tests seront réalisés dans différents hôtels où quatre groupes d'utilisateurs seront étudiés : le premier recevant des recommandations directes sur des actions permettant de limiter les consommations de chauffage, le second des *nudges* sur les efforts fait par d'autres clients de l'hôtel pour réduire les consommations d'énergie, le troisième des recommandations directes ainsi que des *nudges* et le dernier est un groupe de contrôle ne recevant aucune suggestion. Cette expérimentation sera menée sur un grand nombre de nuitées, ainsi tant l'impact de la forme de la communication de l'information sur le résultat attendu, que son influence sur le long terme, pourront être évalués.

L'intérêt de la « partie sociologique » du projet CREnHOM, réside également dans le fait que plusieurs paradigmes, méthodologies de travail et d'enquêtes cohabitent. Cela d'un point de vue extérieur au domaine de la sociologie permet de ne pas seulement se fier à un modèle d'étude et ainsi pouvoir déterminer des résultats à la problématique, étant fiables sur l'ensemble des approches envisagées sur le sujet. Aujourd'hui des entretiens et leurs analyses sont en cours et un travail de création de questionnaires dans l'optique de déterminer les comportements types de la clientèle hôtelière est effectuée.

5. ASPECT ENERGETIQUE

Concernant la partie énergétique du projet elle sera menée par le LOCIE de l'université Savoie Mont-Blanc, le LESBAT de la Haute Ecole d'Ingénierie et de Gestion du Canton de Vaud. Le travail effectué dans ce domaine concerne la mise en place d'une méthodologie assurant l'élaboration d'un CPE économiquement intéressant. Cette méthodologie a été conçue dans l'objectif de garantir un certain niveau d'économie d'énergie, sans pour autant avoir à réaliser des études et analyses détaillées des bâtiments. L'objectif est en effet de pouvoir réduire les temps d'études et les coûts d'ingénierie liés aux études thermiques pour promouvoir ce CPE et le rendre plus accessible. Pour que l'élaboration de ce CPE soit facilitée, des travaux de recherche doivent être effectués en amont pour intégrer les spécificités de l'hôtellerie de montagne. Ce travail de recherche passe par l'élaboration de « bouquets de travaux » effectuée suite à l'identification de profils types d'hôtel présents en région alpine. Ces travaux sont issus de l'analyse des rénovations les plus efficaces à mettre en place selon le profil de l'hôtel et sont déterminés via des simulations énergétique dynamique. Le travail se déroulera en cinq grandes étapes afin d'assurer, la qualité du processus de rénovation :

- La première étape consiste en la réalisation d'un **pré-audit**, permettant de mettre en évidence les faiblesses énergétiques d'un bâtiment et de pouvoir tester rapidement des actions de rénovation ainsi que d'en quantifier les bénéfices énergétiques. La première partie de ce pré-audit consiste

en une étude macro du bâtiment, réalisée via quelques paramètres simples pour réaliser un premier « tri » des hôtels. Puis une première estimation du potentiel de rénovation, reposant sur une méthodologie dite déductive (Borgstein, Lamberts, et Hensen 2016), sera effectuée à travers un parangonnage (i.e. *Benchmarking*) comportant une trentaine de paramètres (e.g. chiffre d'affaire, nombre de chambre, type de générateur...). Ensuite, le pré-audit à proprement parlé sera réalisé, il s'appuie sur la méthode DPE-3CL, basée sur des calculs statiques, ayant été adapté aux problématiques de l'hôtellerie de montagne.

- Un **audit énergétique**, réalisé conformément à la méthodologie de la norme NF/EN 16247-1/2012.
- La **proposition d'un « bouquet de travaux »** parmi plusieurs choix effectués en amont, permettant de répondre de façon optimum aux aspects énergétiques, environnementaux et économiques. En effet dans le cadre de ce projet, l'élaboration de scénarii de rénovation type, facilitera la mise en place des CPE. Ces « bouquets de travaux » seront issus d'un travail d'optimisation à partir de *Cluster*, ou typologie d'hôtels identifiés, effectué lui aussi sur la base d'un parangonnage (concernant les caractéristiques des hôtels, de leurs systèmes, de leur potentiel de rénovation, de la capacité d'investissement...). Ces scénarii permettront de proposer un paquet de travaux prédéfini en fonction des caractéristiques de ces hôtels, assurant une amélioration globale des performances énergétiques de l'hôtel.
- La mise en place d'une **procédure de contrôle et de vérification** des économies d'énergie réalisées en se conformant par exemple à l'*International Performance Measurement and Verification Protocol* (IPMVP) (EVO 2012), qui permet un contrôle fiable reconnu mondialement et économiquement viable vis-à-vis du retour sur investissement. De plus, l'intérêt de ce protocole est qu'il est en source ouverte au public, ce qui permet de le mettre en place sans qu'il soit pour autant nécessaire de posséder de qualification.
- La mise en place de **commissionnements**, à la livraison et au moins en retro-commissionnement, afin de valider les économies d'énergie et de corriger les fautes et dérives des systèmes.

Ce processus bien que perfectible, a pour ambition d'effectuer des économies d'énergies significatives, grâce à une logique de quantité. En effet, la démarche a pour objectif de favoriser les CPE via une simplification du processus (e.g. choix d'une méthode statique) et ainsi d'augmenter le nombre de bâtiments rénovés, plutôt que de promouvoir des rénovations optimisées au cas par cas, mais moins nombreuses.

6. NECESSITE ET PLUS-VALUE D'UNE APPROCHE PLURIDISCIPLINAIRE

Il est évident que le développement des contrats de performance énergétique passe par la résolution d'un certain nombre de problèmes inhérents aux différentes disciplines englobant le sujet. Néanmoins, la résolution de ces problèmes de façon isolée dans leur domaine ne permet pas la promotion du CPE au sein de la société. En effet, des freins étant communs aux différentes branches, il y a une imbrication de la problématique nécessitant des connaissances et des compétences sur l'intégralité des domaines pour fournir une réponse satisfaisante. Cependant, les compétences pluridisciplinaires étant rare, la nécessité de résoudre les problèmes en collaboration entre plusieurs domaines de recherche de façon collaborative semble évidente pour optimiser les chances de résolution « globale ».

Ce type d'approche permet, par son effet de synergie, de faire avancer la compréhension et les connaissances de ses intervenants sur le sujet de façon efficiente. De plus, l'interconnexion des problèmes, difficulté initiale, se retrouve être un avantage pour l'ensemble des disciplines. Les

connaissances et avancées apportées par les différents acteurs du projet, en augmentant la compréhension du phénomène, permettent de réduire les biais de compréhension et les incertitudes sur de nombreux points du sujet. Certains problèmes inhérents à une discipline étant même résolus par les travaux d'une des disciplines connexes. Par exemple la compréhension des comportements des usagers et des gestionnaires obtenues grâce aux méthodes sociologiques permet une amélioration de la pertinence des simulations, les rendant plus réaliste de manière à réduire les incertitudes qui y sont associées (cf. lien sociologique/thermique *Figure 2*). Les résultats des analyses de sensibilité permettent de déterminer les variables d'ajustements qu'il faut obligatoirement contractualiser dans la partie juridique (cf. lien thermique/juridique *Figure 2*). Ces analyses aident également à visualiser l'impact des comportements humains sur les consommations pour l'élaboration de *nudges* dans la partie sociologique (cf. lien thermique/sociologique *Figure 2*).

La *Figure 2*, illustre l'interconnexion des trois grandes disciplines prises en compte dans le projet CREnHOM pour l'élaboration du CPE. Des exemples d'apport fourni entre les domaines sont représentés par des flèches connectant ces disciplines, alors que les contributions apportées séparément par chacune des disciplines sont présentées dans les cadres en pointillé.

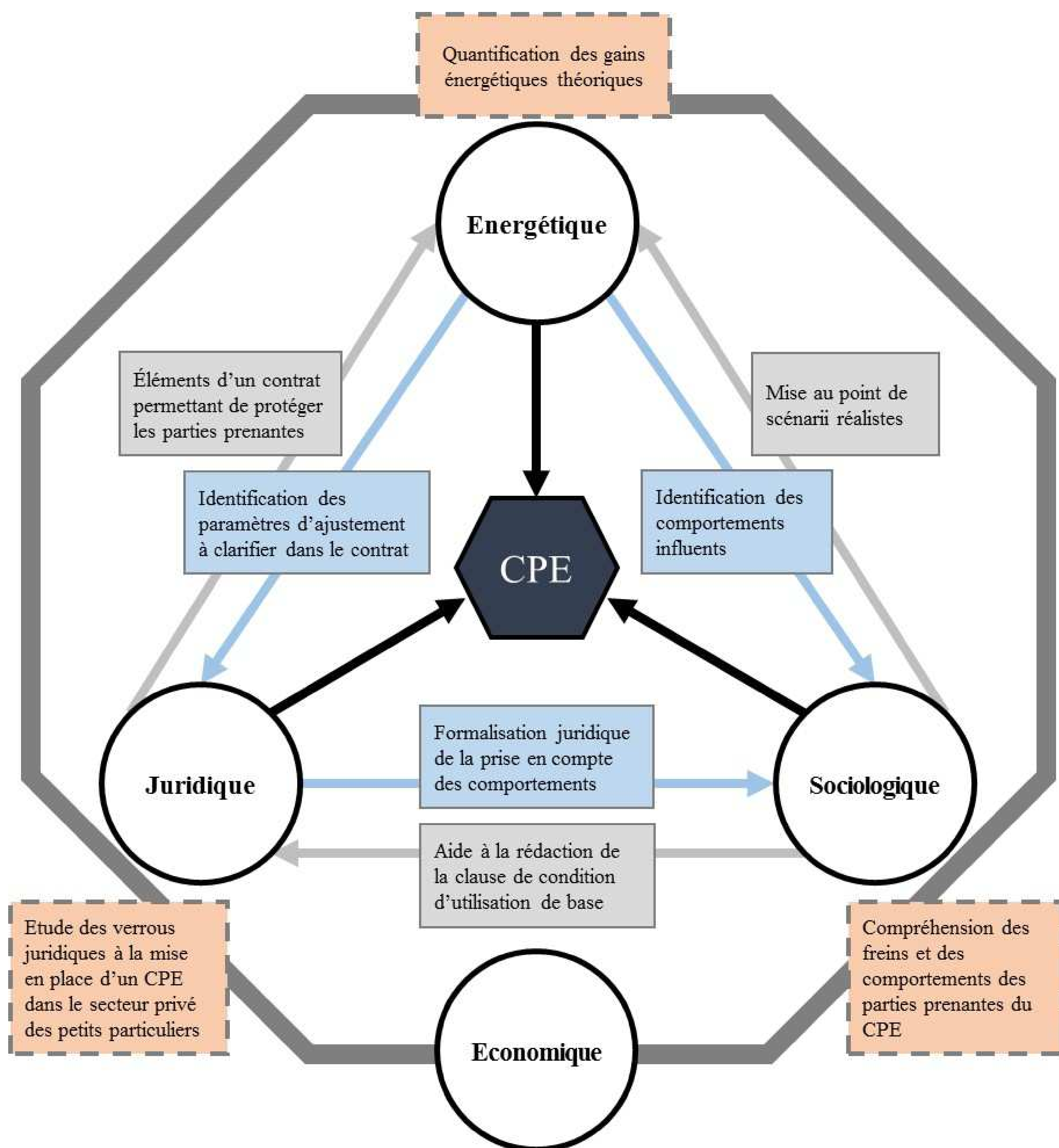


Figure 2 : Interconnexion des disciplines

7. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Le projet CREnHOM est donc issu de l'initiative de chercheurs et entreprises de deux pays frontaliers dans le cadre du programme Interreg pour répondre à la problématique de leur parc hôtelier vieillissant et énergivore. Pour répondre à ce problème commun, le projet se développe autour d'une approche et d'une vision pluridisciplinaire du sujet visant la promotion du contrat de performance énergétique dans la région alpine. Bien que ce type d'approche soit dans son application complexe du fait du haut degré de spécification des différents axes de recherche, de leur langage et vision différente du sujet, l'apport découlant de cette confrontation aux problématiques des disciplines voisines et de la compréhension de leur besoin induit une plus grande prise de conscience du sujet et des enjeux dans leur ensemble. Cette ouverture permet alors de trouver des réponses conçues de manière à satisfaire l'ensemble des disciplines contenant et influençant le projet. Ainsi grâce à cette approche, les solutions préconisées sont optimisées dans le sens où leurs réponses aux problématiques de différents domaines leur permettent de fournir un résultat concret, efficace et applicable en l'état.

L'approche retenue dans le projet de « massification » du CPE, permettant l'augmentation globale de la performance énergétique du secteur dans cette région pourra être étudiée. L'efficacité globale du projet sera évaluée lors d'études complémentaires. Nous comparerons notamment les économies moyennes faites grâce à la méthodologie mise en place aux économies qui auraient été faites avec des méthodes optimisées afin d'estimer l'amplitude de l'impact de cette méthode simplifiée sur les performances énergétiques potentiellement envisageables.

8. REMERCIEMENT

Ce projet est soutenu par le programme de coopération territoriale européen Interreg V France-Suisse et a bénéficié d'une subvention européenne de 607 776,49 € par le biais du Fonds Européen de Développement Régional (FEDER) ainsi que des fonds fédéraux Interreg Suisse pour un montant de 150 001 CHF et de 123 999 CHF d'aide cantonales et communales.

9. BIBLIOGRAPHIE

- Borgstein, E.H., R. Lamberts, et J.L.M. Hensen. 2016. « Evaluating Energy Performance in Non-Domestic Buildings: A Review ». *Energy and Buildings* 128 (septembre): 734-55. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.07.018>.
- CDC. 2010. « Utiliser le “Tiers Investissement” pour la rénovation thermique du patrimoine bâti français, Résumé pour décideurs ». Caisse des dépôts. http://immobilierdurable.eu/images/2128_uploads/cdc_r_sum__tiers_investisseur.pdf.
- EVO. 2012. « Protocole International de Mesure et de Vérification de la Performance énergétique - Concepts et options pour l'évaluation des économies d'énergie et d'eau ».
- Garbuzova-Schlifter, Maria, et Reinhard Madlener. 2016. « AHP-Based Risk Analysis of Energy Performance Contracting Projects in Russia ». *Energy Policy* 97 (octobre): 559-81. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2016.07.024>.
- Kendel, Adnane, Nathalie Lazaric, et Kevin Maréchal. 2017. « What Do People ‘Learn by Looking’ at Direct Feedback on Their Energy Consumption? Results of a Field Study in Southern France ». *Energy Policy* 108 (septembre): 593-605. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.06.020>.
- Lee, P., P.T.I. Lam, et W.L. Lee. 2015. « Risks in Energy Performance Contracting (EPC) Projects ». *Energy and Buildings* 92 (avril): 116-27. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.01.054>.
- Parlement Européen, et Conseil. 2006. *Directive 2006/32/CE. JOUE L 114*.
- . 2012. *Directive 2012/27/EU*.
- Pasche, Markus. 2013. « What can be learned from behavioural economics for environmental policy? » <https://www.econstor.eu/bitstream/10419/85031/1/746328281.pdf>.
- Thaler, Richard, et Cass Sunstein. 2008. *Nudge - Improving decisions about health, wealth and happiness*. New international edition.

Évaluation de l'influence des occupants sur le confort estival : utilisation des analyses d'incertitude et de sensibilité.

Léa Gondian^{1,2,*}, Jeanne Goffart¹, Monika Woloszyn¹, Etienne Wurtz², Catherine Buhé¹, Philippe Maréchal²

¹Univ. Grenoble Alpes, Univ. Savoie Mont Blanc, CNRS, LOCIE, 73000 Chambéry, France.

² Univ. Grenoble Alpes, CEA, LITEN, INES, 73375 Le Bourget-du-Lac, France.

[*lea.gondian@univ-smb.fr](mailto:lea.gondian@univ-smb.fr)

RÉSUMÉ. Dans un contexte de garantie de performance énergétique, l'évaluation de la performance réelle des logements est un nouvel enjeu. Dans les constructions récentes de type BEPOS (bâtiment à énergie positive) le comportement des occupants est connu pour avoir un impact fort sur la performance énergétique. De plus, dans ces nouvelles constructions, l'évaluation du confort estival est attendue. Dans cette étude, une méthodologie d'évaluation de la performance estivale d'une maison individuelle BEPOS vis-à-vis de comportements réalistes des occupants est présentée. Elle se base sur des analyses d'incertitude et de sensibilité (méthode RBD-FAST). Sur une étude de cas, la démarche employée a montré que la température opérative est jusqu'à 8.6 °C plus élevée suivant les comportements et que la gestion des volets roulants entre 14 h et 20 h est le paramètre le plus influent. Ainsi, en phase de conception, il est possible de proposer des solutions adéquates et/ou d'informer les futurs occupants des dispositions à prendre pour maintenir le confort estival dans leur maison.

MOTS-CLÉS : confort estival, analyse de sensibilité, comportement des occupants

ABSTRACT. In order to guarantee the energy performance of buildings, assessing the energy consumption under real conditions of usage is a new challenge. In newly built houses as positive-energy buildings, the occupant's behaviour is known to be a very important factor for the building's performance. Moreover, evaluating summer comfort in these buildings is also a new issue. In this paper, an approach based on uncertainty and sensitivity analyses (RBD-FAST method) is presented and evaluates the summer performance of a building according to different realistic occupant's behaviour. A case study shows that operative temperature can vary up to 8.6 °C depending on behaviours and that roller blinds position between 2 pm to 8 pm is the most influential parameter. Therefore, new proposals for the design of future buildings can be done and/or future inhabitants can be better informed about how to manage their house.

KEYWORDS : summer comfort, sensitivity analysis, occupants' behaviour

1. INTRODUCTION

Afin de réduire la demande énergétique et les émissions de CO₂ du secteur du bâtiment, les nouvelles constructions doivent répondre à de nouvelles normes de conception. Les constructions récentes de type BEPOS (bâtiment à énergie positive) ont une demande énergétique maîtrisée pour le chauffage grâce à une enveloppe ayant une forte étanchéité à l'air et une haute performance isolante. En complément, une conception bioclimatique optimise la valorisation des apports solaires. Ces caractéristiques de conception font que ces nouveaux bâtiments peuvent être sujets à des périodes de surchauffe estivale entraînant de l'inconfort pour les occupants. L'intensité et la fréquence de ces périodes de surchauffe vont dépendre certes des conditions météorologiques mais également de la gestion du bâtiment par

l'occupant et de son comportement. Le comportement des occupants a été identifié comme paramètre clé influant sur les conditions d'ambiance intérieure de ce type de bâtiments comme il peut l'être sur la consommation énergétique (Firląg et Zawada 2013) (Vorger 2014).

Il est primordial de s'assurer que les nouvelles constructions seront capables de répondre au confort des occupants et non uniquement à la performance énergétique. Pour répondre à cette problématique, ces travaux portent sur une méthodologie d'évaluation de la performance estivale d'une maison individuelle BEPOS s'appuyant sur des analyses d'incertitude et de sensibilité en phase de conception. Dans un premier temps, des paramètres liés au comportement des occupants et susceptibles d'influer sur la température intérieure en période estivale ont été sélectionnés comme variables d'étude. Puis, des plages de variation, cohérentes avec des usages dans une maison individuelle BEPOS, ont été associées à chacun des paramètres. Enfin, la méthodologie a été appliquée à un cas d'étude. Suivant les résultats obtenus, les concepteurs sont en mesure de mettre en place les solutions adéquates et/ou d'informer les futurs occupants des dispositions à prendre pour maintenir le confort estival dans leur maison.

2. MÉTHODOLOGIE

2.1. OBJECTIFS

Les objectifs de la méthodologie sont d'évaluer la capacité d'une maison individuelle de type BEPOS à maintenir une ambiance intérieure confortable pour différents comportements des occupants et de retrouver parmi ces conditions d'usage, la/les plus influente/s sur le confort.

2.2. DEMARCHE

La démarche consiste à coupler des analyses d'incertitude et de sensibilité au modèle de simulation thermique dynamique du bâtiment étudié. Pour répondre aux objectifs fixés, les paramètres d'entrées des analyses sont des conditions d'usages susceptibles de modifier les conditions d'ambiance intérieure. Ces paramètres permettent de rendre compte de la diversité des sollicitations engendrées par les actions des occupants : aéraulique, apports internes, apports externes, et permettent également de dissocier les effets d'une même action sur différents moments de la journée. Les paramètres d'entrées retenus sont : la chaleur sensible dégagée par les occupants « actifs », la chaleur sensible dégagée par les occupants « au repos », la position des volets roulants sur 3 plages horaires (de 8 h à 12 h, de 12 h à 14 h, et de 14 h à 20 h), la puissance électrique consommée sur 3 plages horaires (de 6 h à 8 h, de 12 h à 14 h, et de 20 h à 22 h), la puissance électrique consommée en continu, le débit de renouvellement d'air pendant une ouverture de fenêtre de 10 minutes à 3 moments de la journée (7 h, 12 h, et à 20 h) et le débit de surventilation mécanique nocturne. En tout, 13 paramètres ont été retenus. Les plages de variation des paramètres sont définies de manière à éviter une sous-estimation ou une surestimation de l'influence d'un paramètre sur la sortie observée et sont cohérentes avec des usages mesurés ou usuellement utilisé dans le cas de maisons individuelles récentes. L'étude des plages de variation pour chacun des paramètres est présentée au paragraphe 2.4.

Plusieurs centaines de simulations sont effectuées. Entre chaque simulation, les valeurs prises par les 13 paramètres sont modifiées. Deux variables de sortie sont observées pour chaque simulation. La première est la température ressentie par les occupants, ici la température opérative, heure par heure dans une pièce de vie. La deuxième est le nombre de degrés-heures supérieur à 27 °C sur la période donnée. Pour la première variable, l'analyse d'incertitude permet de quantifier la dispersion de la

température ressentie entre les différentes simulations pour chaque heure de la journée et l'analyse de sensibilité permet d'identifier les paramètres qui influent le plus sur la variabilité de la température. L'étude de la deuxième variable permet de dresser un bilan de la performance estivale du bâtiment pour un indicateur de confort simplifié. L'analyse d'incertitude donne la variabilité du confort suivant différentes conditions d'usages et permet donc de juger de la robustesse de la performance recherchée. L'analyse de sensibilité donne une information supplémentaire en estimant l'influence de chaque paramètre sur la variabilité de l'indicateur. L'étude doit porter sur la semaine la plus chaude du fichier météo utilisé.

2.3. CHOIX DES ANALYSES D'INCERTITUDE ET DE SENSIBILITE

L'analyse de sensibilité est une méthode statistique qui permet d'évaluer les paramètres les plus influents sur une distribution de sortie. L'analyse de sensibilité étudie comment des perturbations sur les valeurs prises par les paramètres d'entrée d'un modèle engendrent des perturbations sur la sortie du modèle. La méthode d'analyse de sensibilité retenue est la méthode RBD-FAST (Random Balance Design - Fourier Amplitude Sensitivity Test) qui fournit en sortie une valeur d'indice de sensibilité à chaque paramètre étudié compris sur l'intervalle [0,1]. Plus l'indice de sensibilité d'un paramètre est proche de 1, plus ce paramètre influe sur la sortie observée. Il s'agit d'une méthode dite globale, basée sur la décomposition de la variance fréquentielle permettant de déterminer tous les indices du premier ordre. Dans (Goffart, Rabouille, et Mendes 2015) une description détaillée du fonctionnement et des avantages de cette méthode a été réalisée.

2.4. VARIATION DES PARAMETRES

2.4.1. Prise en compte du métabolisme

Le corps humain génère plus ou moins de chaleur sensible et de chaleur latente en fonction de l'activité, de la taille, de l'âge de l'individu considéré, etc. Pour les variables relatives à la chaleur dégagée par les occupants « actifs » et « au repos », il s'agit de voir dans quelle proportion elles influencent le résultat. Une étude non exhaustive de la littérature permet de retrouver des valeurs prises pour la chaleur sensible dégagée par un adulte dans un bâtiment résidentiel (Table 1).

Source	Chaleur sensible	Commentaires
(Méthode Th-BCE 2012)	90 (actif), 63W (repos)	équivalent adulte
(ISO 7730 2005)	80 (actif)	-
(Gouvernement Wallon 2008)	100W	-
(ASHRAE 2009)	75W	dans un appartement, activité légère à modérée
(DGO4 2013)	entre 70W et 155W	fonction de la température et de l'activité
(Vorger 2014)	100W (actif), 80W (repos)	+ de 10 ans

Table 1: Résumé des valeurs considérées pour le métabolisme pour différentes sources

Le choix a été fait de retenir les valeurs provenant de la RT2012 à +/- 20 W qui est une plage de variation cohérente et conservative au vu de la littérature. Dans le modèle, le scénario de présence retenu est : 2 adultes sont présents et actifs dans le salon de 6 h à 8 h, de 12 h à 14 h et de 20 h à 22 h et au repos dans la chambre de 22 h à 7 h. La présence d'enfant n'a pas été intégrée.

2.4.2. Taux de fermeture des protections solaires mobiles

Les protections solaires mobiles favorisent ou limitent les apports solaires. Dans le cas de volets roulants, le taux de fermeture peut prendre n'importe quelle valeur entre 0 % et 100 %. La position des

volets diffère dans notre modèle pour chaque période d'absence et de présence soient des taux de fermetures pour chaque période suivante : 8 h à 12 h, 12 h à 14 h et 14 h à 20 h.

2.4.3. Équipements électriques

L'énergie dissipée par effet Joule par l'utilisation d'électricité spécifique dans un bâtiment résidentiel comprend l'utilisation des appareils de cuisson, de froid, de lavage, de loisir et de bureautique. Approximer les apports de chaleur de ces appareils n'est pas aisé car il faut tenir compte du temps d'utilisation et de la puissance absorbée par chaque appareil ainsi que du facteur de conversion entre la puissance électrique absorbée et la chaleur dégagée. Il n'existe pas de consensus pour les facteurs de conversion. Ainsi, la mesure de la puissance électrique des appareils dans une habitation ne suffit pas à approximer les apports de chaleur liés à l'électricité spécifique. Les valeurs retenues sont celles provenant de la RT2012 pour les apports nominaux de chaleur soit 5.7 W/m^2 et l'on considère que les appareils en veille représentent 20 % des apports (ratio issu de la RT2012). Pour la chaleur dégagée par les équipements en veille, on associe une incertitude de $\pm 20 \text{ W}$ car ces appareils sont principalement des appareils dits « fermés » pour lesquels le taux de conversion entre chaleur et puissance absorbée est de 1 (Park et al. 2013). Pour les apports liés au fonctionnement ponctuel des équipements, une plage d'incertitude de 100 % est associée. Le scénario d'utilisation de ces appareils coïncide avec les périodes de présence des occupants dans le salon.

2.4.4. Renouvellement d'air lié à l'ouverture des fenêtres

Le renouvellement d'air par ouverture de fenêtres est susceptible de modifier la température ambiante. Des suivis de maisons occupées ont mis en évidence des temps d'ouvertures des fenêtres par les occupants de 20-30 minutes par jour quelles que soient les conditions météorologiques. Ceci peut s'apparenter à une ouverture « hygiénique ». Il s'agit ici de modéliser le débit d'air entrant par l'ouverture des fenêtres. Dans (Vorger 2014), un état de l'art des mesures de temps d'ouverture de fenêtres dans des logements et de débit d'air engendré a été réalisé et permet de retenir une plage de variation pour cette étude comprise entre 0.22 vol/h et 2.7 vol/h . Le scénario d'ouverture de fenêtres intégré dans notre modèle correspond à 3 événements répartis dans la journée (ouverture pendant 10 minutes à 7 h, 12 h et 20 h). Pour ces 3 ouvertures nous faisons varier le taux de renouvellement de 0.22 à 2.7 vol/h

2.4.5. Surventilation mécanique nocturne

La surventilation nocturne est une solution de rafraîchissement disponible avec certains systèmes de ventilation mécanique. Les retours d'expérience ont montré que la valeur du débit de surventilation nocturne était modifiée couramment par les utilisateurs qui changent la vitesse du ventilateur à cause de gênes auditives (Larsen, Jensen, et Daniels 2012). La plage de variation associée au débit supplémentaire fournie pour la surventilation nocturne peut donc varier entre 0 et le débit induit par la vitesse maximale du ventilateur de l'équipement installé. La surventilation mécanique nocturne fonctionne lorsque : $T_{\text{int}} \geq 22 \text{ °C}$ et $T_{\text{ext}} \geq 10 \text{ °C}$ et $T_{\text{ext}} \leq T_{\text{int}}$.

3. ÉTUDE DE CAS

3.1. PRESENTATION GENERALE

La méthodologie présentée ci-dessus a été appliquée au modèle de conception d'une maison individuelle de type BEPOS construite dans le cas du projet COMEPOS (Conception et Construction

Optimisées de Maisons à Energie POSitive) qui vise à promouvoir le concept de maison individuelle à énergie positive. Cette maison a déjà servi de cas d'étude et le modèle EnergyPlus utilisé par la suite a été validé (Josse-Buret et al. 2017). Cette maison a une superficie de 137 m² habitable, une perméabilité à l'air de 0.40 m³/(h.m²) et est située à proximité de Strasbourg. Les murs extérieurs ont une résistance thermique totale de 6 m².K/W avec une isolation par l'intérieur. Le fichier météo utilisé est celui proposé par EnergyPlus pour une année type pour la ville de Strasbourg et la période observée est comprise entre le 10/08 et le 16/08 qui correspond à la semaine la plus chaude du fichier. Pour la suite de l'étude, l'évaluation du confort estival vis-à-vis des comportements des occupants sera faite pour la zone thermique « Salon ». Cette zone est située au rez-de-chaussée, orientée Sud-Ouest, Sud-Est (Figure 1).



Figure 1: Représentation 3D du cas d'étude (source : constructeur), façades Sud-Ouest et Sud-Est

3.2. PARAMETRES D'ENTREE DE L'ANALYSE DE SENSIBILITE

Les paramètres d'entrée de l'analyse de sensibilité et leur plage de variation sont listés dans la Table 2. Les valeurs retenues sont issues du paragraphe 2.4 et ont été ajustées à notre cas d'étude. Une loi de distribution uniforme pour chacun des paramètres a été retenue pour que les valeurs prises par un paramètre soient équiprobables dans l'intervalle [Min. ; Max.].

Paramètres	Unité	Min.	Max.
1- Chaleur sensible - actif	W	70	110
2- Chaleur sensible - repos	W	43	83
3- Position volet roulant de 8 h à 12 h	-	0	1
4- Position volet roulant de 12 h à 14 h	-	0	1
5- Position volet roulant de 14 h à 20 h	-	0	1
6- Puissance électrique de 6 h à 8 h	W	0	400
7- Puissance électrique de 12 h à 14 h	W	0	400
8- Puissance électrique de 20 h à 22 h	W	0	400
9- Puissance électrique continue	W	80	120
10- Ouverture fenêtre à 7 h pendant 10 min	vol/h	0.22	2.7
11- Ouverture fenêtre à 12 h pendant 10 min	vol/h	0.22	2.7
12- Ouverture fenêtre à 20 h pendant 10 min	vol/h	0.22	2.7
13- Débit surventilation nocturne	m ³ /s	0	0.0103

Table 2 : Plage de variation des 13 paramètres d'entrée de l'analyse de sensibilité

3.3. RÉSULTATS

L'analyse de sensibilité a été exécutée avec 300 simulations pour un temps de calcul de 1 h 15 min (10 h de calculs parallélisés sur 8 processeurs).

3.3.1. Variabilité de la température opérative

La distribution statistique de la valeur de la température opérative dans le salon entre les 300 simulations est représentée sur la Figure 2. Pour chaque pas de temps horaire, la valeur médiane de la température est tracée ainsi que l'intervalle interquartile et l'intervalle de confiance à 95 %.

Sur la période d'étude, la valeur moyenne de la température médiane est de 28.7 °C et la moyenne de l'écart interquartile est de 1.7 °C i.e. l'écart observé sur 50 % des simulations. La plus forte variabilité de la température opérative ($\Delta t_{\max} = t_{97.5\%} - t_{2.5\%} = 8.6\text{ °C}$) est obtenue le 15/08 de 15h à 16h. Selon les comportements des occupants, il peut donc y avoir un écart de 8.6 °C. En faisant le parallèle avec les données météo, les journées les moins chaudes et les moins ensoleillées correspondent aux journées où la variabilité de la température est la plus faible.

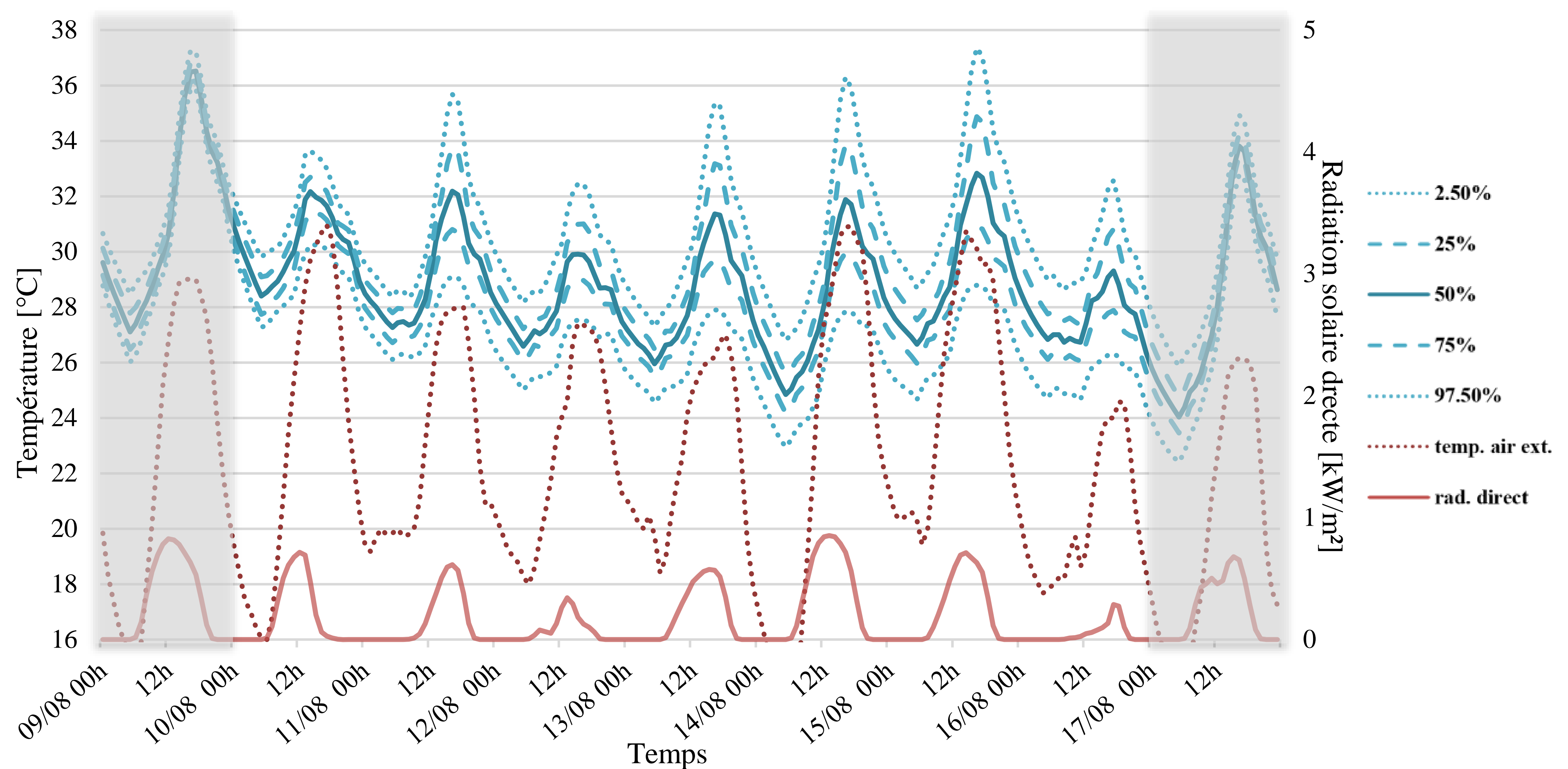


Figure 2 : Variabilité de la température opérative dans le salon entre les 300 simulations

On observe que sur l'ensemble de la période considérée, la température ressentie par les occupants est globalement au-dessus de 27 °C quels que soient les comportements des occupants. Par contre, l'intensité de l'inconfort est fortement dépendante de ces comportements puisque des températures opératives de 37 °C peuvent être atteintes. Afin de mieux appréhender les responsables de la variabilité observée, on estime les indices de sensibilité pour chaque entrée de l'étude avec le même jeu d'échantillon par la méthode RBD-FAST.

3.3.2. Indices de sensibilité

La Figure 3 représente, pour chaque pas de temps horaire, la valeur des indices du premier ordre de chacun des 13 paramètres. L'incertitude de l'estimation des indices de sensibilité étant de l'ordre de 2 %, on peut ainsi observer des valeurs supérieures à 1 et également des valeurs négatives.

Sur la période d'étude, la Figure 3 permet de visualiser, pour chaque heure, les comportements des occupants les plus influents (valeur des indices les plus élevées) sur la température opérative dans le salon. La position des volets roulants entre 14 h et 20 h (n°5), le débit de la surventilation nocturne (n°13) et la position des volets roulants entre 8 h et 12 h (n°3) sont les paramètres les plus influents. Au moment des pics de température, identifiables sur la Figure 2, la position des volets roulants entre 14 h et 20 h est le paramètre qui conditionne le plus la variabilité de la température.

L'étude permet également de mettre en évidence l'inertie du comportement thermique de la maison : à minuit, la position des volets roulants entre 14 h et 20 h explique en moyenne encore 56 % de la variabilité de la température opérative dans le salon.

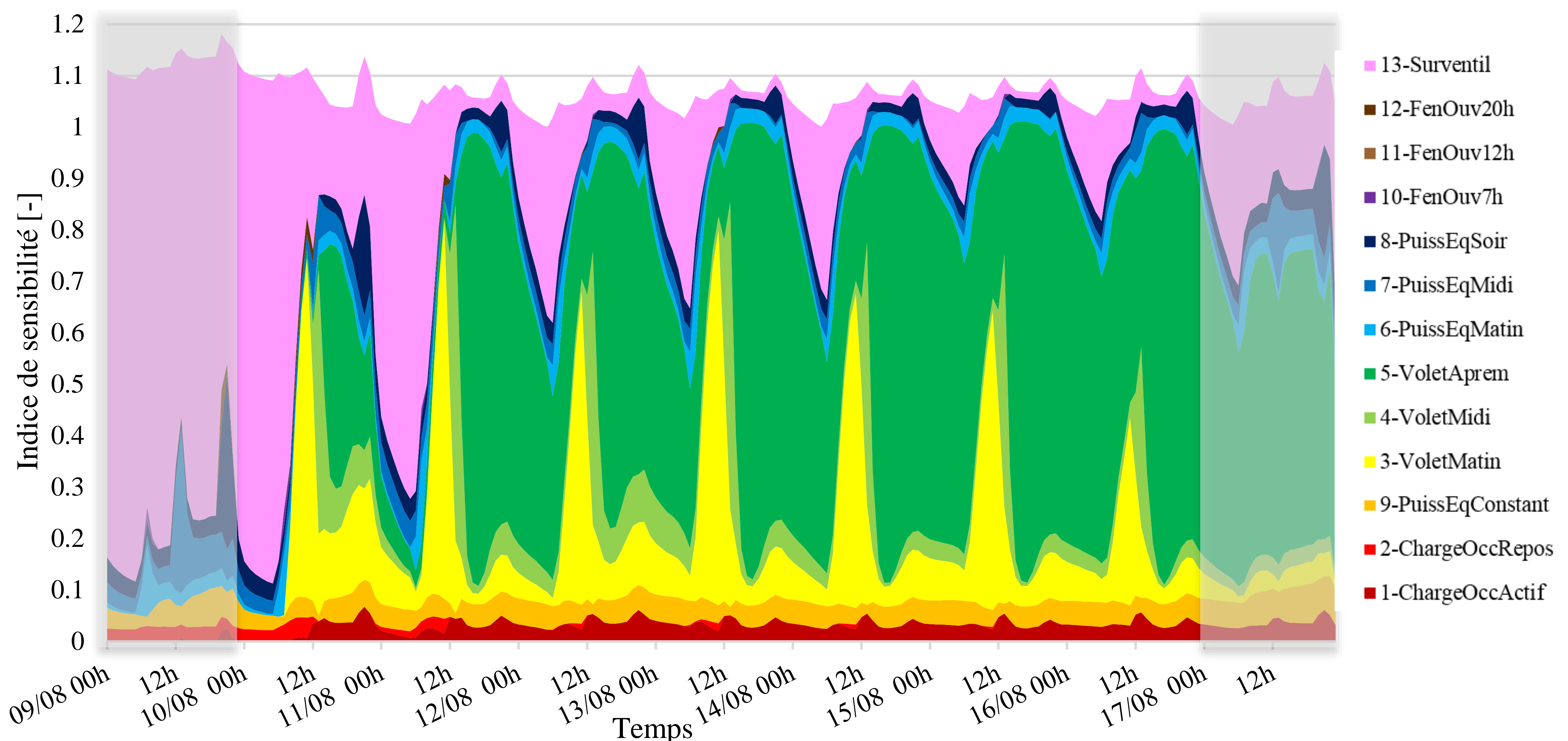


Figure 3 : Valeurs des indices de sensibilité pour les 13 paramètres

3.3.3. Inconfort estival

Pour évaluer l'impact des comportements des occupants sur l'inconfort estival, le critère retenu est le nombre de degré-heure supérieur à 27 °C qui permet de juger de l'intensité de l'inconfort.

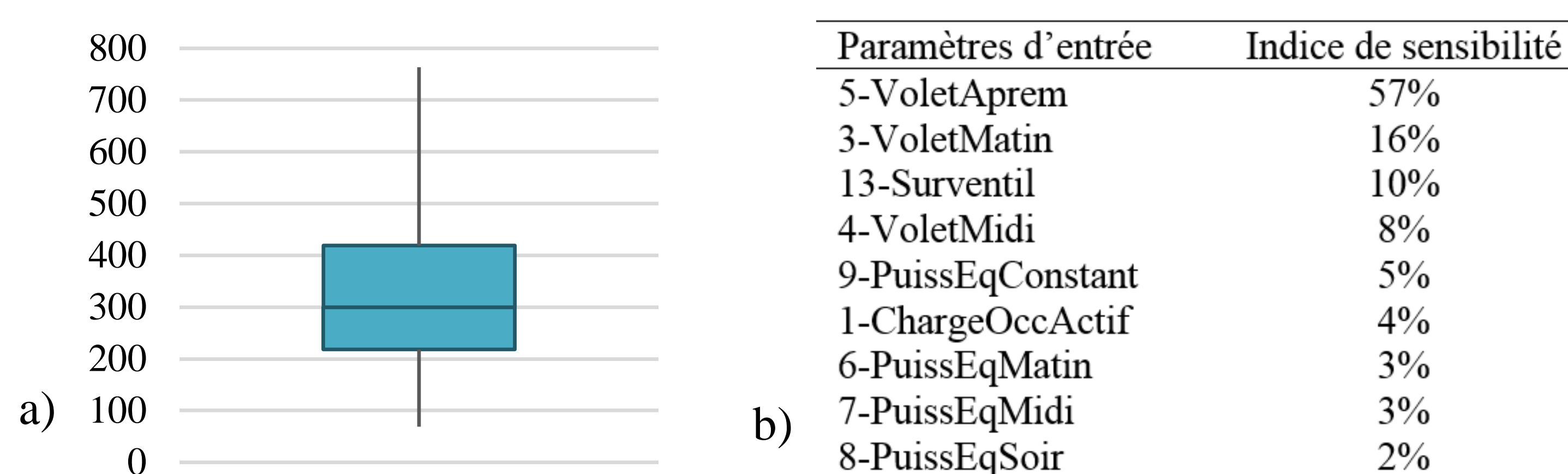


Figure 4 : a) Variabilité du nombre de degré-heure supérieur à 27 °C et b) Valeurs des indices de sensibilité des paramètres influents

La Figure 4a) montre la dispersion des 300 valeurs du nombre de degré-heure supérieur à 27 °C. La boîte représente 50 % des valeurs, la valeur médiane, le premier et troisième quartile sont les limites de la boîte. La Figure 4b) contient les valeurs des indices de sensibilité de chaque entrée de l'étude sur la variabilité du nombre de degré-heure supérieur à 27 °C rangés par ordre décroissant d'influence. Sur une semaine, soit 168 h, l'intensité de l'inconfort varie entre 218 degré-heure et 419 degré-heure suivant les comportements des occupants et le taux d'ouverture du volet l'après-midi explique 57 % de cette dispersion. La chaleur dégagée par l'utilisation d'électricité spécifique explique en tout 13 % de ces variations et le débit de surventilation 10 %. Le métabolisme des occupants ainsi qu'une ouverture de fenêtres 30 minutes par jour ont de très faibles influences sur l'inconfort dans ce cas d'étude.

Ainsi, il est possible de conclure que lors de la semaine la plus chaude du fichier météo considéré, la performance de ce bâtiment en termes de maintien du confort intérieur n'est pas atteinte car la température est supérieure à 27 °C pour la quasi-totalité des simulations. De plus, la robustesse de ce bâtiment à maintenir le confort est mise en défaut puisque pour les conditions et intensités d'usages testées et probables dans ce type de bâtiment, la variabilité de l'indice de confort est très élevée.

4. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Une méthodologie destinée aux maisons individuelles type BEPOS a été développée pour tester en phase de conception la performance estivale d'un bâtiment soumis à différentes conditions d'usage. Sur un cas d'étude, dans les variations d'usage retenues, un risque réel d'inconfort dans le bâtiment étudié a été mis en avant. Globalement, l'impact des protections solaires et donc des apports solaires est prédominant sur le confort thermique. Ces résultats sont en adéquation avec une étude déjà menée portant sur l'impact de la variabilité météorologique sur les besoins de refroidissement d'une maison basse consommation (Goffart 2013) et sont cohérents avec les installations courantes, dans ce type de bâtiment, de gestion automatisée des protections solaires ainsi que de l'utilisation du potentiel de rafraîchissement via la ventilation. La recherche des conditions limites d'utilisation du bâtiment permettant vis à vis du confort thermique est envisagée et nécessite une étude approfondie des résultats fournis par les analyses d'incertitude et de sensibilité.

5. REMERCIEMENTS

Ces travaux ont été financés en partie par le Conseil Savoie Mont Blanc et ont aussi bénéficié d'une aide de l'état au titre du programme d'Investissements d'Avenir portant la référence ANR-10-ITE-0003.

6. BIBLIOGRAPHIE

- ASHRAE. 2009. « ASHRAE Handbook - Fundamentals ». American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.
- DGO4, Architecture-et-Climat. 2013. « Energie +: Les charges thermiques internes - L'apport des occupants ». <http://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=11675>.
- Firląg, Szymon, et Bernard Zawada. 2013. « Impacts of airflows, internal heat and moisture gains on accuracy of modeling energy consumption and indoor parameters in passive building ». *Energy and Buildings* 64 (septembre): 372-83. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.04.024>.
- Goffart, Jeanne. 2013. *Impact de la variabilité des données météorologiques sur une maison basse consommation. Application des analyses de sensibilité pour les entrées temporelles*. Grenoble. <http://www.theses.fr/2013GRENA029>.
- Goffart, Jeanne, Mickael Rabouille, et Nathan Mendes. 2015. « Uncertainty and sensitivity analysis applied to hygrothermal simulation of a brick building in a hot and humid climate ». *Journal of Building Performance Simulation* 10 (1): 37-57. 2017 <https://doi.org/10.1080/19401493.2015.1112430>.
- Gouvernement Wallon. 2008. « Arrêté du Gouvernement wallon déterminant la méthode de calcul et les exigences, les agréments et les sanctions applicables en matière de performance énergétique et de climat intérieur des bâtiments ». 2008. <https://wallex.wallonie.be/PdfLoader.php?type=doc&linkpdf=28448-31550-20809>.
- ISO 7730. 2005. « Annex B ».
- Josse-Buret, Rozenn, Frédéric Wurtz, Philippe Maréchal, et Etienne Wurtz. 2017. « A Residential Case Study To Validate A New Default Detection Method Analyzing Discrepancies Between Simulated and Measured Data ». In *IBPSA Building Simulation Conference 2017*. San Francisco, United States.
- Larsen, Tine Steen, Rasmus Lund Jensen, et Ole Daniels. 2012. « The Comfort Houses: Measurements and analysis of the indoor environment and energy consumption in 8 passive houses 2008-2011 ». Department of Civil Engineering, Aalborg University. http://vbn.aau.dk/ws/files/65267145/The_Comfort_Houses.pdf.
- Méthode Th-BCE. 2012.
- Park, Herie, Marie Ruellan, Nadia Martaj, Rachid Bennacer, et Eric Monmasson. 2013. « Generic Thermal Model of Electrical Appliances in Thermal Building: Application to the Case of a Refrigerator ». *Energy and Buildings* 62 (juillet): 335-42. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.02.061>.
- Vorger, Éric. 2014. « Étude de l'influence du comportement des habitants sur la performance énergétique du bâtiment ». Paris, ENMP. <http://www.theses.fr/2014ENMP0066>.

Evaluation du comportement thermique d'un bâtiment en pisé dans un climat chaud et semi-aride

Salah Kachkouch*^{1,2,3}, Fatima Ait-Nouh², Brahim Benhamou^{1,2} et Karim Limam³

¹ Equipe Procédés Energétiques, Laboratoire de Mécanique de Fluides et Energétique, Faculté des Sciences Semlalia, Université Cadi Ayyad, Marrakech, Maroc

² Laboratoire des Energies Renouvelables et Efficacité Energétique, Centre National d'Etudes et de Recherches sur l'Eau et l'Energie, CNEREE, Université Cadi Ayyad, Marrakech, Maroc

³ Laboratoire des Sciences de l'Ingénieur pour l'Environnement, Université de La Rochelle, La Rochelle

*s.kachkouch@ced.uca.ac.ma

RESUME. Le but de ce travail est d'évaluer le comportement thermique d'un bâtiment à Marrakech construit avec des matériaux naturels locaux: pisé et isolants naturels. Cette évaluation est réalisée à travers une comparaison entre ce bâtiment et un bâtiment équivalent hypothétique en matériaux standards (parpaing creux de 20 cm et sans isolation). Le bâtiment étudié, construit récemment à Marrakech, au climat semi-aride, a un volume de $8.6 \times 6.8 \times 3 \text{ m}^3$ avec des murs d'une épaisseur de 53.7 cm en pisé stabilisé avec 5% de ciment. Le toit du bâtiment est composé de dalles alvéolaires préfabriquée de 12 cm. Il est isolé de l'intérieur par des panneaux de roseaux 8 cm d'épaisseur recouvert par des plaques de plâtre. Le plancher bas est composé d'une dalle alvéolaire de 12 cm posée directement sur le sol aménagé. L'étude est menée à travers des simulations thermiques dynamiques sur une année typique via un modèle conçu sous TRNSYS et validé par les résultats d'un monitoring. Les résultats montrent que le bâtiment en pisé a un comportement énergétique très performant, notamment en été. En effet, la consommation annuelle en chauffage et refroidissement du bâtiment en pisé est atténuée de 80% et 26% respectivement pour le refroidissement et le chauffage, comparativement au bâtiment équivalent en matériaux de construction standards.

MOTS-CLÉS : Pisé, performance thermique, simulation dynamique.

ABSTRACT. The purpose of this work is to evaluate the thermal behavior of a rammed earth building whose roof is thermally insulated using natural insulating materials. The building's thermal performance is assessed through a comparison with an equivalent building made from standards construction materials (hollow block walls without any thermal insulation). The studied building, with a volume of $8.6 \times 6.8 \times 3 \text{ m}^3$, is located in Marrakech whose climate is hot and semi-arid. Its walls was built using stabilized rammed earth (5% of the cement) with 53.7 cm thickness. The building's roof consists of 12 cm hollow core slab insulated from inside by 8 cm thickness panels of reeds while its floor is made of 12 cm thickness hollow core slab placed directly on the ground. The study was performed by means of TRNSYS dynamic thermal simulations over a typical meteo year. The TRNSYS model was validated against the results of the rammed earth building's monitoring. The results show that the rammed earth building has a high performance behavior, especially in summer. Indeed, the annual cooling and heating loads are reduced by 80% and 26% respectively, compared to those of the equivalent building with standard construction materials.

KEYWORDS : Rammed earth, thermal performance, dynamic simulation.

Towards the development of a coupled model for district simulation: buildings, energy systems and microclimate co-simulation

G-E. Kyriakodis^{1,2*}, E. Bozonnet¹ and P. Riederer²

¹ **LaSIE UMR CNRS 7356, Université de La Rochelle
Av. M. Crépeau, 17042 La Rochelle Cedex 1, France,**

² **Centre Scientifique et Technique du Bâtiment,
290 Route des Lucioles, 06904 Sophia Antipolis, France**

*** georgios.kyriakodis@univ-lr.fr**

RESUME. Cet article introduit une méthodologie de couplage basée sur un modèle énergétique de quartier détaillé allant du microclimat urbain au réseau énergétique. Le modèle microclimat/bâtiment vise à prédire les bilans thermo-radiatifs et massiques. La plateforme de simulation du système énergétique prend en compte les réseaux thermiques et/ou électriques ainsi que le stockage et la production d'énergie centralisée ou locale. Les deux outils intègrent les modèles thermiques de bâtiments. Ainsi, en considérant le bâtiment comme la frontière entre les deux outils, ce dernier apparaît comme le paramètre clé pour le couplage des deux approches. Les complexités spatiales et temporelles et leur impact sur les résultats de la simulation sont analysés dans une première étape afin de valider la méthodologie de couplage. En parallèle, les données météorologiques modifiées par l'environnement et la morphologie urbaine seront obtenues par un couplage hors ligne. Enfin nous illustrons cette approche à partir de résultats de simulations obtenus pour l'étude du quartier « La Cité des Géraniums » à La Rochelle (France), quartier entièrement rénové récemment.

MOTS-CLÉS : insérer 3 mots-clés décrivant au mieux votre article.

ABSTRACT. This paper introduces a methodology of a coupling procedure based on a detailed district energy model from urban microclimate and a second one with a detailed description of the entire energy system of the district. The microclimatic model is able to represent the thermo-radiative and mass flow balances. The transient energy system simulation platform is capable to consider the entire energy system of the district (including thermal and/or electrical grids and their respective energy storage/production on a central or local level). In parallel, both tools allow to compute the thermal processes of the buildings concurrently. Thus, considering the building as the boundary between both tools, we examine it as the key coupling parameter. The spatial and temporal complexities and their impact on the simulation results are analyzed in a first step in order to validate the coupling methodology. In parallel, modified meteorological data that account for the urban form were obtained in offline coupling. Finally, we demonstrate some of the possible outcomes through a real study of a newly refurbished district in La Rochelle, France «La Cite des Geraniums».

KEYWORDS: Urban Heat Island, district energy systems & networks, urban microclimate.

1. INTRODUCTION

The built environment constitutes the largest artificial key contributor, modifying the thermal balance of the urban microclimate and constituting the dominant energy consumer of France (48%) ('Observation et Statistiques' 2016) and Europe (40%) ('Eurostat' 2017). At the same time, the Urban Heat Island (UHI) effect, combined with the global warming, causes various deterioration factors: aggravating the outdoor thermal comfort conditions, intensifying the energy consumption and peaks for

cooling (Santamouris et al. 2015), placing under stress users and energy providers, especially for cities within moderate climate zones (30-60° latitude).

Taking the dependency and the interconnection of urban climate and building energy demand as a starting point (E. Bozonnet, Belarbi, and Allard 2007), various efforts have been carried out to identify and represent the dominant processes both in temporal and spatial scales. To this end, the last decades several models and methods have been developed in order to better understand and simulate the actual conditions in these various scales, starting from the two limit points (E. Bozonnet et al. 2015).

On the one hand, building energy simulation (BES) is developing with the aim to depict the thermal processes at building scale and serve the NZEB design. These models used in building regulations, target to evaluate/predict the energy use and buildings' environmental footprint. Moreover, they are independent from the urban context and use reference weather data (rural) far from bias due to anthropogenic sources and heterogeneous urban morphology. In addition, the thermal fluxes of the energy systems in which they operate are not taken into account, as their spatial limitation cannot assess this feedback. Consequently, they are missing the local but significant interactions between them and the urban environment (J. Allegrini et al. 2015).

On the other hand, the mesoscale atmospheric models were designed with the objective to serve both atmospheric research and operational forecasting needs. Therefore, they operate in a huge range of spatial scale (25km to 1km). This variety of spatial resolution and the application of the downscaling method, enabled them to integrate the urban parametrizations (1km to 100m) and launch city-urban scale simulations with the aim of firstly assess the air pollution and after the UHI effect (de Munck et al. 2013). The last years, also building energy consumption is studied with such type of models (Martilli 2007; Masson 2000; Kusaka et al. 2001; Grimmond et al. 2010). Nevertheless, their approach to represent the built environment as cells of coverage ratios (of buildings, vegetation, open spaces and built infrastructures) prevent them from addressing the detailed urban morphology (surfaces & obstacles) and their respective thermal fluxes properly.

Furthermore, a robust effort of representing the actual conditions in the district scale is performed with the evolution of microclimatic models, based in CFD approaches, such as ENVIMET (M. Bruse and Fleer 1998). The limitations of these efforts correspond to high simulation time and simplified building parameterizations. Some efforts execute BES offline-coupled with CFD models (K. Gobakis and Kolokotsa 2017; M. Martin et al. 2017), but they are restrained in terms of temporal scale; from hours to day(s).

A possible way to tackle these problems is to couple different models, each targeting different scales (D. Mauree et al. 2017). Here we describe one such approach. Considering the building (or building envelope) as the boundary condition between the local microclimate and the indoor building environment but also the similar between the thermal/electrical network and the operating energy system, we propose the development of a coupling strategy for district energy network and microclimate simulation using the scaling up building approach.

The microclimatic model is able to represent the thermo-radiative and mass flow balances. The transient energy system simulation platform is capable to consider the thermal and/or electrical grids and their respective energy storage/production on a central or local level. In parallel, both tools allow to compute the thermal processes of the buildings concurrently. The spatial and temporal complexities and

their impact on the simulation results are analyzed in a first step in order to validate the coupling methodology and we present some of the possible outcomes through a real study of a newly refurbished district in La Rochelle, France «La Cite des Geraniums».

2. TOOLS AND METHODS

In this section, we provide a concise overview of the ongoing-coupled platforms, pointing emphasis to the building models. We can assume buildings as the common “variable” between both models and especially the buildings envelopes.

2.1. MICROCLIMATIC MODEL (ENVIBATE)

EnviBATE (Gros 2013) has been developed to assess the energy demand of neighborhoods taking into account microclimatic. We can classify it into three main sub-models (Figure 1), the urban canopy, the thermal surface and the building energy one. The urban canopy model is based on the zonal model approach using the thermal balance equation for each cell volume. It is coupled with the convective heat exchanges of the urban surfaces and the outside building temperatures T_{se} .

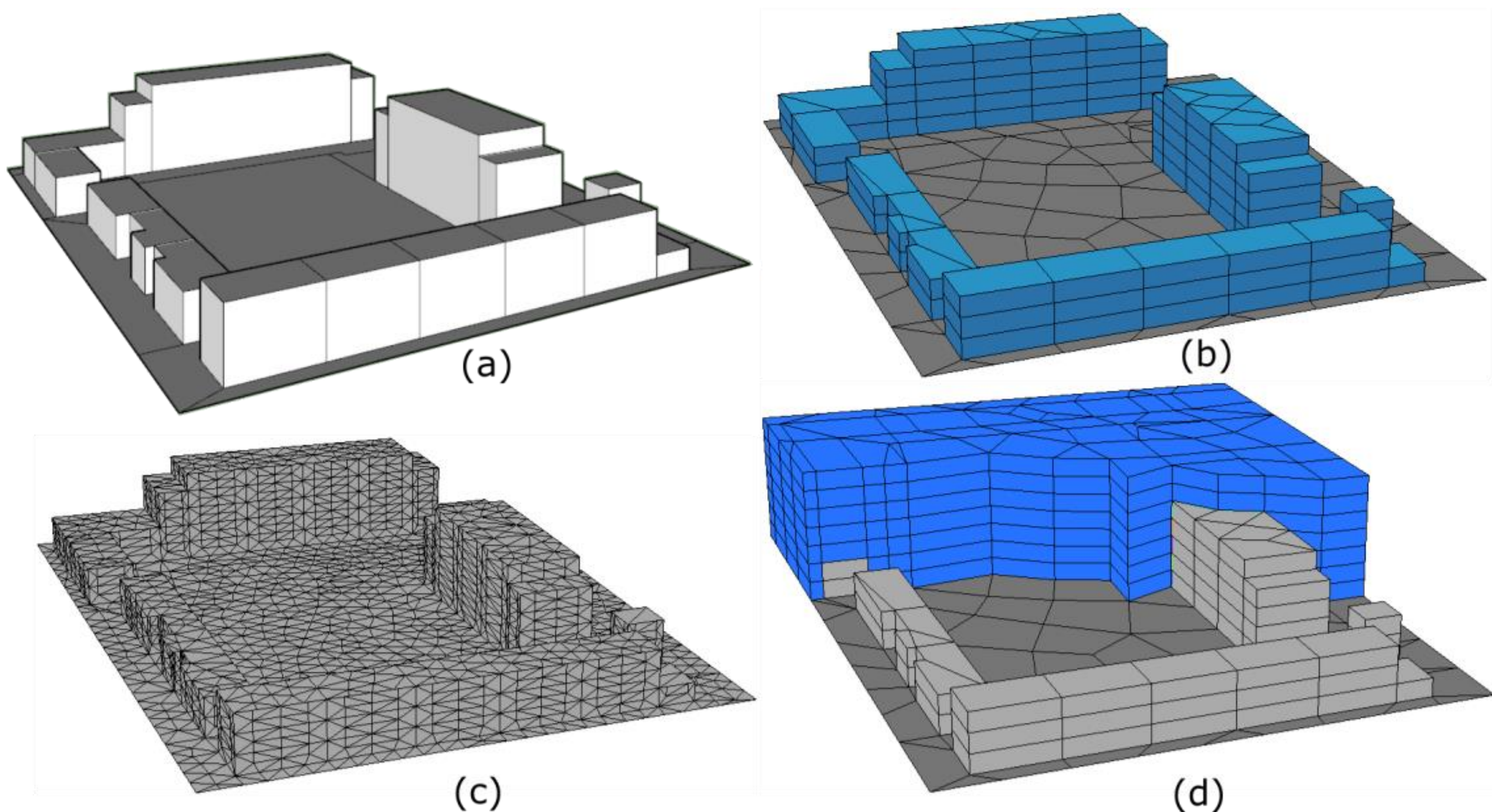


Figure 1: The original geometry (a). Produced surface (b), triangulate (c) geometry and the respective zonal mesh (d).

The developed BES is using a reduced order model (for fast computing) based on the Weighting Factors method (Rousseau 1978). The model takes into account the thermal solicitations for each studied building zone and calculates the thermal responses given either free-floating conditions or indoor set point temperature. Then, it calculates the outdoor derivative flux from the given solicitations (solar irradiance E_{SW} , outdoor surface temperatures T_{se} and indoor set point T_a) and the corresponding weighting factors FP_i . Equation (1) gives the outside heat flux ϕ_{pe} transmitted by the building wall (where Y, Z are the outgoing and incoming response factors). The urban surfaces, acting as the interfaces between the urban canopy and the buildings, constitute the thermal surface model, which also serves the thermal balance equation. The solar radiation model is based on the radiosity method using SOLENE tool (D. Groleau, Fragnaud, and Rosant 2003). The airflow model correspond to QUIC-URB (Pardyjak and Brown 2003) dispersion model taking into account forced convection phenomena. Concerning the

resolution grid, an unstructured grid (Figure 1d) was preferred as its potential to mesh complex geometric forms permits variations in spatial resolution.

$$\begin{aligned} \varphi_{pe,i}(t) = & \sum_{m=0}^{\infty} Y_i(m\Delta t) \left[\sum_{n=0}^{\infty} FP_{Esw}^i(n\Delta t) E_{clo}(t - (n+m)\Delta t) \right. \\ & + \sum_{j=1}^{N_p} \sum_{n=0}^{\infty} FP_{Tse,j}^i(n\Delta t) T_{se,j}(t - (n+m)\Delta t) \\ & \left. + \sum_{n=0}^{\infty} FP_{Ta}^i(n\Delta t) T_a(t - (n+m)\Delta t) \right] - \sum_{m=0}^{\infty} Z_i(m\Delta t) T_{se,i}(t - m\Delta t) \end{aligned} \quad (1)$$

2.2. DISTRICT ENERGY SIMULATOR MODEL (DIMOSIM)

DIMOSIM (P. Riederer et al. 2015) is an integrated simulation tool for the analysis of feasibility, conception and operation of district energy systems. It consists of (a) building and thermal zone models, (b) thermal and electric network model and (c) a variety of energy system components for the various scale (sensor, emitters, hydronic distribution, production, storage and control).

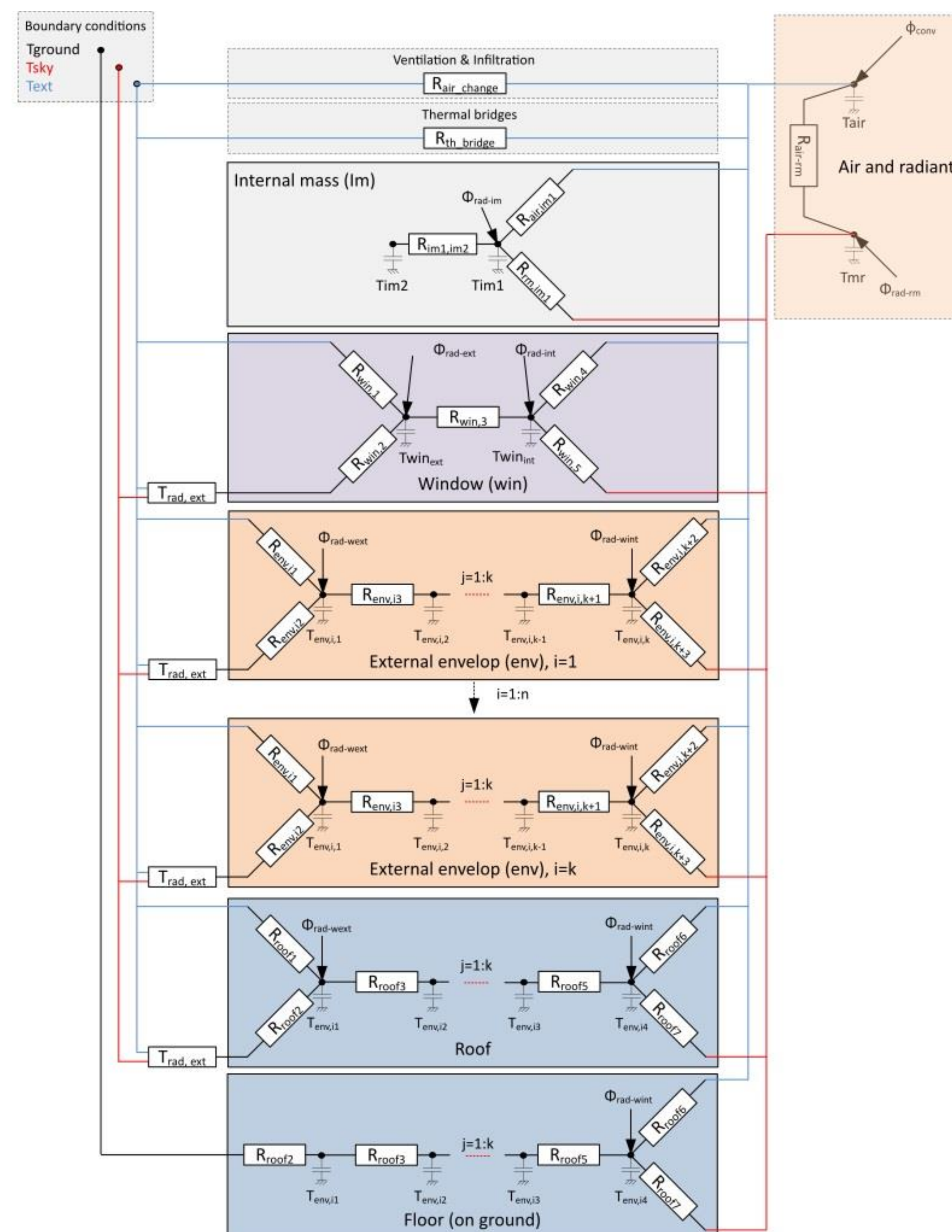


Figure 2: Layout of the thermal zone model.

More in detail, the main elements considered in the thermal zone model are: (a) windows, which are represented as a two-node model with two thermal capacitors on the external and internal surface, (b) wall envelope model which can either be applied to each individual façade or to all façades aggregated. The number of nodes for the discretization of the wall layers is between a minimum of four capacitors

representing external surface, first mass layer, second mass layer and internal surface (Figure 2). Absorbed solar SW radiation is calculated in a specific radiation module for each façade and considering solar close and far masks and is injected to the outer surface of the wall. On the internal surface, radiative gains from occupants, equipment and solar radiation are injected proportionally to the area of the wall. The roof external envelope model (c) is identical to the one of the walls except that the inclination is horizontal. The ventilation module (d) calculates heat flux to the zone from ventilation and/or infiltration. The flux can be positive or negative and the system can be dealt as a simple mechanical ventilation system or a ventilation system with heat recovery. Thermal bridges (e) are estimated from the number of floors, the position of the insulation and the perimeter of the zone footprint considering a global thermal bridge coefficient and finally (f) the internal mass module, in which all adjacent and internal walls or floors are represented and allows considering the thermal inertia.

2.3. COUPLING METHODOLOGY

Given the different common physical variables concerning the buildings, the coupling procedure focuses on building envelopes. At the actual stage, an offline coupling between the two tools is ongoing (Table 1). This procedure is elementary and representative in order to define the complexities for further online set-up. At a first stage, EnviBATE performs an annual simulation. The outdoor air temperature of the zones is used to create a new meteorological file, composing the import data of DIMOSIM, which then calculates the annual loads. As the thermal behavior of the zones is changing, a step further is to continue with the radiative coupling. At this stage, the impact of a detailed radiation model will be studied for different climatic zones and geometries. While the inconsistencies between two tools are existing, the previous stages are going to guide us to solve them and set the tolerance limits. Each coupling stage separates to various sub-stages depending on the studied level of detail.

Scenarios	Methods
Coupling Stage 1	Offline Coupling of EnviBATE & DIMOSIM
Coupling Stage 2	Radiative Coupling of EnviBATE & DIMOSIM
Coupling Stage 3	Fully Coupling of EnviBATE & DIMOSIM

Table 1: Framework of the coupling strategies.

At the final stage, a cosimulation process adjusts at our ultimate objective. The selected “exchangeable” variables are the outside heat flux of the energy system (DIMOSIM) and the outdoor surface temperature (EnviBATE). The formula will be the following: due to the ability of discretized time steps (10min) DIMOSIM calculates at the t_D^5 time step the outside heat flux of the energy system and the set-point of the respective zone, dispatch and impose them to the microclimatic model at t_E^1 time step (Figure 3). At the same time, EnviBATE calculates the outdoor surface temperature and the shortwave radiation flux transmitted through the windows and impose them to DIMOSIMs t_D^6 time step.

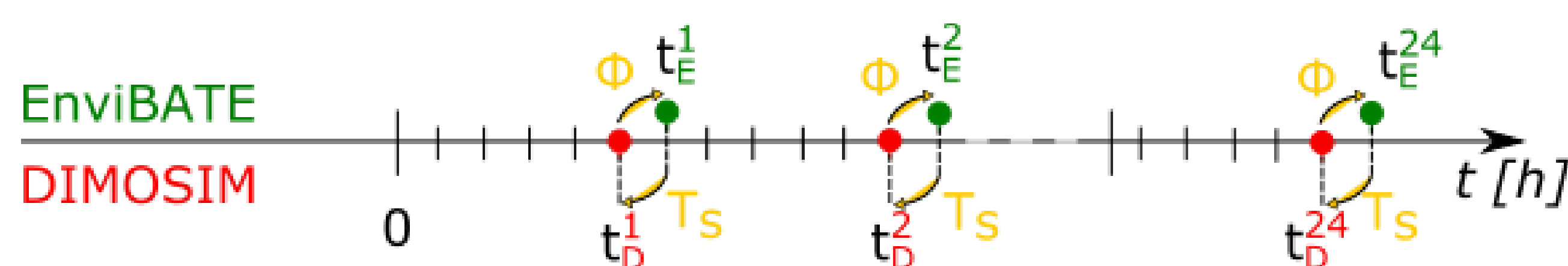


Figure 3: Temporal description of Coupling stage 3.

2.4. ON-GOING COMPLEXITIES

Online coupling of models targeting different objectives is a strenuous procedure in which a common formula has to be set. Differences on spatial characteristics remain to be addressed, as they represent a significant factor in this complex undertaking. Although common building footprints are settled, the construction of the various meshes must also follow this common formula. As an example, EnviBATE is using a triangulated mesh to serve the thermal transfers of the zones, giving spatial fluctuations on the studied parameter compared to one node representation of DIMOSIM. Another significant aspect to handle is the zonal cells in which the system fluxes are going to be imposed in order to avoid overheating phenomena, especially during low wind speed time steps. Given the fact that EnviBATEs outdoor and indoor environments are coupled in the building surface, overheating of zonal cells will automatically lead to overestimation of surface temperatures placing ostensible discrepancies to coupling stage 3. The differences on temporal characteristics were denoted in 2.3.

3. “LA CITE DES GERANIUMS” A CASE STUDY

3.1. AUDIT OF THE AREA

The referenced area is an ongoing rehabilitated district of the Municipality of La Rochelle, situated 2km in the north-western suburbs of the city center. It is oriented along the axis of a NE’N-SW’S direction (10° from real North counter-clockwise). The district is characterized as residential. The building stock corresponds to single-floor residence and social housing of semi-detached, 5-storey apartment buildings. During the rehabilitation project, also 3-storey newly built apartment buildings were constructed.

3.2. INITIAL SIMULATION RESULTS

In the framework of this study we target to expose few of the capabilities of each tool. The climatic data correspond to La Rochelle standard climatic file, interpolated to 2030 according to the A1B future scenario given in the IPCC Special Report. Two annual simulations were launched within hourly time step, while the initialization temperature is set equal at 16°C. In terms of computational time, DIMOSIM is capable to execute the simulation very fast (in the order of seconds), while EnviBATE needs 9.5h depending on the complexity of treated surfaces. In a second step, we followed the procedure described in 2.3.

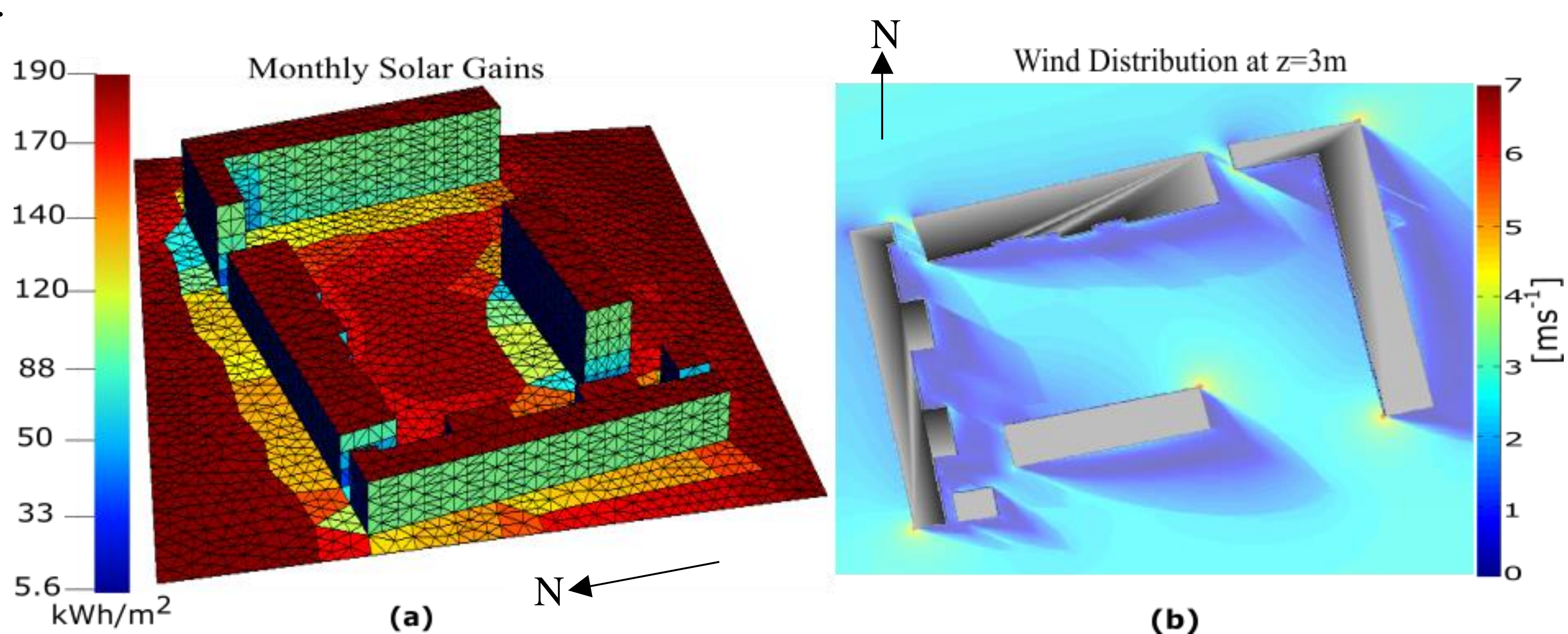


Figure 4: Detailed received solar gains (a) for each triangulate surface and airflow distribution of the examined area.

Figure 4 (a) and (b) represent the monthly received solar gains per surface on July and the distribution of the airflow (at $z=3\text{m}$) respectively. More in detail, roofs receive the maximum solar radiation reaching 190 kWh/m^2 , while the S-SW'n facades are following with values ranging from $140\text{-}170 \text{ kWh/m}^2$.

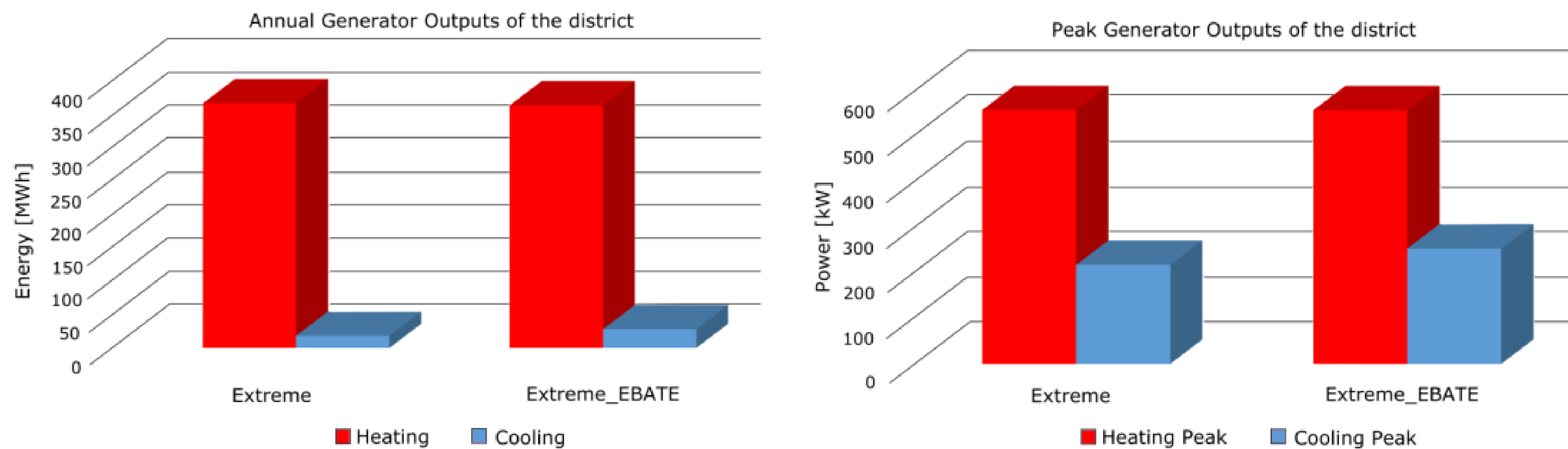


Figure 5: Annual Generator outputs of the entire district (left) and the respective peaks (right).

Concerning the energy loads, Table 2 and Figure 5 present the differences of the annual energy and peak loads of the local generator between standalone and enhanced meteorological file. The emitter type corresponds to ideal. The total energy difference between the two scenarios is reaching 2%, while the cooling energy presents a significant increase (35%); taking into account the almost zero actual cooling needs of the area. Regarding the peak loads, a similar trend is observed. The cooling peak load increases by 14% and 13%, considering a local or central generator respectively. Obviously, this amount depends on the proportion of heating/cooling loads and we estimate to change for districts of different climatic zones.

Scenarios	Heating [MWh]	Cooling [MWh]	Total [MWh]
Extreme 2030	368.72	18.48	387.20
Extreme 2030 & EBATE	365.67	28.40	394.07
Differences	1%	35%	2%
Scenarios	Heating Peak [kW]	Cooling Peak [kW]	Total [kW]
Extreme 2030	561.47	219.23	780.70
Extreme 2030 & EBATE	560.90	255.12	816.02
Differences	0%	14%	5%

Table 2: Generator outputs of the district using standard and enhanced meteorological file.

Although many studies of mitigating UHI have been performed (Kyriakodis and Santamouris 2017), none of them can still capture the interconnection of buildings and energy systems and networks to the microclimate concurrently, in terms of detailed representations (of urban structures, systems and networks) and efficient computing time and this is what we scope to examine through this methodology.

4. CONCLUSIONS AND PERSPECTIVES

The aim of this study is to introduce a methodology of coupling procedure based on a detailed district energy model from urban microclimate to district network. The used tools and the complexities of this effort are analyzed in a first step. Some of the possible capabilities of the coupled tool were shown based on a case study. The initial results show the deviation of cooling loads when an enhanced meteorological file is used independently the generator type. We expect to fulfill the coupling stages in order to respond to the opposite inquiry taking into account the type of the network and the system components.

5. BIBLIOGRAPHIE

- Allegrini, J., K. Orehounig, G. Mavromatidis, F. Ruesch, V. Dorer, and R. Evins. 2015. ‘A Review of Modelling Approaches and Tools for the Simulation of District-Scale Energy Systems’. <https://doi.org/10/f76dxn>.
- Bozonnet, E., M. Musy, I. Calmet, and F. Rodriguez. 2015. ‘Modeling Methods to Assess Urban Fluxes and Heat Island Mitigation Measures from Street to City Scale’. *International Journal of Low-Carbon Technologies* 10 (1): 62–77. <https://doi.org/10.1093/ijlct/ctt049>.
- Bozonnet, E., R. Belarbi, and F. Allard. 2007. ‘Thermal Behaviour of Buildings: Modelling the Impact of Urban Heat Island’. *Journal of Harbin Institute of Technology* 14 (Sup.): 19–22.
- Bruse, M., and H. Fler. 1998. ‘Simulating Surface–plant–air Interactions inside Urban Environments with a 3-D Numerical Model’. [https://doi.org/10.1016/S1364-8152\(98\)00042-5](https://doi.org/10.1016/S1364-8152(98)00042-5).
- ‘Eurostat’. 2017. 2017. <http://ec.europa.eu/eurostat/fr/home>.
- Gobakis, K., and D. Kolokotsa. 2017. ‘Coupling Building Energy Simulation Software with Microclimatic Simulation for the Evaluation of the Impact of Urban Outdoor Conditions on the Energy Consumption and Indoor Environmental Quality’. *Energy and Buildings* 157
- 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 <https://doi.org/10.1175/2010JAMC2354.1>’.
- Groleau, D., F. Fragnaud, and J.-M. Rosant. 2003. ‘Simulation of the Radiative Behavior of an Urban Quarter of Marseille with the Solene Model’. In *Fifth International Conference on Urban Climate*. Lodz.
- Gros, Adrien. 2013. ‘Modélisation de La Demande Énergétique Des bâTiments à l’échelle d’un Quartier’. La Rochelle.
- Kusaka, H., H. Kondo, Y. Kikegawa, and F. Kimura. 2001. ‘A Simple Single-Layer Urban Canopy Model for Atmospheric Models: Comparison with Multi-Layer and Slab Models’. *Boundary-Layer Meteorology* 101 (3): 329–358.
- Kyriakodis, G-E., and M. Santamouris. 2017. ‘Using Reflective Pavements to Mitigate Urban Heat Island in Warm Climates - Results from a Large Scale Urban Mitigation Project’. *Urban Climate*, March. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2017.02.002>.
- Martilli, A. 2007. ‘Current Research and Future Challenges in Urban Mesoscale Modelling’. *International Journal of Climatology* 27 (14): 1909–18. <https://doi.org/10/d354pf>.
- Martin, M., N. Wong, D. Hii, and M. Ignatius. 2017. ‘Comparison between Simplified and Detailed EnergyPlus Models Coupled with an Urban Canopy Model’. *Energy and Buildings* 157
- 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>.
- Mauree, D., S. Coccolo, J. Kaempf, J-L. Scartezzini. 2017. ‘Multi-Scale Modelling to Evaluate Building Energy Consumption at the Neighbourhood Scale’ <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0183437>.
- Munck, C. de, G. Pigeon, V. Masson, F. Meunier, P. Bousquet, B. Tréméac, M. Merchat, P. Poef, and C. Marchadier. 2013. ‘How Much Can Air Conditioning Increase Air Temperatures for a City like Paris, France? *International Journal of Climatology* (33): 210–27.
- ‘Observation et Statistiques’. 2016. <http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr>
- Pardyjak, Eric, and Michael Brown. 2003. ‘QUIC-URB v1.1 - Theory and User’s Guide’. Software Users Guide LA-UR-07-3181. Un. of California, US: Los Alamos National Laboratory.
- Riederer, P., V. Partenay, N. Perez, C. Nocito, R. Trigance, and T. Guiot. 2015. ‘Development of a Simulation Platform for the Evaluation of District Energy System Performances’. In , 2499–2506.
- Rousseau, Sylvie. 1978. ‘Simulation numérique du comportement thermique des locaux d’habitation: évaluation de l’influence de la radiation solaire, des conditions climatiques et des paramètres caractéristiques du bâtiment’. Thèse de docteur-ingénieur, Lyon, France: Un. Claude Bernard.
- Santamouris, M., C. Cartalis, A. Synnefa, and D. Kolokotsa. 2015. ‘On the Impact of Urban Heat Island and Global Warming on the Power Demand and Electricity Consumption of Buildings—A Review’. *Energy and Buildings* 98 (July): 119–24.

Segmentation d'un parc virtuel de bâtiments par clustering pour la rénovation énergétique

Yunseok Lee*¹, Pierre Boisson¹, Mathieu Rivallain¹, Olivier Baverel²

¹ CSTB

84 Avenue Jean Jaurès, 77420 Champs-sur-Marne,

² Laboratoire Navier (UMR 8205), École des Ponts ParisTech, ENS Architecture
Grenoble

Cité Descartes, 6-8 Avenue Blaise Pascal, 77455 Champs-sur-Marne,

*yunseok.lee@cstb.fr

RESUME. Dans cette étude, le clustering, une technique d'apprentissage automatique non supervisée, est utilisée pour segmenter un parc de bâtiments en groupes homogènes en termes d'attributs descriptifs et de performance énergétique. Un parc virtuel de bâtiments résidentiels a été généré pour tester une méthode de clustering. Il est constitué de géométries diverses (forme et taille) qui permettent d'identifier différentes morphologies types. Les attributs des bâtiments utilisés pour le clustering sont séparés en deux parties : l'espace de décision des attributs descriptifs, et l'espace objectif des performances énergétiques.

La méthode de clustering qui est développée cherche à satisfaire le critère d'homogénéité dans les deux espaces. L'interaction entre deux espaces a été réalisée par la réduction de la dimension utilisant LDA et l'auto-supervision utilisant l'indice de Rand ajusté (ARI). L'analyse des résultats permet de valider l'approche de la méthode. Les clusters de bâtiments obtenus sont plus ou moins éloignés des typologies traditionnelles.

MOTS-CLÉS : parcs de bâtiments, clustering, rénovation énergétique

ABSTRACT. In this study, clustering, an unsupervised machine learning technique, is used to segment a building stock into homogeneous groups in terms of descriptive attributes and energy performance. A virtual stock of residential buildings has been generated to test a developed clustering method. It consists of various geometries (shape and size) that identify different types of. The attributes of the buildings used for clustering are separated into two parts: the decision space of descriptive attributes, and the objective space of energy performance.

The developed clustering method seeks to satisfy the homogeneity criterion in the two spaces. The interaction between two spaces has been achieved by dimensionality reduction using linear discriminant analysis (LDA) and self-supervision using the adjusted Rand index (ARI). The analysis of the results makes it possible to validate the approach of the method. The obtained clusters of buildings are more or less distant from the traditional typologies (for example in terms of morphology).

KEYWORDS : building stock, clustering, energy retrofit

1. INTRODUCTION

To achieve the energy transition, the French government has set a target of 50% reduction in final energy consumption by 2050 compared to 2012 in the *Loi de transition énergétique pour la croissance verte (LTECV)* in 2015. In the building industry, responsible for nearly 40% of global energy consumption, the thermal regulation for new buildings alone cannot bring about sufficiently rapid and large changes in the entire stock. Retrofit of existing buildings is therefore strategic.

While accurate measurement and efficiency estimation of energy retrofit actions are possible for an individual building, it is necessary to segment the buildings into groups of homogeneous buildings to work on a building stock scale. For this purpose, several descriptive attributes, such as construction periods, building types, and climate zones, have been used to create typologies. The TABULA/EPISCOPE project provided standard typologies for the European building stocks (TABULA Project Team 2012). A study showed that these types of typology might be useful to guess the global final energy demand of a building stock pointing out notable differences by energy usages and sources (Mata, Sasic Kalagasidis, and Johnsson 2014). Although useful for certain purposes, these typologies are not always relevant for characterizing the energy retrofit actions on buildings.

2. METHODOLOGY

2.1. THE GENERATION OF A VIRTUAL BUILDING STOCK

2.1.1. Background

While “real building stock” data from actual building diagnoses have reliable values, the comparison between before and after energy retrofit of buildings in a large building stock is hardly possible. Since building energy data with both pre-retrofit and post-retrofit status were rare, only scores of buildings could be available in studies (Deb and Lee 2018). Alternatively, a virtual building stock saves the effort and the resource required for collecting the data (Nikolaou et al. 2009). In this study, a virtual building was generated with three attribute groups, i.e. morphology of buildings, energy features such as envelope and energy system, and energy performance.

2.1.2. Morphology

Various different typologies based on the morphology have been proposed depending on research interests, and historical and regional contexts. LSE and EIFER adopted five types related to the urban context (LSE Cities and EIFER 2014). Regarding the energy features, the previously mentioned TABULA/EPISCOPE project harmonized different typologies of member countries (Stein et al. 2014). In France, several morphological typologies were compared focusing on the urban forms and the solar gains (Gauthier 2014).

	Type	Width (m)	Length (m)	L/W	Stories	Height (m)	H/L	Number
MI	Individual house	5-10	5-20	1.0-3.0	1-2	2.8-9.4	0.14-1.88	1000
LC	Small collective housing	7.5-25	15-80	1.0-10.7	3-21	9-39	0.5-2.0	1000
LCT	High-rise tower	7.5-30	15-50	1.0-6.7	5-33	30-100	2.0-6.7	1000
LCB	Low-rise block	7.5-25	16.7-150	1.0-20	3-13	9-39	0.26-0.5	1000

Table 1 : The dimensions bounds set-up for the virtual building stock

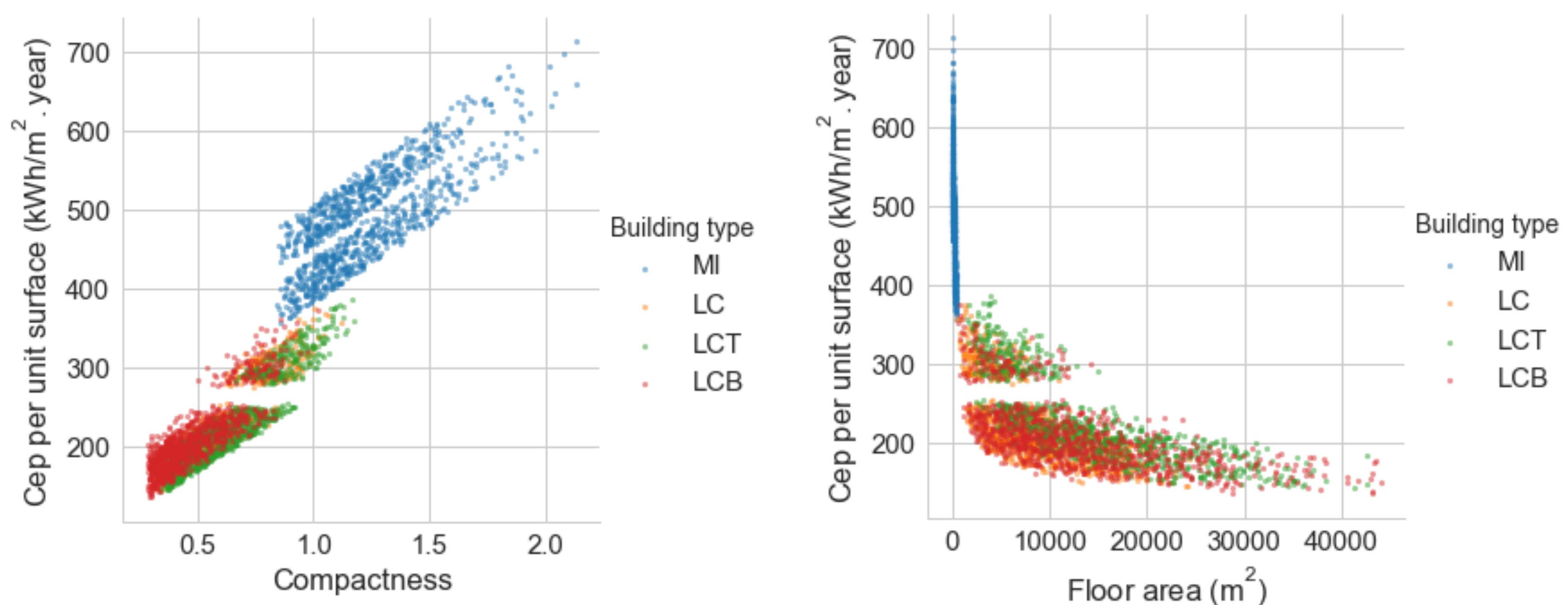
Based on these morphological analyses, four residential building types were selected for the virtual building stock shown in Table 1. The types were separated by the limits of dimensions (width, length, and the number of stories), and the aspect ratios, such as height-to-length (H/L) and width-to-length (L/W). Within the limits, 4000 buildings were generated in a uniformly random manner, using a cityGML modeling engine, Random3Dcity (Biljecki, Ledoux, and Stoter 2016). The generated building stock did not reproduce the real statistics where individual houses are more common than collective housings.

2.1.3. Energy features

Focusing on the variation of the morphology of buildings, the thermal properties of exterior walls and openings and the energy system (natural ventilation, electric convectors for heating, and constant

lighting power) were assumed identical for all buildings. DHW system was not included because of the lack of information at the moment. Simplified formulae were utilized to determine features, such as heating demand (Delphine and Pierre 2016) and ventilation capacity (CSTB 2008).

Aiming to be used for the management of energy retrofit, the virtual building stock requires the energy performance, such as energy demands and consumptions. The energy performance was simulated considering the features dealt with in the previous clauses, using COMETH, a calculation engine for the dynamic energy simulation developed by CSTB (Da Silva et al. 2016).



(a) Compactness (exterior wall / floor area)

(b) Total floor area

Figure 1 : Primary energy consumption (Cep) of the generated buildings by building types

2.2. CLUSTERING IN TWO SPACES

2.2.1. Background

Clustering of buildings is quite recent research topic, and some studies compared different clustering algorithms (Geyer, Schlüter, and Cisar 2017). Concerning clustering in two spaces, clustering in a space of all features was formerly examined as a method (Lee et al. 2016). In this study, a new method for clustering in two spaces was designed as shown in Figure 2. This method comprises (1) constitution of objective and decision spaces, (2) clustering in the objective space, (3) dimensionality reduction of the decision space, (4) clustering in the decision subspaces, (5) pairwise comparison of objective and decision clusters, and (6) selection of final clusters.

2.2.2. Objective space and decision space

The descriptive features, such as construction years, morphologies and functions, are comparatively easy to obtain by analyzing documents and conducting surveys. However, they are only restrictively capable of telling about the energy performance of the buildings. The energy performance itself, such as energy consumption, energy demand, or CO₂ emission, is difficult to acquire as precise measurement or computational estimation are required.

These two groups of building features were named as decision features and objective features, respectively. Decision space comprises descriptive features, and they are usually available with the facility. On the other hand, an objective space consists of the rarely available energy performance. As the generated virtual buildings had very limited energy usages (heating and lighting) and source (electricity), three features associated with building shapes and two features of the energy performance were selected as the decision features and the objective features, respectively. The features were standardized to be used for the clustering application.

Decision features	Objective features
<ul style="list-style-type: none"> •Floor area •SSE (South equivalent glazing area by 3CL-DPE method (“RT Existant: Outils et Guides Pour Le DPE” n.d.)) to floor area ratio •Compactness (exterior wall to floor area ratio) 	<ul style="list-style-type: none"> •Heating energy demand per unit area •Primary energy consumption per unit area

Table 2 : Feature selection for objective and decision spaces

2.2.3. Objective clustering

For the clustering, we adopted k-means algorithm which segments the objects into k clusters according to the distance between objects and centroids of clusters. The clusters are determined by iteration of (1) cluster assignment of objects to the nearest centroids, and (2) centroid update with the new assignment until the convergence. To determine the number of clusters k in advance, the Silhouette coefficient was calculated for various k's.

In the developed clustering method, the 3-dimensional decision space was reduced into multiple 1-dimensional decision subspaces which can reproduce the best each objective cluster. Consequently, every objective cluster would have a corresponding decision subspace. Then decision clustering was performed in each decision subspace with all buildings in the stock. In the decision clustering, k-means algorithm and the silhouette coefficient were used as well.

2.2.4. Evaluation of clusters and selection of final clusters

Rand index is the ratio between the number of agreed pairs of objects and the total number of pairs of objects. The agreed pairs mean that the objects are either in the same group or the different groups in both partitions. At present, the Adjusted Rand Index (ARI), a corrected Rand index with chance normalization, is practically used. ARI is 1 for exactly same partitions, 0 for perfectly random partitions.

For the evaluation of clustering in this study, ARI between binary classes of objective clusters and those of decision clusters. For example, the cluster member objects were assigned as 1 and the non-member objects as 0. If certain pairs of objective clusters and decision subspace clusters have ARI values close to 1, it means that the two clusters are in agreement.

From the result of ARI evaluation, the best-fit pairs of objective clusters and decision subspace clusters would be found on objective clusters basis. Therefore, intersections of each objective cluster and the corresponding decision cluster with the highest ARI was chosen as the final cluster.

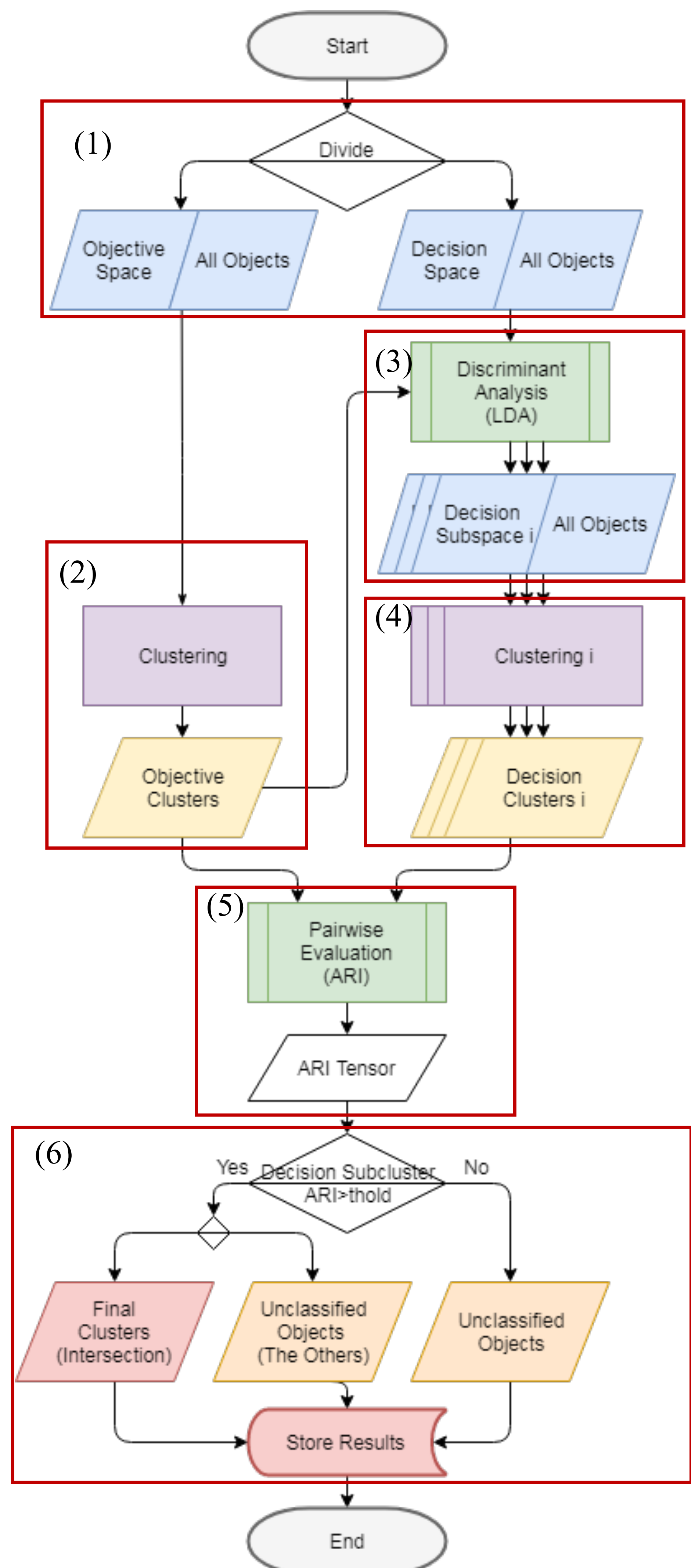


Figure 2 : Workflow of the proposed clustering method

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1. OBJECTIVE CLUSTERING

3.1.1. The decision of the number of clusters

Bearing in mind that the *diagnostic de performance énergétique (DPE)* and the class gaz à effet de serre (*GES*) and evaluating silhouette coefficients of clustering analyses with the number of clusters from 5 to 20, nine clusters were selected as the number of objective clusters.

The result of the objective clustering is shown in Figure 3. The objective clusters were named from C01 to C09 according to the energy consumption per unit area. While the four most energy consuming clusters, i.e. C05 to C09 comprise principally individual houses, C01 to C04 consists of the mixture of three collective housing types.

3.1.2. Feature importance of objective clustering

To understand which features are more significant for the distinction of objective clusters, F values of ANOVA (the ratio between the variance of group means, and the mean of the within-group variances) was compared. With greater F values, the selected decision features, i.e. floor area, window-to-floor area ratio, and compactness appeared evidently important.

3.2. DECISION CLUSTERING

Nine decision subspaces were determined by binary-class LDA for each objective cluster. Due to the binary-class LDA, the decision subspaces were limited to one-dimensional space. Decision clustering analysis was performed on each decision subspace. Figure 5 shows some examples of decision clustering and the corresponding objective cluster. The reduced subspaces by LDA are on the x -axes and the floor area is added as the y -axes to improve the visibility. As the consequence of the decision clustering, 111 clusters were obtained. Unlike the objective clusters, the decision clusters could be superposed if originated from different decision clustering. For example, a building can belong to the cluster 1 of the decision clustering 1, and to the cluster 2 of the decision clustering 9 at the same time.

3.3. FINAL CLUSTERS

3.3.1. Evaluation of ARI

ARI of all possible pairs of nine objective clusters and 111 decision clusters were calculated. Table 3 shows the pairs of objective clusters and the corresponding decision clusters of maximum ARI

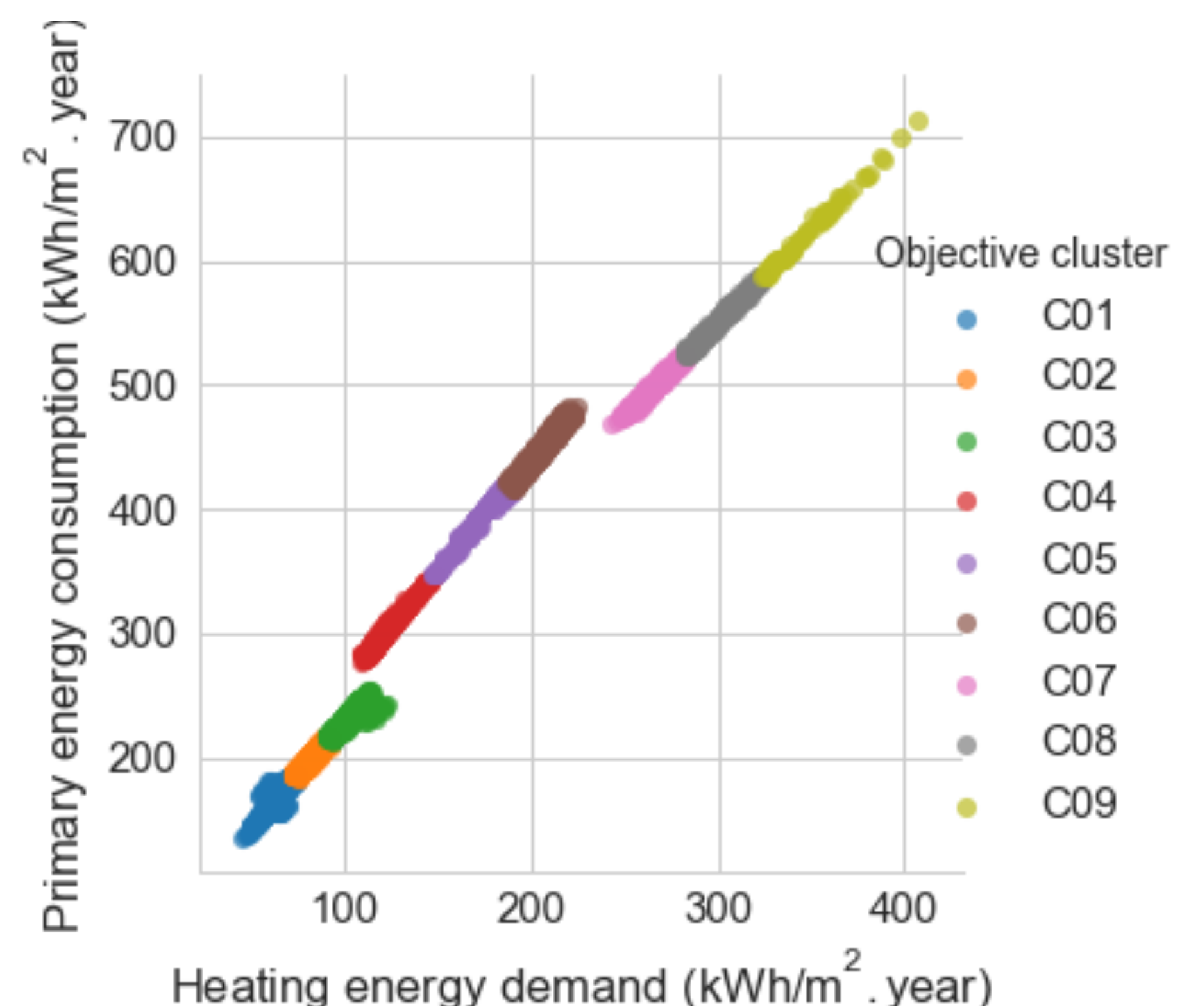


Figure 3 : Objective clusters

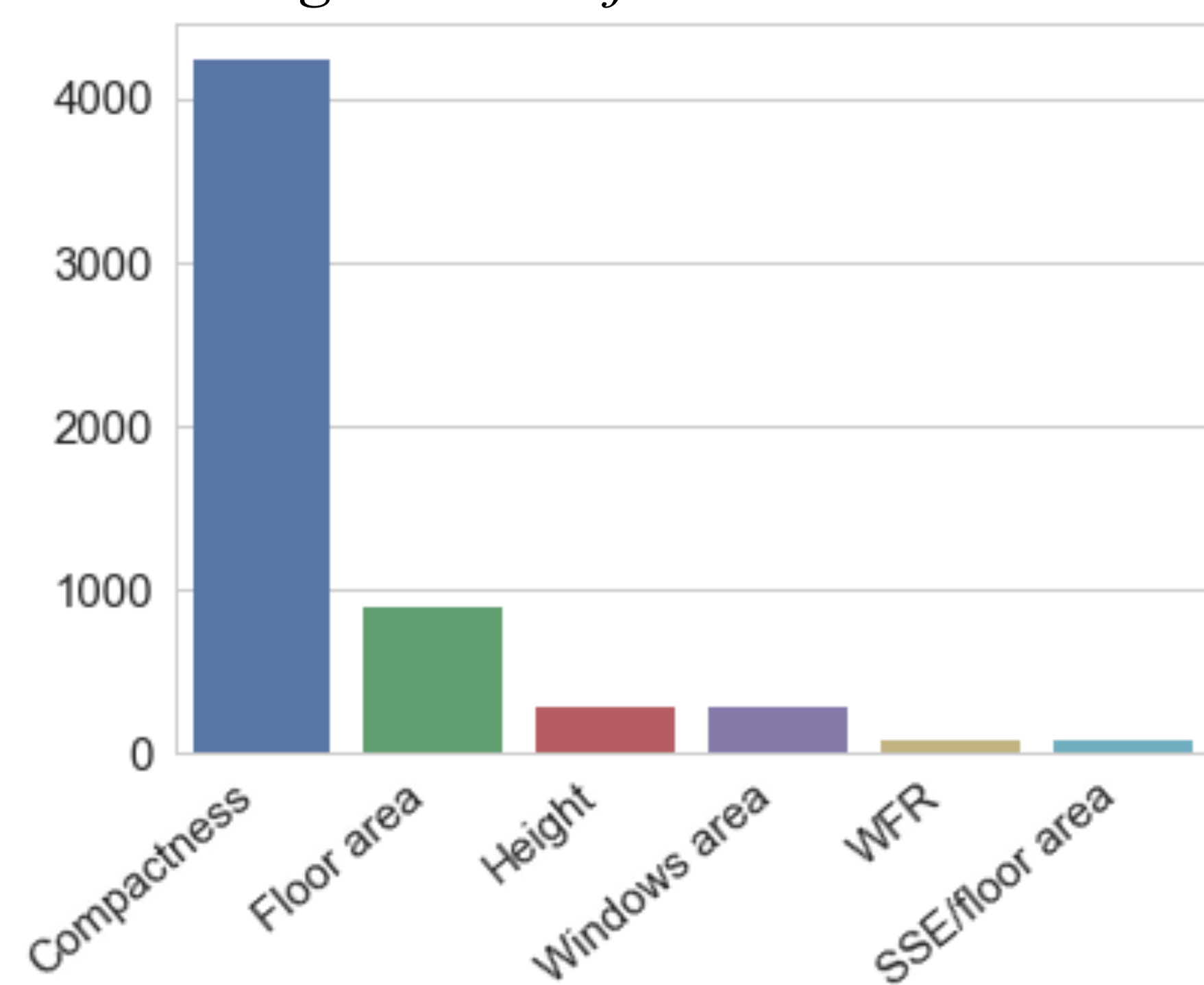


Figure 4 : F value of decision features

Objective cluster	Maximum ARI	Decision cluster of maximum ARI
C01	0.336	Subspace 1, Cluster 2
C02	0.188	Subspace 1, Cluster 3
C03	0.228	Subspace 8, Cluster 8
C04	0.385	Subspace 8, Cluster 1
C05	0.315	Subspace 6, Cluster 6
C06	0.283	Subspace 9, Cluster 5
C07	0.286	Subspace 8, Cluster 4
C08	0.398	Subspace 2, Cluster 7
C09	0.550	Subspace 8, Cluster 7

Table 3 : Cluster pairs selected by ARI

values. The highest ARI was 0.550, and certain objective clusters did not have corresponding decision clusters of high ARI values. Because of the lack of a threshold, the maximum ARI for each objective cluster was selected to determine the corresponding decision cluster. Figure 5 shows that the best-fit decision clusters for the objective clusters 4 and 9 were found in the LDA subspace 8.

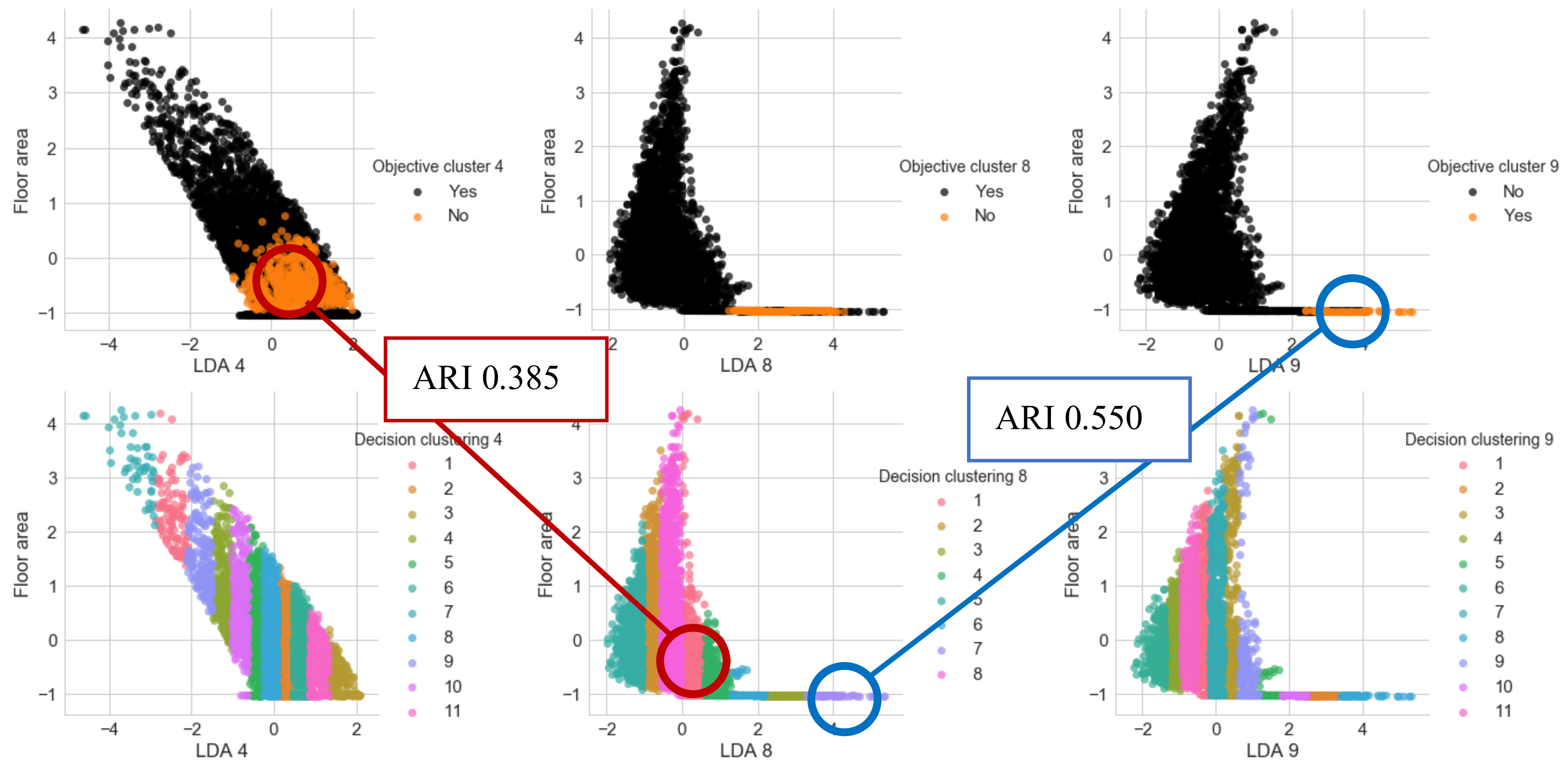
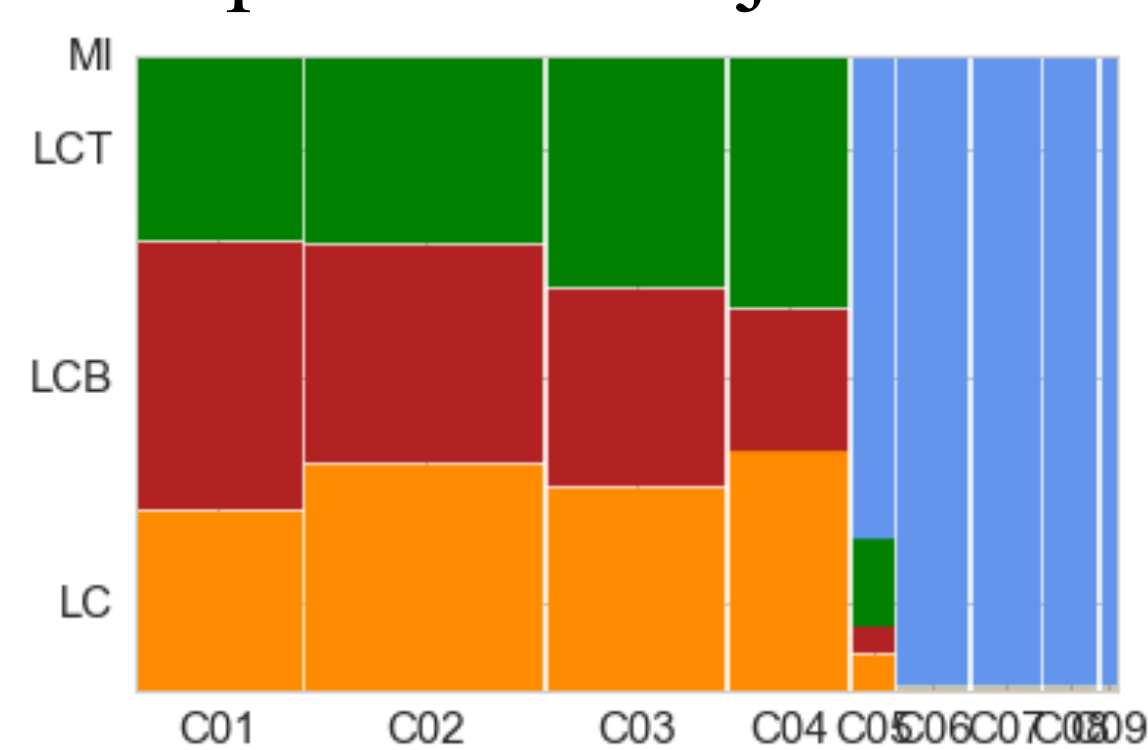


Figure 5 : Objective clusters and decision clusters on some decision subspace

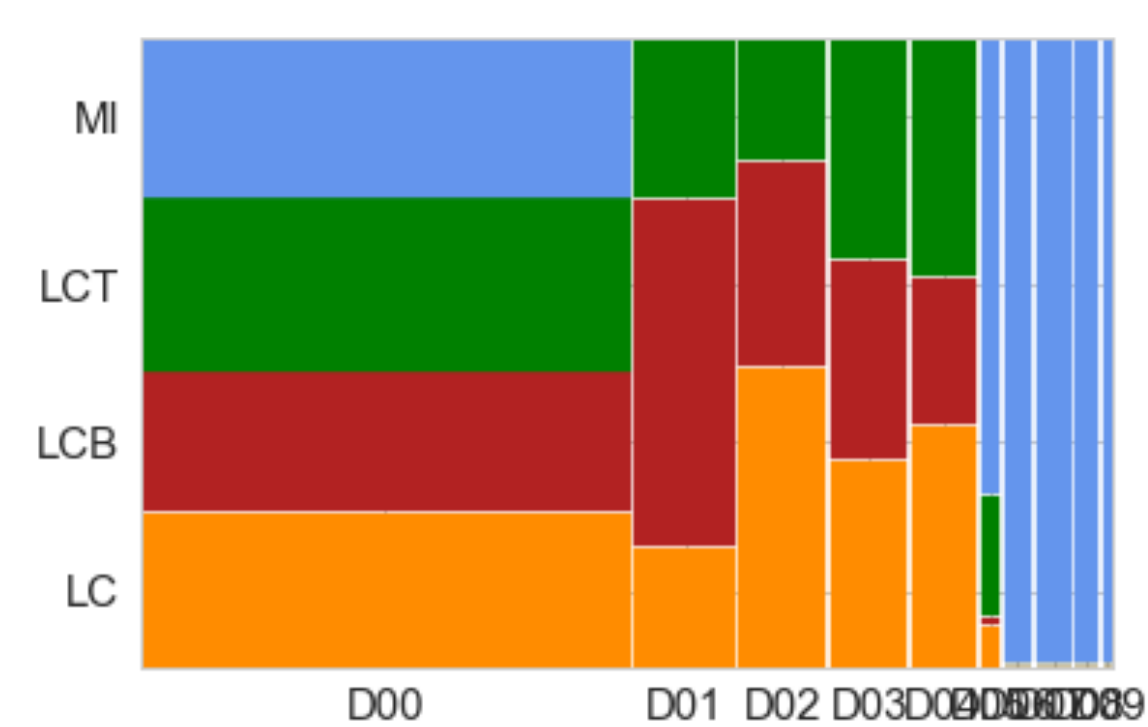
3.3.2. Intersection as final clusters

The intersection of the objective cluster and the corresponding decision cluster was determined as the final cluster. The buildings excluded from the intersection were considered as unclassified buildings. The final clusters were named from D01 to D09 which correspond to the objective clusters C01 to C09 and D00 for the unclassified. The final clusters have 1755 buildings (43.9%) and the others (2245 buildings, 56.1%) were assigned to the unclassified buildings.

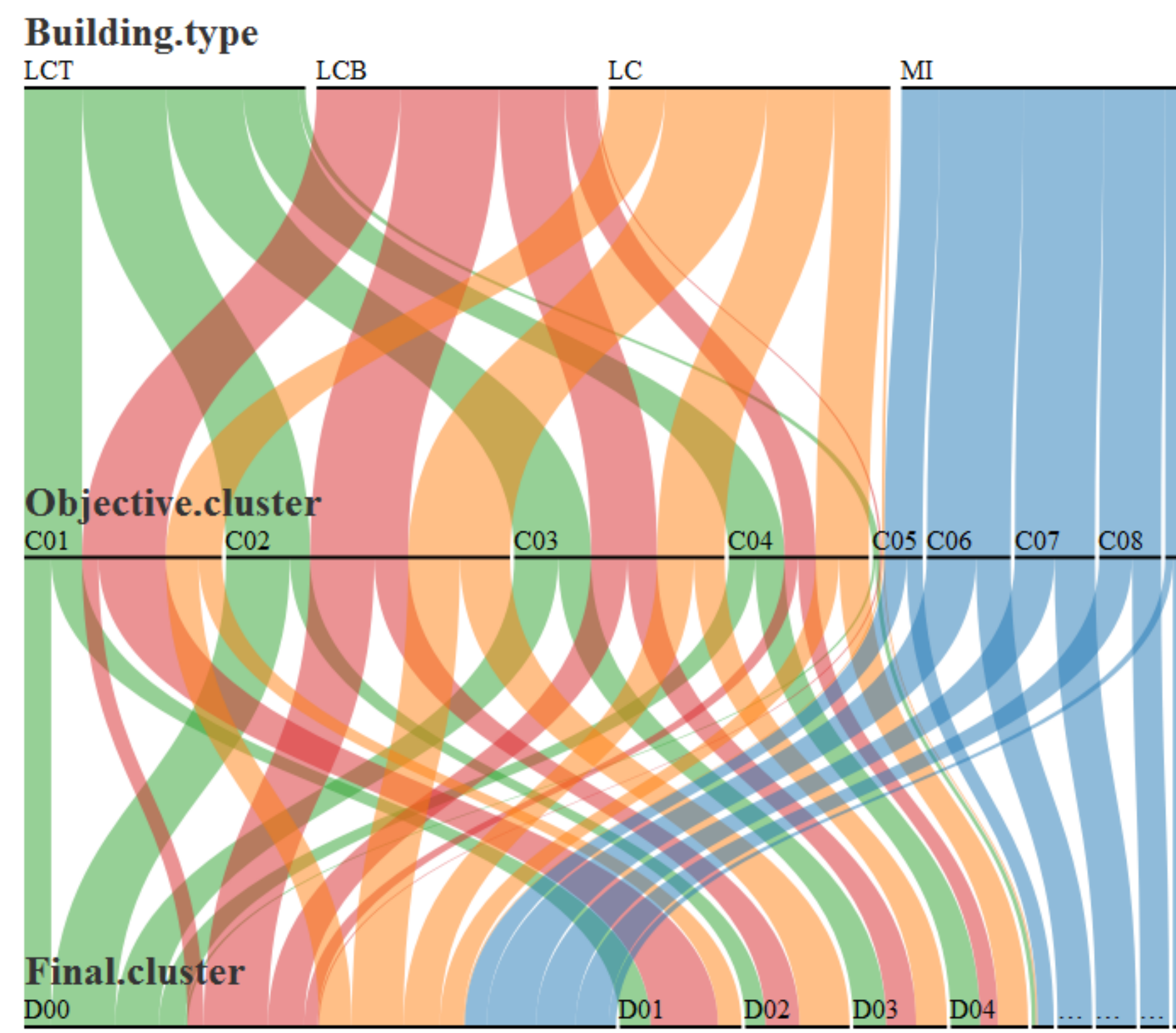
3.3.3. Comparison of objective clusters and final clusters



(a) Objective clusters



(b) Final clusters



(c) The transition from building types to clusters

Figure 6 : Comparison between clustering results and building types of morphology

The comparison of the final clusters with the objective clusters and the four building types of morphology was shown in Figure 6. The proportion of building types in the resulting clusters kept constant in general. The LCBs were slightly less found in the unclassified cluster (D00) than the others. While the proportion of LCBs increased in D01 than in C01 (low-energy-consuming), it decreased in

D05 than in C05 (medium-energy-consuming). The collective buildings tended to be more unclassified than the individual houses.

To find which features were significant or not to determine the clusters, significance probability (p-value) of features were evaluated. The significance probability is defined as a probability for a given statistical model that the sample difference is same or greater than the actual observation. A common threshold of p-value is 0.05 (5% of probability) but smaller values are recommendable.

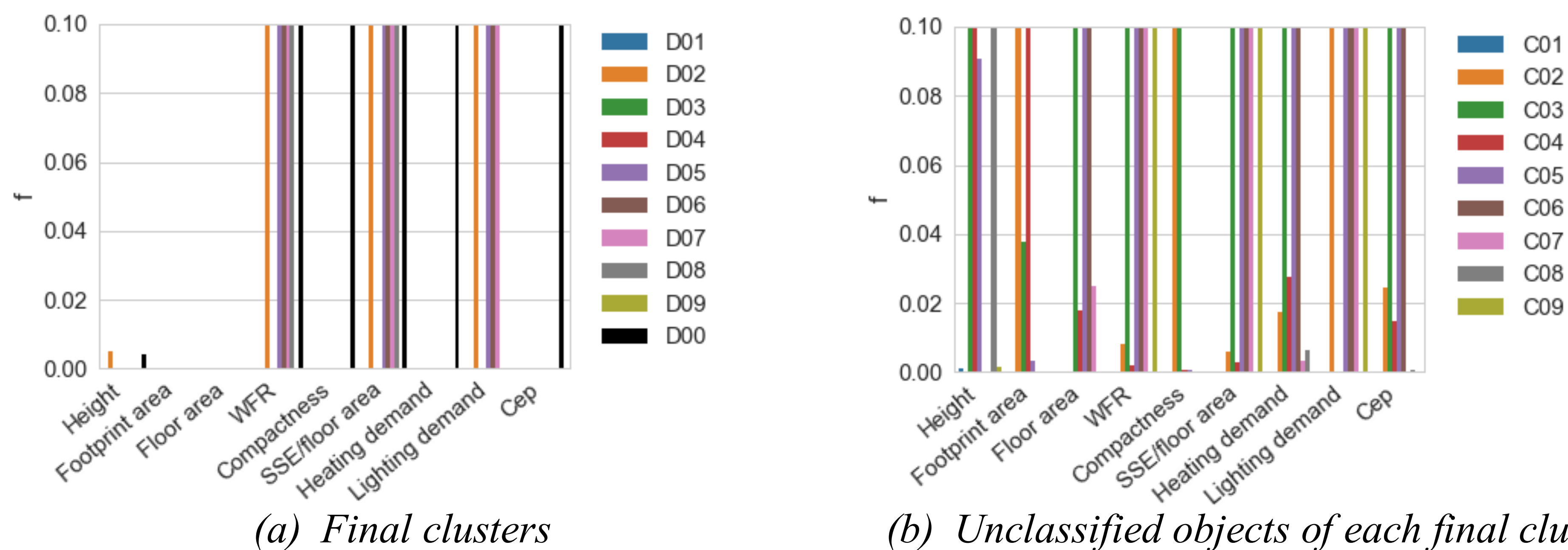


Figure 7 : Significance probability of features (the shorter is the more significant)

Figure 7 shows that the height, the areas, the compactness, the heating energy demand and the primary energy consumption are significant (f less than 0.05) features for the most clusters. On the other hand, the other features (WFR, SSE per floor area, and lighting energy demand) appeared more or less significant for certain clusters, particularly the individual houses (D02, D05, D06, D07, and D08). Concerning the unclassified objects, C01 divided into D01 and D00 by all the features. On the other hand, D03 was selected from C03 by the lighting demand. In the same way, the significant features for the classified objects and the unclassified ones for each objective cluster could be analyzed.

4. CONCLUSION

The feasibility of the introduced method for clustering in two spaces was verified. The results showed that the dimensionality of decision space could be reduced by the application of LDA, which is usually used as a classifier for a supervised learning. Some decision clusters in decision subspaces obtained by LDA showed a close connection with the objective clusters. The considerable part of objective clusters, particularly collective housings, were reproduced in decision subspaces. On the other hand, individual houses were found in unclassified buildings, which was the largest part of final clusters. More detailed analysis of the unclassified buildings might allow us interesting knowledge. The division of two spaces made ARI, which is usually used for the classification, a supervised learning technique, usable the performance estimation of clustering, which is a sort of unsupervised learning due to the division of two feature spaces, i.e. the objective space and the decision space. Lastly, the characterization of clusters, which are usually possible in a qualitative manner, was tried in a quantitative way through ANOVA and significance probability test, and the different tendency of clusters could be observed depending on the clusters.

The results offer the possibility of further studies as well. Firstly, different dimensionality reduction technique can be considered. More dimensionality reduction techniques are worth to be compared with LDA. Secondly, other metrics of evaluation of clusters on two spaces can be reviewed. While ARI tends to stress on the overall agreement of two clusters, other metrics are able to find the agreement when a

cluster is a total subset of the other cluster. It would be possible to improve the final clusters by introducing more appropriate metrics. At last, the energy retrofit scenarios and their economics still remain as the interesting and important subject of further studies.

5. BIBLIOGRAPHY

- Biljecki, F., H. Ledoux, and J. Stoter. 2016. “Generation of Multi-Lod 3D City Models in Citygml With the Procedural Modelling Engine Random3Dcity.” *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences IV-4/W1* (September): 51–59. <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-IV-4-W1-51-2016>.
- CSTB. 2008. “Méthode de Calcul TH-C-E Ex : Annexe à l’arrêté Portant Approbation de La Méthode de Calcul TH-C-E Ex.”
- Deb, Chirag, and Siew Eang Lee. 2018. “Determining Key Variables Influencing Energy Consumption in Office Buildings through Cluster Analysis of Pre- and Post-Retrofit Building Data.” *Energy and Buildings* 159. Elsevier B.V.: 228–45. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.11.007>.
- Delphine, Destruel, and Boisson Pierre. 2016. “Rapport : Règles d’ Estimation Des Quantitatifs Pour Le Module de Calcul de CASIE².”
- Gauthier, Noémie. 2014. “Analyses Morphologiques de Formes Urbaines et Etude de l’impact Des Formes Urbaines Sur Les Gains Energetiques Solaires.”
- Geyer, Philipp, Arno Schlüter, and Sasha Cisar. 2017. “Application of Clustering for the Development of Retrofit Strategies for Large Building Stocks.” *Advanced Engineering Informatics* 31. Elsevier Ltd: 32–47. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2016.02.001>.
- Lee, Yunseok, Pierre Boisson, Mathieu Rivallain, and Olivier Baverel. 2016. “Application de Techniques de Clustering Pour La Segmentation de Parcs de bâTiments à Rénover.” In *Conférence IBPSA France*. Marne-la-Vallée.
- LSE Cities, and EIFER. 2014. “Cities and Energy: Urban Morphology and Heat Energy Demand.” London.
- Mata, É, A. Sasic Kalagasidis, and F. Johnsson. 2014. “Building-Stock Aggregation through Archetype Buildings: France, Germany, Spain and the UK.” *Building and Environment* 81. Elsevier Ltd: 270–82. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.06.013>.
- Nikolaou, T., I. Skias, D. Kolokotsa, and G. Stavrakakis. 2009. “Virtual Building Dataset for Energy and Indoor Thermal Comfort Benchmarking of Office Buildings in Greece.” *Energy and Buildings* 41 (12): 1409–16. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2009.08.011>.
- R. A. Fisher. 1936. “The Use of Multiple Measurements in Taxonomic Problems.” *Annals of Eugenics* 7 (2): 179–88. <https://doi.org/10.1111/j.1469-1809.1936.tb02137.x>.
- “RT Existant: Outils et Guides Pour Le DPE.” n.d. Accessed April 20, 2018. <http://www.rt-batiment.fr/batiments-existants/dpe/outils-et-guides-pour-le-dpe.html>.
- Silva, David Da, Jean-marie Alessandrini, Jean-baptiste Videau, and Jean-robert Millet. 2016. “Evaluation et Perspectives Du Modèle Thermique de COMETH , Le Cœur de Calcul de La Réglementation Thermique Des bâTiments Neufs.” In *Conférence IBPSA France*. Marne-la-Vallée.
- Stein, Britta, Tobias Loga, Nikolaus Diefenbach, Bogdan Atanasiu, Aleksandra Arcipowska, Eleni Kontonasiou, Gašper Stegnar, et al. 2014. “Inclusion of New Buildings in Residential Building Typologies Steps Towards NZEBs Exemplified for Different European Countries National Observatory of Athens.” Darmstadt, Germany.
- TABULA Project Team. 2012. “Typology Approach for Building Stock Energy Assessment - Main Results of the TABULA Project,” no. June 2009: 43.

Audits énergétiques de 23 hôtels à l'île Maurice – mesures électriques et thermiques

Aurélie Lenoir*¹

¹ Bureau d'études IMAGEEN, 12 ruelle Fuma, 97430 Le Tampon, Réunion
[*aurelie.lenoir@imageen.re](mailto:aurelie.lenoir@imageen.re)

RESUME. Dans le cadre du Programme National d'Efficacité Energétique (PNEE) de l'île Maurice, une centaine d'audits énergétiques ont été réalisés entre 2015 et 2017 sur les secteurs d'activité les plus consommateurs du territoire. Cet article présente les résultats des audits énergétiques réalisés dans le secteur hôtelier sur 23 hôtels.

Des comparaisons seront établies entre les 23 hôtels en fonction de leur mode de production de climatisation.

Les mesures électriques sur le départ général ainsi que sur plusieurs usages de différents hôtels seront présentés afin de montrer la courbe de charge. On présentera également les mesures thermiques réalisées sur des installations d'eau glacée et de production d'eau chaude sanitaire.

Les bilans énergétiques des hôtels ont été établis afin d'évaluer l'impact énergétique, financier et environnemental des actions d'efficacité énergétique proposées. On s'interrogera sur la pertinence des indexes de consommation par surface ou par client.

MOTS-CLÉS : audit énergétique, mesures électriques, mesures thermiques

ABSTRACT. As part of the National Energy Efficiency Program (NEEP) in Mauritius, a hundred energy audits have been carried out between 2015 and 2017 on the most energy consumer sectors of the territory. This article presents the results of audits carried out on 23 hotels.

Comparisons are made between the 23 hotels depending on their type of production of air conditioning.

The electrical measurements on the general electricity supply as well as several uses of different hotels will be presented to show the load curve. Also thermal measurements on chilled water and hot water systems are displayed.

The hotel energy balances have been drawn to assess the energy, financial and environmental impact of energy efficiency actions proposed. We will question the relevance of consumption indices by surface or by customer.

KEYWORDS : energy audit, electrical measurements, thermal measurements

1. INTRODUCTION ET CONTEXTE

Dans le cadre du Programme National d'Efficacité Energétique (PNEE) de l'île Maurice, une centaine d'audit énergétiques ont été réalisés entre 2015 et 2017 sur les secteurs d'activité les plus consommateurs du territoire. Le programme est divisé en secteur d'activité : grande distribution, textile et hôtellerie, ainsi qu'en typologie d'usage : pompes et ventilateurs, usage froid, usage vapeur, usage air comprimé, usage eau chaude solaire. Ce programme a été financé en partie par la ligne de crédit SUNREF de l'Agence Française du Développement ainsi que par l'Union Européenne.

Les objectifs du PNEE sont de réduire la consommation de 10 à 15% pour les entreprises participantes. A l'échelle national, le potentiel d'économies d'énergie représente 30 millions d'euros et

40 MW de production électrique économisée. Ces économies potentielles représentent 173 tonnes de CO₂ d'émissions évitées.

En effet, l'énergie électrique à l'île Maurice est produite à 80% à partir de ressources fossiles (charbon, diesel, essence, gaz) et contient seulement 20% d'énergies renouvelables (principalement hydraulique et bagasse – résidu de la canne à sucre). La demande en électricité a fait l'objet d'une forte croissance sur la dernière décennie avec une augmentation de 3 à 4% par an (Energy Efficiency Management Office, 2012). Cette croissance peut être comparée à une augmentation de 1,1% entre 2000 et 2010 et de 0,1% par an depuis 2010 en France métropolitaine (Berghamns, 2017). L'énergie électrique fortement carbonée à l'île Maurice émet en moyenne 815 g de CO₂ équivalent par kilowattheure. Ces émissions sont dix fois supérieures à celle de l'électricité produite en France métropolitaine.

Le tourisme est le deuxième pilier de l'économie mauricienne avec 1,2 millions de touristes en 2016 et 1,3 millions en 2017 soit une augmentation de 5% (Ministry of Finance & Economic Development, 2018). L'objectif est d'atteindre 2 millions de visiteurs par an d'ici 2025.

Cet article présente les résultats des audits réalisés sur 23 hôtels de l'île Maurice. Ils ont été réalisés entre 2015 et 2017 par deux groupements composés des entreprises réunionnaises suivantes : bureau d'études IMAGEEN, bureau d'études Be Green Engineering, entreprise TEEEO, entreprise CLIMEO. Les hôtels audités font partie des groupes hôteliers suivants : LUX*, Beachcomber, Attitude, Indigo, ENL, Héritage, Intercontinental, Veranda. Les données de consommations présentées pour ces hôtels ont été agrégées afin de respecter la confidentialité de chacun de ces établissements.



Figure 1. Localisation des hôtels audités à l'île Maurice et groupes hôteliers

2. RATIO ENERGETIQUE DES 23 HOTELS AUDITES

Les sources d'énergie sur les hôtels sont de l'électricité (82% des coûts de l'énergie en moyenne), du gaz pour la cuisson et parfois pour la production d'eau chaude sanitaire (15% des coûts) et du fuel pour les groupes électrogènes en cas de coupure électrique ainsi que pour la production d'eau chaude sanitaire de certains hôtels (3% des coûts totaux de l'énergie en moyenne). L'énergie consommée sur

site est exprimée en énergie primaire. Le taux de conversion de l'énergie primaire en électricité à l'île Maurice est de 2,6 en intégrant le transport et la distribution de l'électricité.

Ces trois sources d'énergie sont comparées dans le tableau 1 en fonction de leur prix et de leurs émissions de CO₂ équivalentes. On note que l'électricité est l'énergie la plus chère en kilowattheure équivalent et également la plus impactante pour l'environnement.







	Electricité 	Gaz 	Fuel 
PCI		12,79 kWh/kg	11,86 kWh/kg
Prix 	De 6,1 à 6,7 MUR/kWh Moyenne : 6,5 MUR/kWh	61 MUR/kg Soit 4,77 MUR/kWh	35 MUR/L Soit 3,45 MUR/kWh
Pour 1 roupie 	0,15 kWh	0,21 kWh	0,29 kWh
Emissions de 	816 g CO₂/kWh	233 g CO₂/kWh	268 g CO₂/kWh
Conversion EP/EF	2,6		

Tableau 1. Comparaison des sources d'énergie en fonction de leur coût et de leur impact environnemental

Au total, les coûts annuels de l'énergie vont de 7 à 94 millions de roupies sur les hôtels audités (soit 175 k€ à 2,4 millions d'euros). La consommation d'énergie primaire varie de 2 500 MWh/an à 37 GWh/an.

Il n'existe pas d'étiquette énergie adaptée à la consommation des bâtiments à l'île Maurice. L'étiquette utilisée ici est définie dans le cadre des audits énergétiques de la performance des bâtiments publics en France métropolitaine (Arrêté du 7 décembre 2007 relatif à l'affichage du diagnostic de performance énergétique dans les bâtiments publics en France métropolitaine, 2007). L'étiquette énergie est définie pour un bâtiment à occupation continue (hôpitaux, hôtels...).

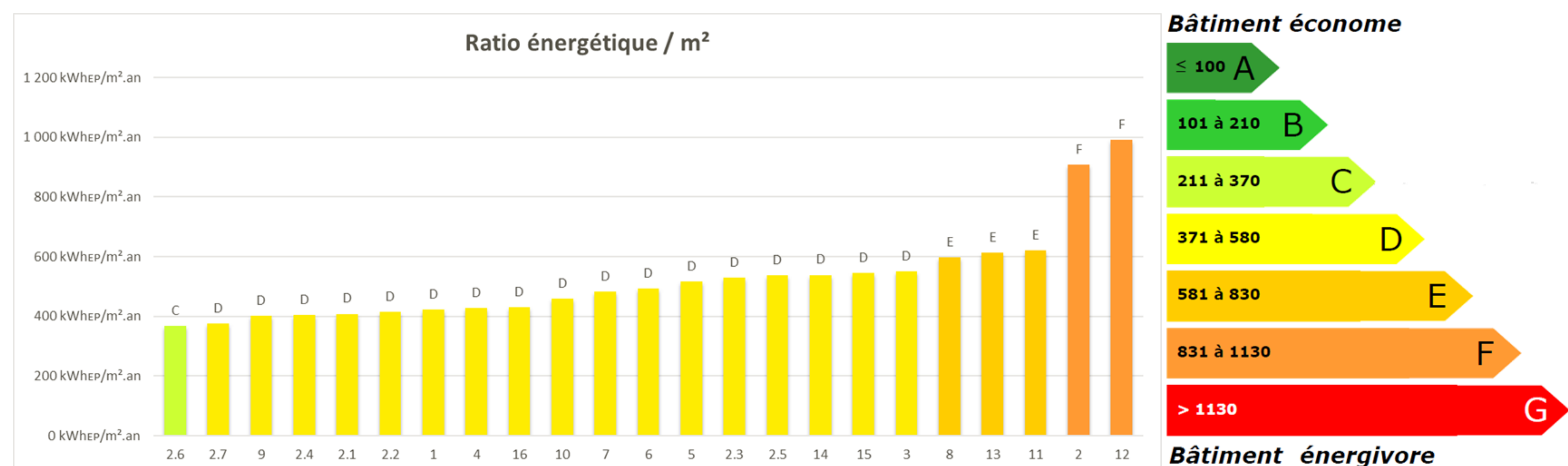


Figure 2. Etiquette énergie des hôtels audités

La figure 2 présente les étiquettes énergie des 23 hôtels audités. On note que les ratios de consommation par surface varient entre 370 et 990 kWh_{EP}/m².an, ce qui correspond à des étiquettes de C à F. Il faut noter que les données de surfaces des hôtels n'étaient pas toutes fiables et que les zones intégrées étaient parfois variables (surface couverte, coursives, escaliers...). Ceci pose question sur l'intérêt du ratio énergétique par surface. Il est proposé également un ratio d'étiquette énergétique par nombre de clients annuels

3. REPARTITION DES CONSOMMATIONS ELECTRIQUES PAR USAGE

3.1. MOYENNE DES CONSOMMATIONS PAR USAGE

Les consommations électriques par usage ont été estimées en fonction des mesures électriques effectuées sur les hôtels, ainsi qu'en fonction des puissances installées et de scénarios d'utilisation des équipements. La répartition des consommations électriques sur les 23 hôtels est donnée sur la figure 3.

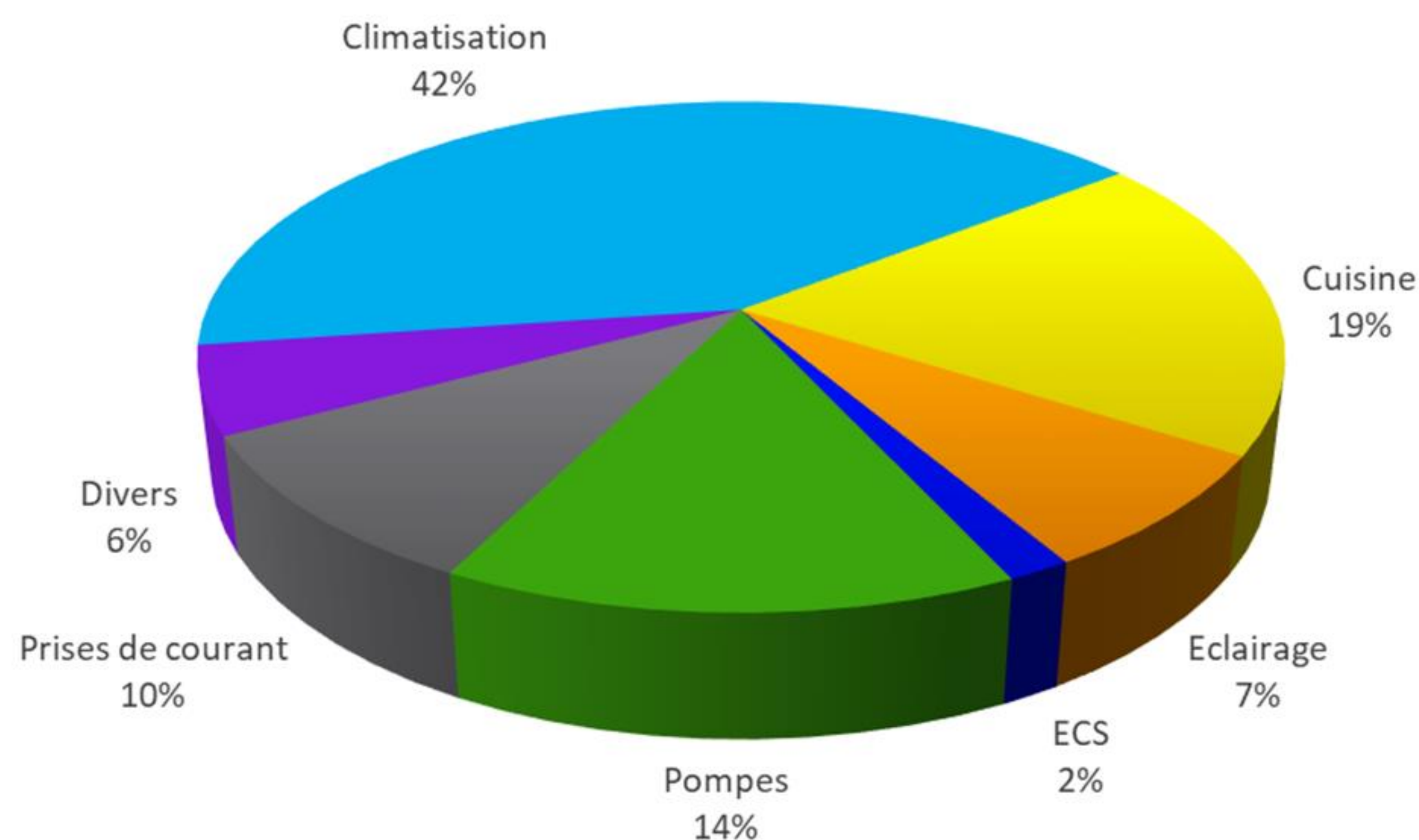


Figure 3. Répartition des consommations électriques par usage pour les 23 hôtels audités

On note que la climatisation est l'usage électrique le plus important. Il représente près de la moitié des consommations électriques (42% en moyenne). Les cuisines viennent en deuxième position avec 19% des consommations électriques (à cause des fours électriques, chambres froides et autres équipements frigorifiques). Les pompes représentent 14% des consommations en moyenne mais cet usage est très variable (de 3 à 34%). Certains hôtels possèdent une station d'épuration et/ou une station de dessalement de l'eau de mer. Ces stations sont parfois communes à plusieurs hôtels.

Les prises de courant représentent les appareils électriques présents dans les chambres (minibar, bouilloire, télévision, sèche-cheveux...), ainsi que les équipements informatiques de l'administration. L'éclairage représente 7% de la consommation en moyenne. L'usage divers correspond généralement aux sauna et hammams des spas. La part de 2% pour la production d'eau chaude sanitaire (ECS) est liée aux pompes de circulation car l'eau chaude n'est généralement pas produite à partir d'électricité dans les hôtels audités.

Cette répartition est proche de celle donnée par un guide sur l'efficacité énergétique dans les hôtels en Thaïlande réalisé par l'organisation mondiale du tourisme (PEEK, 2010) avec une part de 45% pour la climatisation, 12% pour les pompes et ventilateurs. A noter que dans ce guide datant de 2010, la part liée à l'éclairage était de 19% alors qu'elle est de 7% sur les hôtels mauriciens. On a noté que les types d'éclairage avaient largement été améliorés au cours des dernières années en remplaçant les incandescents et halogènes par des ampoules fluo compactes ou LED.

3.2. CONSOMMATION PAR USAGE ET PAR CLIENT

Les consommations électriques par client et par usage sont représentées sur la figure 4. On note que ces ratios varient quasiment d'un facteur 10. Les ratios vont de 13 à 119 kWh/client.

Quelques précisions permettent de mieux comprendre ces différences importantes. Les hôtels 2.4, 2.5, 2.6, 2.7 et 12 sont des hôtels familiaux avec de petites chambres et beaucoup de clients par chambre. L'hôtel 16 a une démarche de sensibilisation de la clientèle avec un affichage des consommations aux clients pour leur faire prendre conscience de leur impact environnemental pendant leurs vacances. A l'inverse, les hôtels 1 et 2 sont des hôtels d'affaires donc généralement avec un seul client par chambre. L'hôtel 14 possède de très grandes chambres ce qui explique que le ratio de climatisation soit élevé.

Le ratio de consommation exprimé en kWh/client nous semble plus adapté aux décideurs que le ratio exprimé en kWh/m². Mais les référentiels donnent généralement des chiffres en kWh/m².

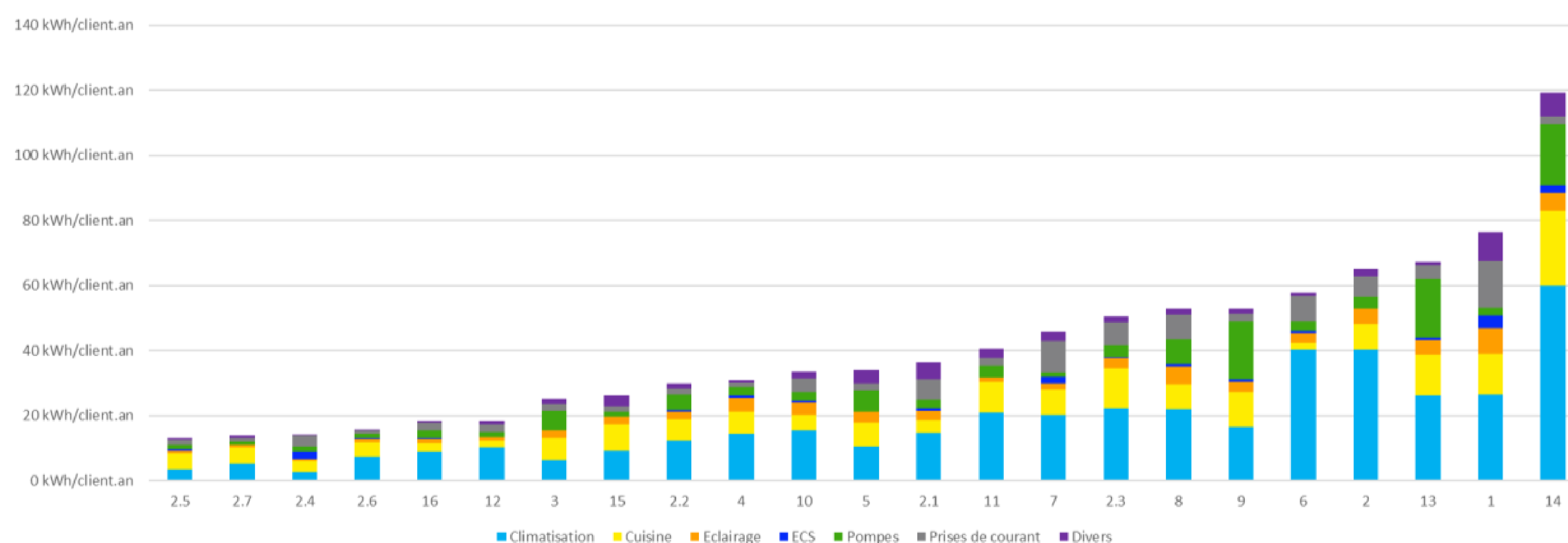


Figure 4. Répartition des consommations électriques par usage et par client

3.3. CONSOMMATION ELECTRIQUE LIEE A LA CLIMATISATION PAR CLIENT

La consommation électrique liée à la climatisation par client en fonction du type de production est représentée sur la figure 5. Les trois types de production de climatisation sur les hôtels sont des productions centralisées par groupes d'eau glacée, les climatiseurs individuels de type split system et une production semi-centralisée par bloc de chambres de type VRV (volume de réfrigérant variable).

Globalement la consommation liée à la climatisation varie de 3 à 60 kWh/client. Pour les productions de type groupe à eau glacée, la consommation varie de 10 à 60 kWh/client. Les systèmes équipés de récupération de chaleur pour la production d'eau chaude sont encadrés en bleu foncé. L'hôtel 14 qui présente la consommation la plus importante était équipé d'un groupe vétuste qui devait être remplacé.

Pour les hôtels climatisés par des split system, on note que la consommation varie de 3 à 40 kWh/client. Les hôtels 2.4, 2.5, 2.6 et 2.7 sont des hôtels familiaux avec des petites chambres ce qui explique leur faible consommation. L'hôtel 7 était équipé de split anciens ce qui explique sa consommation importante.

Le seul hôtel équipé de groupe VRV présente une consommation de 10 kWh/client pour la climatisation.

On note que les systèmes de gestion de la climatisation dans les chambres (de type keytag ou détection de présence) sont particulièrement efficaces pour les climatiseurs individuels car ils permettent l'arrêt complet du système en l'absence des clients. En revanche, pour les productions par GEG, la gestion de la climatisation se montre moins efficace. En effet, la production d'eau glacée est

en fonctionnement toute l'année quel que soit le taux de remplissage de l'hôtel ou la température extérieure et des problèmes de régulation ont été notés sur de nombreux hôtels.

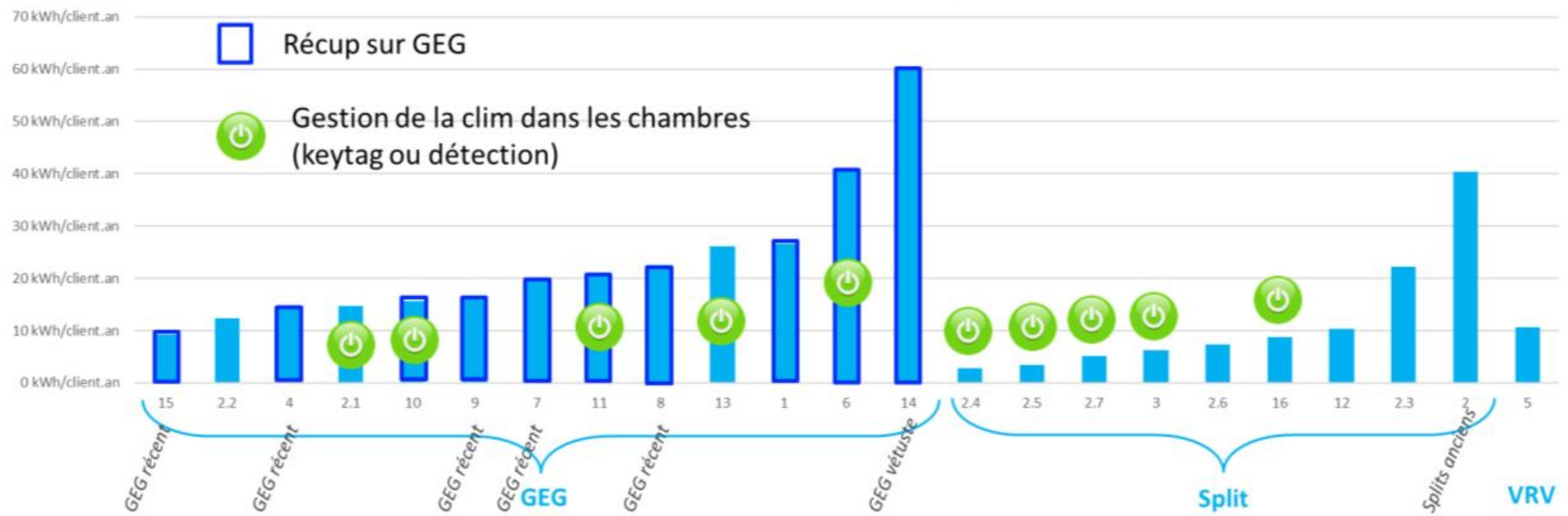


Figure 5. Consommation liée à la climatisation par client et par type de production

3.4. CONSOMMATION ELECTRIQUE LIEE AUX POMPES PAR CLIENT

La consommation électrique des pompes par client en fonction des stations présentes sur le site est représentée sur la figure 6. Les hôtels sont répartis en fonction de la présence ou non d'une d'une station d'épuration pour traiter les eaux usées et d'une station de dessalement de l'eau de mer. Les autres usages des pompes sont la distribution et la circulation d'eau glacée, froide et chaude, le relevage des eaux usées, la filtration des piscines.

Quelques précisions sont nécessaires pour comprendre ces consommations. L'hôtel 8 est sur un site de taille importante avec des réseaux de grande longueur ce qui explique les consommations importantes malgré l'absence de STEP et station de dessalement. L'hôtel 14 est équipé d'une STEP qui traite les eaux usées d'un hôtel voisin, par ailleurs, il est équipé de 3 grandes piscines. Les hôtels 5 et 10 sont équipés d'une station de dessalement mais celles-ci ne sont utilisées qu'en appoint en cas de coupure d'eau. L'hôtel 9 est équipé d'une STEP qui traite les eaux usées d'un hôtel voisin et il est équipé d'une piscine de très grande taille. L'hôtel 13 est équipé de 109 piscines ce qui explique la consommation très importante pour ses pompes.

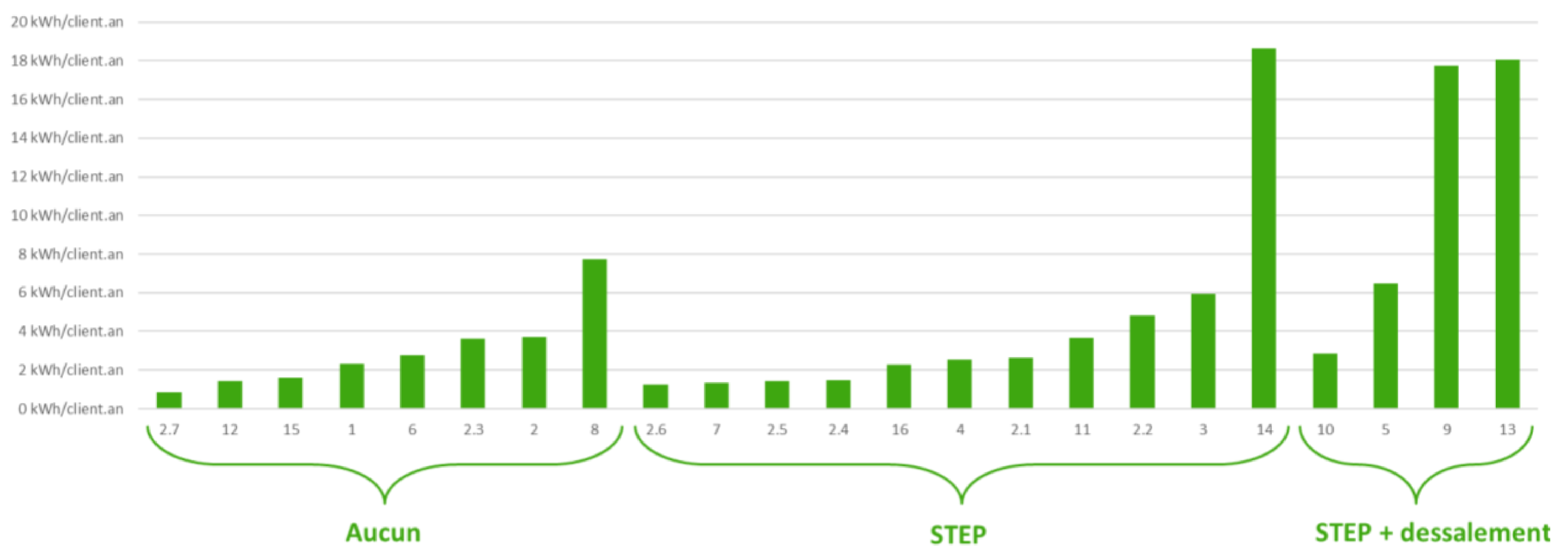


Figure 6. Consommation des pompes par client

4. MESURES ELECTRIQUES

Des mesures électriques ont été effectuées sur l'ensemble des hôtels audités. Le fonctionnement des hôtels est très reproductible d'une journée sur l'autre et des mesures sur 24 heures minimum sont généralement suffisantes pour avoir une bonne connaissance de l'évolution des consommations. Des mesures électriques sur 3 journées de février sont présentées sur la figure 7. Il s'agit d'un hôtel avec une production de climatisation centralisée par eau glacée.

On observe que les 3 journées mesurées sont largement reproductibles. La consommation enregistrée lors des mesures présente un écart de 5% avec la consommation moyenne journalière pour le mois de février ce qui indique que les mesures sont bien représentatives du fonctionnement de l'hôtel en été. La nuit, la puissance appelée ne descend pas sous 700 à 800 kW ce qui représente un talon important. Les mesures sur les différents usages permettent de décrire 70% de la consommation totale.

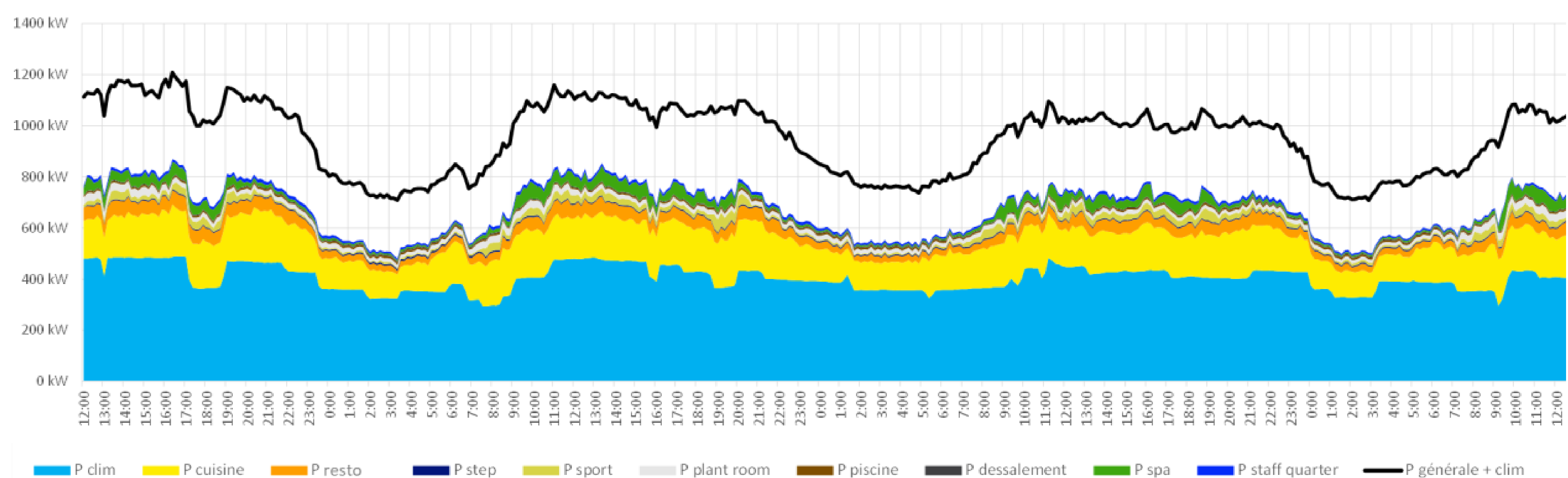


Figure 7. Courbe de charge générale et par usage d'un hôtel sur 3 jours au mois de février

La climatisation (en bleu turquoise) représente l'usage le plus important (41% sur la période de mesures). Les groupes sont en fonctionnement permanent et leur puissance diminue peu la nuit (350 kW la nuit et 500 kW la journée).

La surface jaune correspond à la puissance appelée par la cuisine principale (17% de la consommation totale). On note que la puissance appelée la nuit est de l'ordre de 100 kW. Un certain nombre d'équipements fonctionne en permanence (chambres froides, réfrigérateurs, congélateurs, tables froides) mais leur puissance installée ne représente que 70 kW ce qui n'explique pas toutes les consommations nocturnes. Il est donc très probable que l'extraction des cuisines (30 kW) restent en fonctionnement la nuit lorsque la cuisine n'est pas occupée. Leur arrêt nocturne (manuel ou sur horloge) représente une source d'économies importantes.

5. MESURES THERMIQUES SUR LES INSTALLATIONS D'EAU GLACEE

Des mesures thermiques ont été réalisées sur la distribution d'une installation d'eau glacée grâce à des débitmètres à ultrasons. Elles sont présentées sur la figure 8. La puissance frigorifique est de l'ordre de 200 à 300 kW quand la puissance électrique est de l'ordre de 90 à 120 kW. L'estimation de l'EER (energy efficiency ratio) sans les pompes est de 2,5 ce qui est proche de la valeur théorique du

système (2,77 selon le fabricant). En tenant compte des pompes de distribution, l'EER du système est de 1,7 sur la période de mesures.

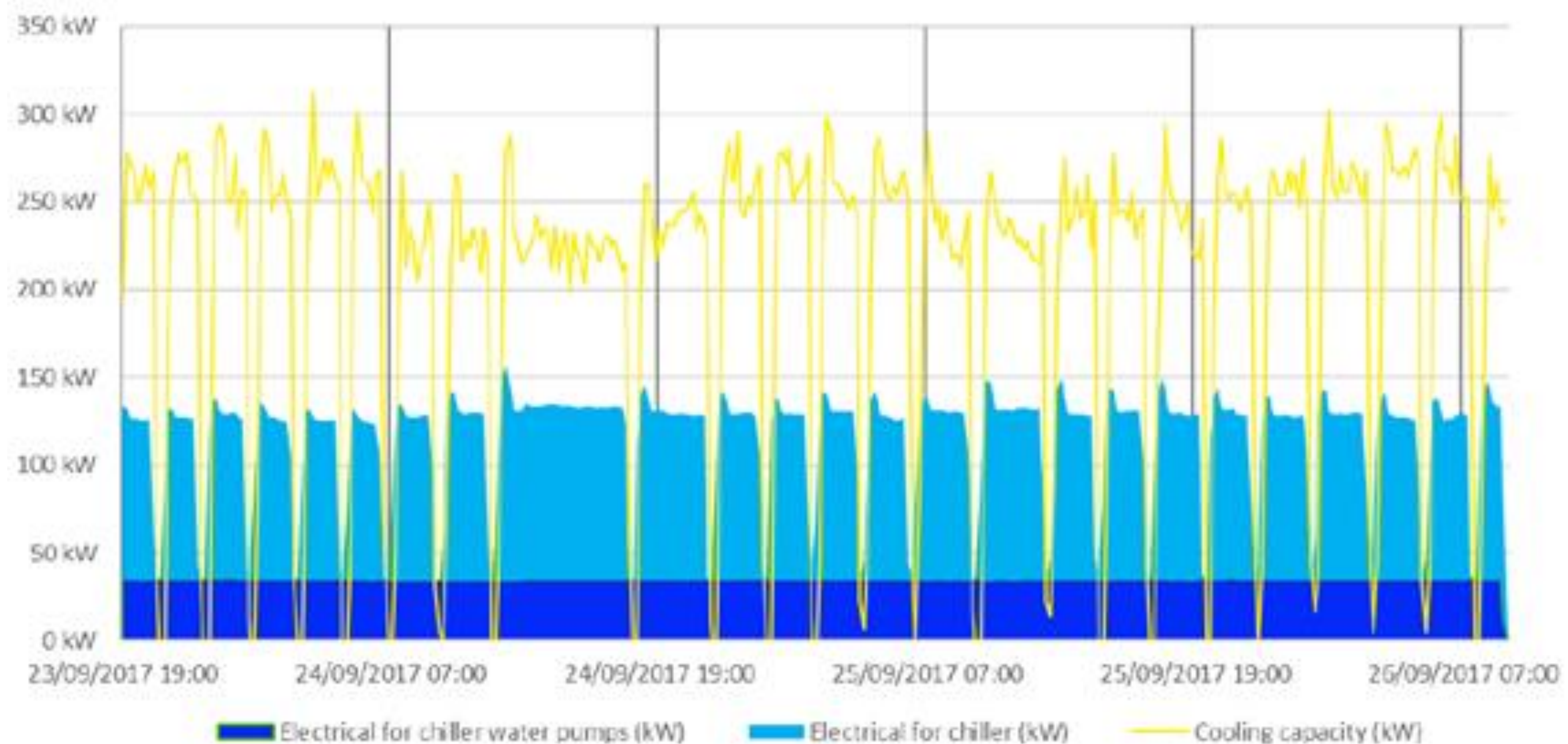


Figure 8. Puissance frigorifique et puissance électrique d'une installation d'eau glacée

6. MESURES THERMIQUES SUR LES INSTALLATIONS D'EAU CHAUDE SANITAIRE

Des mesures thermiques ont été réalisées sur la distribution d'une installation d'eau chaude sanitaire grâce à des débitmètres à ultrasons. Elles sont présentées sur la figure 9. On observe que la part liée au maintien en température de la boucle de distribution représente 50% de la puissance calorifique. Cette part est liée à la dimension importante du réseau de distribution mais pourrait être diminuée en remplaçant le calorifuge du réseau. Le puisage lié à l'entrée d'eau froide sur le réseau représente 50% de la puissance calorifique. Cette installation d'eau chaude est équipée de 2 chaudières au gaz. Le rendement de l'installation sur la période de mesures est de 72% et de 68% en tenant compte des pompes de distribution.

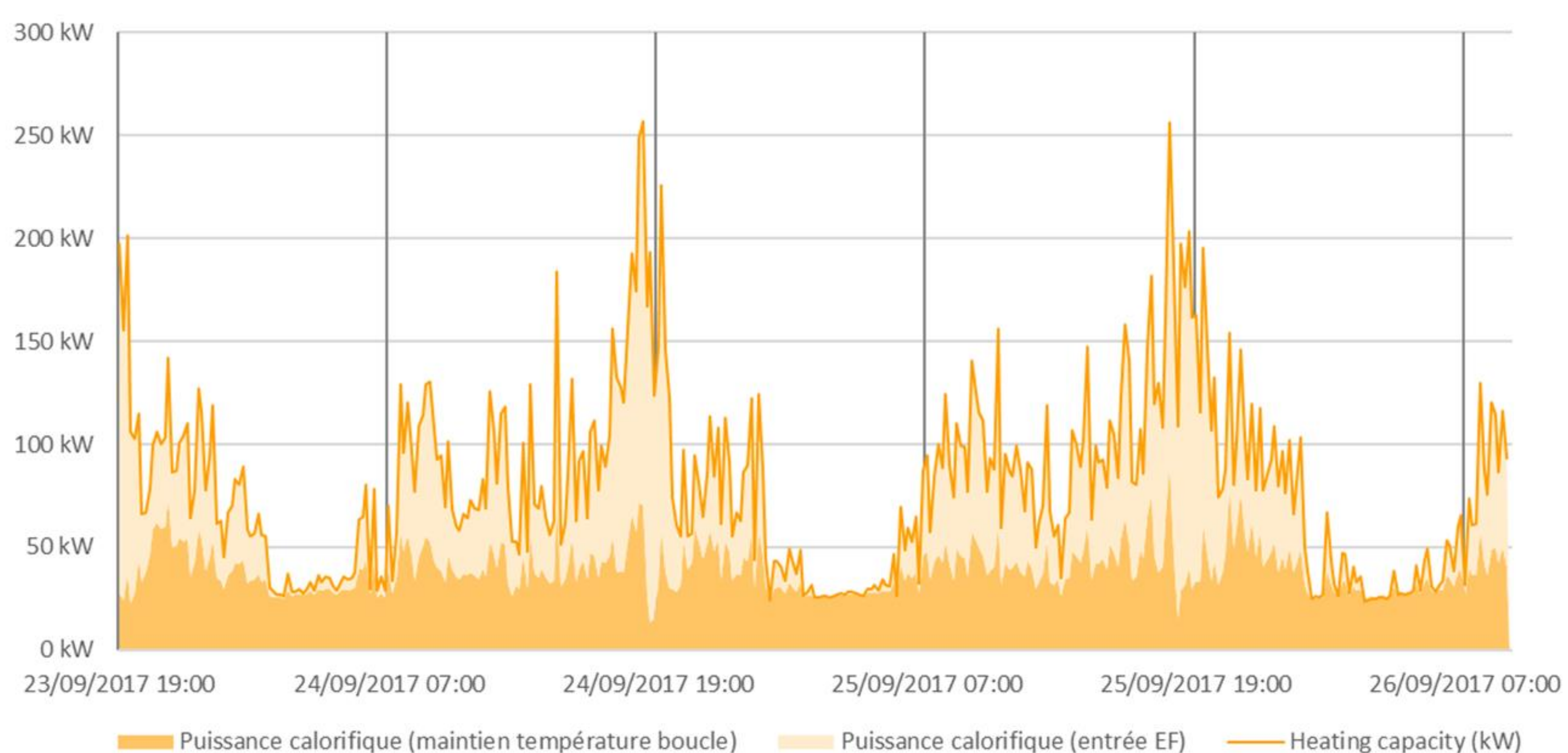


Figure 9. Puissance calorifique de la distribution d'eau chaude

7. BIBLIOGRAPHIE

Arrêté du 7 décembre 2007 relatif à l'affichage du diagnostic de performance énergétique dans les bâtiments publics en France métropolitaine. (2007, Décembre 7). Récupéré sur Legifrance: www.legifrance.gouv.fr/

Berghamns, N. (2017). La demande d'électricité en France : quels enjeux pour la transition énergétique ? (Iddri, Éd.) *Studies*(6/17), 32.

Energy Efficiency Management Office. (2012). *Energy Observatory Report.*

Ministry of Finance & Economic Development. (2018). *International travel & tourism.* Récupéré sur Statistics Mauritius: <http://statsmauritius.govmu.org/English/Pages/default.aspx>

PEEK. (2010). *Energy efficiency in Thai Hotels - a practical guide.* World Tourism Organization (UNWTO).

Proposition d'une méthode générique d'estimation de parcs de bâtiments de bureaux pour la simulation énergétique.

Victor Marty-Jourjon*, Thomas Berthou, Bruno Duplessis, Pascal Stabat

**Mines ParisTech, PSL Research University,
Centre d'Efficacité énergétique des Systèmes (CES)
60 boulevard Saint Michel, 75272 Paris Cedex 06,
*victor.marty-jourjon@mines-paristech.fr**

RESUME.

L'étude de stratégies énergétiques multi-échelles (quartier, ville, région) nécessite de nouvelles méthodes de simulation de parcs de bâtiments, basées sur l'utilisation de grandes bases de données, à large échelle et à maille fine. Ainsi, cet article se propose d'exploiter la base de données SIRENE®, récemment mise en accès libre, pour modéliser des surfaces de parcs de bâtiments de bureaux. Cette méthode fait notamment appel à des clefs de répartition pour affecter des surfaces de bureaux selon les catégories d'activités économiques et les effectifs de salariés. Des éléments de validation, apportés aux échelles locale (ville) et nationale montrent une bonne adéquation entre le modèle d'Estimation de Parc de Bâtiments de Bureaux (EPBB) et des données de référence.

MOTS-CLÉS : base de données, bâtiments de bureaux, parc

ABSTRACT.

Study of multi-scale (district, city, region) energy strategies requires new methods for building stock simulation built on databases characterized by a large scope and a local decomposition. Thus, in this paper, the recently released database SIRENE® is used to model office building surface stocks. Distributive keys are defined to allocate office surfaces according to the number of employees and the categories of business. Comparisons with other studies at city and national scale reveal a good fit between the Office building Stock Estimation model (OBSE) and the benchmark data.

KEYWORDS : data-driven model, office buildings, stock

1. INTRODUCTION

Le secteur du bâtiment résidentiel-tertiaire est responsable en France de 22% des émissions de CO₂ (ADEME 2013). La diminution de ces émissions est aujourd'hui indispensable pour faire face au changement climatique et répondre aux objectifs de l'Accord de Paris.

Afin d'affiner les stratégies de diminution des émissions de CO₂, de nombreux travaux portent sur le développement de modèles *bottom-up* de simulation de consommation d'énergie, basés sur l'utilisation de grandes bases de données, à large échelle et à maille fine (« data driven model » : DDM) (Buffat et al. 2017; Berthou et al. 2015). Ce type de modèle peut être utilisé à différentes échelles. A large échelle (région, pays), les DDM peuvent servir à modéliser des parcs de bâtiments représentatifs et appuyer la prise de décisions en matière de politiques énergétiques (Mata,

Kalagasidis, and Johnsson 2013; Tuominen et al. 2014). A l'échelle locale, le quartier fait l'objet de nombreuses études : cette échelle est suffisamment grande pour prendre en considération le tissu urbain et suffisamment petite pour mener à bien des projets concrets (Fonseca and Schlueter 2015). Ainsi, des DDM peuvent accompagner ces projets dans la mise en place de stratégies de gestion de l'énergie : réduction des consommations, production décentralisée, flexibilité de la demande (Fonseca et al. 2016; Braulio-Gonzalo et al. 2016; Robinson et al. 2009; Riederer et al. 2015).

La disponibilité des données d'entrée s'avère déterminante pour les DDM, cela d'une part pour éviter au maximum de faire appel à des enquêtes de terrains supplémentaires dans le cas d'études locales et d'autre part pour pouvoir utiliser les modèles de manière générique et à large échelle dans le cas d'études régionales ou nationales. En France, les principaux producteurs de données susceptibles d'être utilisées dans ce type de modèle sont l'INSEE¹ et l'IGN². Notamment, les bases de données BD_TOPO (IGN 2017) et recensement de population (RGP) (INSEE 2014) permettent de modéliser des parcs de bâtiments résidentiels (Berthou et al. 2015). Cependant dans le cas du secteur tertiaire l'exercice s'avère plus difficile, car il y a moins de données disponibles. L'une des premières étapes pour l'estimation des consommations d'énergie de ce secteur consiste à établir un modèle de parc, en distinguant la surface réservée aux différents usages tertiaires. Le secteur du tertiaire regroupe un grand nombre d'activités présentant des usages énergétiques, des modes constructifs et des profils de consommation singuliers. Cette étude se concentre sur les activités de bureaux, qui d'après (CEREN 2015), représentent en France, environ 8% de la consommation en énergie du secteur du bâtiment (résidentiel + tertiaire).

Il est présenté dans cette publication, une méthode générique de modélisation de parcs de bâtiments de bureaux à l'aide des bases de données de description des territoires en libre accès. Dans un premier temps, les données utilisées sont présentées. Ensuite la méthode de reconstitution générique de parcs d'établissements de bureaux est détaillée : il s'agit d'extraire, des informations disponibles, une évaluation de la surface de plancher des bâtiments de bureaux. Cette méthode fait notamment appel à des clefs de répartition de surface de bureaux selon l'activité économique. Pour finir, des éléments de validation sont apportés en comparant les surfaces de bureaux obtenues par la méthode développée avec d'autres estimations de la littérature.

2. METHODE GENERALE D'ESTIMATION DU PARC D'ETABLISSEMENTS DE BUREAUX

2.1. DONNEES SOURCES

La méthode générique proposée repose principalement sur la base de données SIRENE® (INSEE, n.d.). Diffusée en accès libre depuis 2017 par l'INSEE, cette base de données correspond aux besoins des DDM au sens où elle couvre une large échelle sur une maille fine. En effet, elle répertorie l'ensemble des établissements et entreprises actifs du pays, localisés à l'adresse. Environ 10 millions d'établissements sont représentés. De nombreuses données économiques et juridiques sont disponibles, et notamment les tranches d'effectifs de chaque établissement (Tableau 1)³. Cette

¹ INSEE : Institut national de la statistique et des études économiques

² IGN : Institut national de l'information géographique et forestière

³ Les effectifs de salariés et d'établissements SIRENE®, agrégés à l'échelle de la commune, ont été comparés aux données CLAP (INSEE 2016) . La comparaison fait apparaître que ces effectifs sont quasiment identiques dans chacune de ces bases de données (5% d'erreur en moyenne sur les 20 arrondissements de Paris, 3% d'écart type).

information correspond majoritairement à l'année n-2, les données utilisées ayant été téléchargées en 2017, elles seront millésimées à l'année 2015.

Ainsi, cette base de données permet d'obtenir sur un territoire donné, une liste d'établissements caractérisés par leur effectif de salariés et l'activité exercée selon la classification NAF A732. Ce type de données est particulièrement adapté aux DDM de type Smart-E (Berthou et al. 2015), qui prennent en entrée une liste d'établissements caractérisés par plusieurs attributs dont le nombre d'occupants et la surface utile. En ajoutant à cela des données techniques sur les bâtiments et les systèmes, ainsi que des données d'emplois du temps, des courbes de consommation d'énergie pourront être estimées par des modèles simplifiés de systèmes et de bâtiments.

Tranche d'effectif	Effectif retenu⁴
1 à 2 salariés	1,5
3 à 5 salariés	4
6 à 9 salariés	7,5
10 à 19 salariés	14,5
20 à 49 salariés	34,5
50 à 99 salariés	74,5
100 à 199 salariés	149,5
200 à 299 salariés	249,5
Au de-là	Effectif à la centaine près

Tableau 1 : Tranches d'effectifs proposés dans la base de données SIRENE® et effectifs retenus dans le modèle.

2.2. IDENTIFICATION DES SALARIES DE BUREAUX

Les effectifs de salariés, calculés selon la méthode précédemment décrite, considèrent l'ensemble des postes salariés d'une commune sans distinction. La première étape de la méthode consiste à séparer les salariés travaillant dans des bureaux des autres à l'aide de clés de répartition.

Cette distinction peut être faite en effectuant un tri binaire sur les activités NAF, où seules les activités considérées comme liées à du travail de bureau sont retenues (APUR 2015; ARENE 2009). Cette approche peut impliquer des erreurs car la majorité des activités tertiaires ne sont ni à 100%, ni à 0% des activités de bureau. Pour nuancer cette approche, des coefficients correspondant aux pourcentages d'actifs travaillant dans des bureaux sont estimés pour chaque catégorie d'activité (au sens des codes NAF A38, Tableau 3). Ces clés de répartition sont calculées via la table individu de l'enquête emplois du temps (INSEE 2010). Cette enquête, réalisée sur plus de 18000 individus, renseigne entre autres sur les domaines d'activité et la « classification d'emplois » (Tableau 2) des salariés. Sont considérés comme employés de bureaux, les individus correspondant aux classes : 4 à 10. Les individus correspondant aux classes 1 et 2, sont supposés ne pas travailler dans des bureaux. Les techniciens (classe 3) n'étant pas aisément assimilables à une de ces deux catégories, ils ne sont pas pris en compte dans ce calcul. Les codes d'activité disponibles dans cette base de données sont liés aux codes NAF A38 par une matrice de passage. Cela permet donc, à l'échelle nationale, d'estimer, pour chaque activité au sens NAF A38, le pourcentage de salariés travaillant dans des bureaux. Les clés de répartition obtenues sont présentées en Tableau 2.

Finalement, les ratios de salariés travaillant dans des bureaux sont appliqués aux effectifs de chaque établissement. Les établissements correspondant à des activités d'hébergement,

⁴ Pour chaque tranche disponible, la valeur médiane est retenue

d'enseignement et de médical (code NAF A38 : iz,pz,qa,qb) sont exclus du calcul des établissements de bureaux.

1	Manœuvre ou ouvrier(ère) spécialisé(e)
2	Ouvrier(ère) qualifié(e) ou hautement qualifié(e), technicien(ne) d'atelier
3	Technicien(ne)
4	Personnel de catégorie B ou assimilé
5	Agent de maîtrise, maîtrise administrative ou commerciale, VRP (non cadre)
6	Personnel de catégorie A ou assimilé
7	Ingénieur, cadre (à l'exception des directeurs généraux ou de ses adjoints directs)
8	Personnel de catégorie C ou D ou assimilé
9	Employé(e) de bureau, employé(e) de commerce, personnel de services
10	Directeur général, adjoint direct

Tableau 2 : Attribut 'Classification dans l'emploi' de la table individu de l'enquête emplois du temps de l'INSEE(INSEE 2010).

Codes NAF	Activités	% des postes de bureau	Codes NAF	Activités	% des postes de bureau
az	Agriculture, sylviculture et pêche	18	lz	Activités immobilières	97
bz	Industries extractives	37	ma	Act. juri., compta., gest., arch., ingé.	93
C	Industrie manufacturière : (ca, cb, cc, cd, ce, cf, cg, ch, ci, cj, ck, cl, cm)	48	mb	Recherche-développement scientifique	93
dz	Prdn & distr. élec. gaz vap. & air cond.	61	mc	Autres act. spécial., scientif. et tech.	93
ez	Gestion eau, déchets & dépollution	61	nz	Act. de svices administratifs & soutien	83
fz	Construction	31	oz	Administration publique	95
gz	Commerce ; répar. automobile & motorcycle	79	pz	Enseignement	-
hz	Transports et entreposage	65	qa	Activités pour la santé humaine	-
iz	Hébergement et restauration	-	qb	Héb. méd.-soc. & soc. & ac. soc. ss héb.	-
ja	Édition, audiovisuel et diffusion	98	rz	Arts, spectacles & activités récréatives	81
jb	Télécommunications	98	sz	Autres activités de services	78
jc	Act. informatique & svices d'information	98	tz	Act. ménages: empl., prod. pr us. propre	78
kz	Activités financières et d'assurance	97	uz	Activités extra-territoriales	78

Tableau 3 : Estimations des parts de salariés de bureaux pour chaque activité NAF A38.

2.3. ATTRIBUTION DES SURFACES UTILES.

(ARENE 2009) fournit, sur la base d'un recensement sur l'Ile-de-France, des ratios de nombres de salariés par m² de surface utile, selon la taille des établissements. A partir de cette étude les effectifs des établissements de bureaux sont convertis en m² de surfaces utiles selon les ratios affichés en Tableau 4.

Effectifs	Nombre de m ² par salarié
<45	22
[45,217]	23
> 217	32

Tableau 4 : Ratios de nombres de salariés par m² de surface chauffée selon la tranche d'effectif des établissements (d'après (ARENE 2009)).

3. ELEMENTS DE VALIDATION.

3.1. COMPARAISON DES SURFACES DE BUREAUX ESTIMEES A L'ECHELLE DE LA VILLE

(APUR 2017) propose pour chaque arrondissement de Paris, des estimations des surfaces, correspondant aux bureaux de plus de 1000 m². Cette étude a été réalisée en croisant les bases de données MAJIC⁵ et SIRENE®. En plus de cela, des vérifications sont « faites par tous moyens possibles : Google street, pages jaunes et recherches internet ». En Figure 1, ces données sont comparées avec les surfaces de bureaux (de plus de 1000 m²) calculées par le modèle d'Estimation de Parcs de Bâtiment de Bureaux (EPBB) présenté ci-dessus, (les activités iz,pz,qa,qb et les activités d'administration publique «oz» sont exclues pour cette comparaison). Pour la majorité des arrondissements, les ordres de grandeur sont respectés. On note cependant des divergences importantes sur 4 des 20 arrondissements où les estimations EPBB affichent une différence de plus de 50% par rapport à l'APUR (excepté ces 4 arrondissements, la différence moyenne est de 23%). De plus, on observe que pour 17 arrondissements sur 20, EPBB sous-estime les surfaces de bureaux par rapport à l'APUR. Une partie des erreurs pourrait venir d'une sous-estimation des ratios de nombre de m² par poste salarié. Aussi, le détail des activités retenues par l'APUR pour le calcul des surfaces de bureaux n'est pas connu.

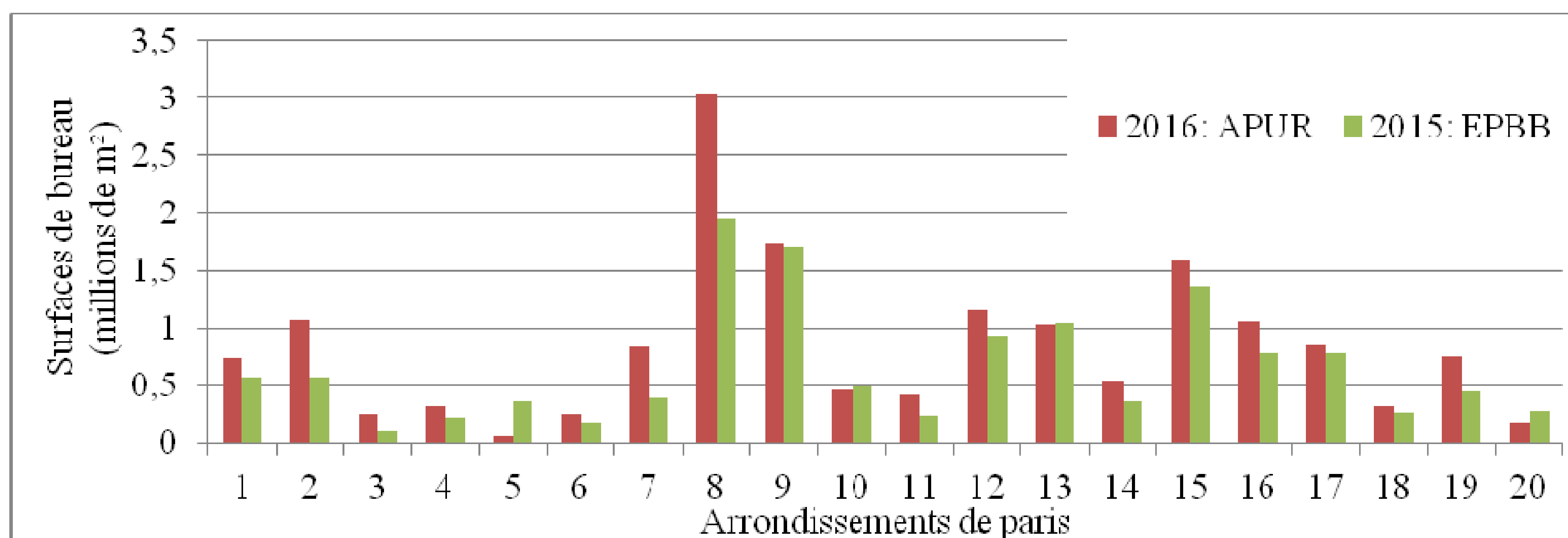


Figure 1 : Comparaison entre les surfaces de bureaux (de plus de 1000 m²) estimées par EPBB et (APUR 2017).

Des estimations des surfaces de bureaux pour une partie des arrondissements parisiens ont également été réalisées par L'Observatoire Régional de l'Immobilier d'Entreprise en Île-de-France (ORIE 2010). L'étude exploite des données issues de la taxe annuelle sur les bureaux perçue en Ile-de-France. Ces données ne concernent pas les bureaux d'une surface inférieure à 100 m². Pour estimer ces petites surfaces, l'étude fait appel aux données INSEE de postes salariés. Les résultats de ces estimations de surfaces de bureaux sont affichés en Figure 2, et comparés avec les résultats du modèle EPBB. L'étude (ORIE 2010) considère un ratio de 20 m² de surface utile par poste, contrairement aux données APUR, les parties communes ne sont pas considérées. Ce ratio de 20 m² de surface utile par poste est donc réutilisé dans le modèle EPBB afin de comparer le même type de surface. Ici encore, les activités d'administration publique « oz » ne sont pas prises en compte.

⁵ MAJIC (Mise À Jour des Informations Cadastreales) de la Direction Générale des Finances Publiques (DGFIP). Cette base de données qui renseigne sur les parcelles, les locaux et leurs propriétaires a ainsi une vocation fiscale : le calcul de la taxe foncière et l'envoi des avis d'imposition.

La comparaison montre des résultats proches (la différence varie de 1 à 27% selon les arrondissements, la moyenne est de 14%). Ainsi, la similarité entre les résultats du modèle EPBB basé sur des données d'effectifs de salariés, et l'estimation ORIE basée à 90% sur des données foncières, renforce la fiabilité de chacune des méthodes. Pour 9 arrondissements sur 12, le modèle EPBB surestime les surfaces de bureau par rapport à (ORIE 2010). Cela pourrait s'expliquer par le fait que 7 années séparent les deux estimations.

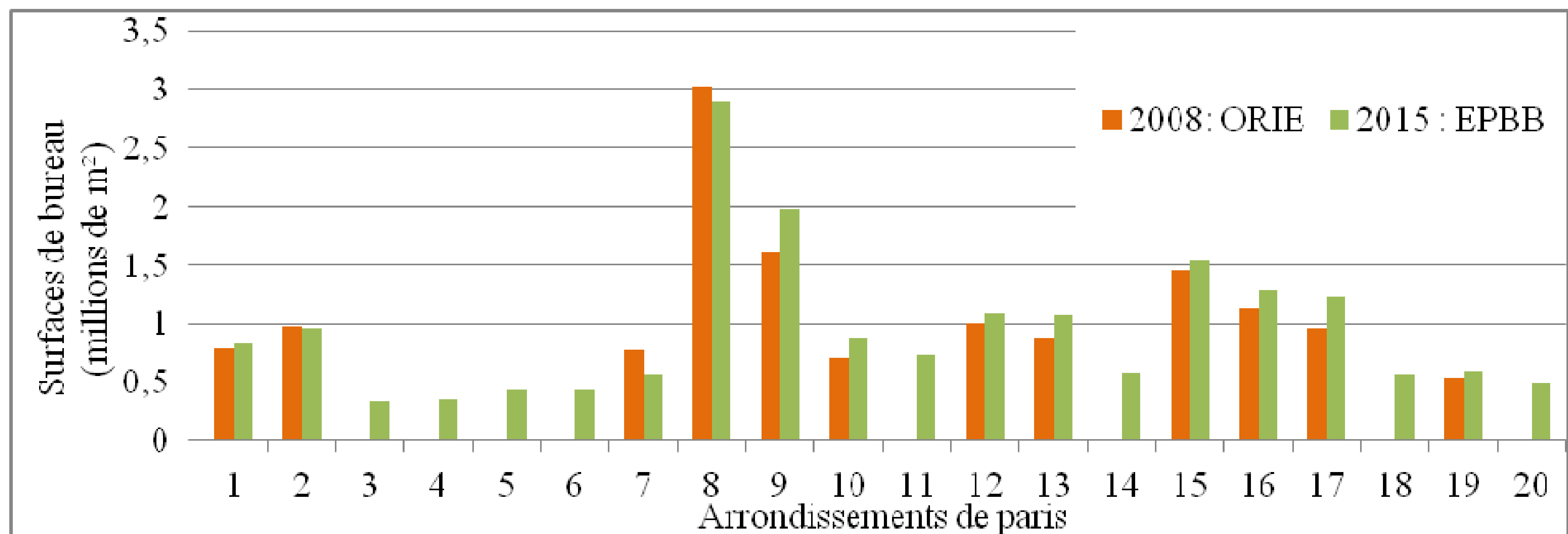


Figure 2 : Comparaison entre les surfaces de bureaux estimées par EPBB et (ORIE 2010) (EPBB est paramétré avec un ratio de m² de surface utile par poste fixé à 20), (seuls 12 arrondissements sont disponibles).

3.2. COMPARAISON A L'ECHELLE NATIONALE.

(CEREN 2015) fournit, sur la base de recensements, des estimations à l'échelle nationale des surfaces chauffées de bureaux. L'estimation des surfaces de bureaux chauffées en France issue du CEREN est comparée à l'estimation résultant du modèle EPBB en Tableau 5. Le modèle EPBB donne un résultat inférieur à celui du CEREN de 4%.

CEREN : 2013	EPBB : 2015
214	206

Tableau 5 : Comparaison des estimations de surfaces de bureaux (millions de m²) (CEREN 2015) et EPBB.

Dans la note (ORIE 2010), des estimations des surfaces de bureaux à échelle nationale sont également proposées. Ces estimations s'appuient sur les nombres de salariés rémunérés par catégorie socioprofessionnelle (issus des DADS). En Tableau 6, les estimations ORIE, sont comparées aux résultats EPBB. Les estimations issues de ces deux méthodes concordent à cette échelle également.

ORIE (hypothèses ORIE r=19-25) : 2008	EPBB (hypothèses ORIE r=19-25) : 2015
165-197	163-214

Tableau 6 : Comparaison des estimations de surfaces de bureaux (millions de m²) (ORIE 2010), avec les estimations EPBB (EPBB est paramétré avec les hypothèses haute et basse (ORIE 2010) de ratio de m² de surfaces utiles par poste: r=19-25; la catégorie administration 'oz' n'est pas prise en compte).

4. CONCLUSION

La méthode proposée a l'avantage de pouvoir être appliquée rapidement sur n'importe quelle zone géographique en France, d'autant que les données utilisées sont gratuites, libres d'accès et mises à jour régulièrement. Les clefs de répartition des postes des bureaux selon les activités semblent pertinentes et validées à l'échelle de la commune et à l'échelle nationale. Par la suite des études comparatives

supplémentaires pourraient permettre d'étudier la pertinence du modèle sur des mailles différentes. Les ratios de m² de surfaces utiles par poste pourraient être affinés selon l'implantation géographique des bâtiments de bureaux. De même, les clefs de répartition pourront être affinées en prenant en compte une classification par activité plus détaillée.

Enfin, un croisement des données Sirene® avec la BD_TOPO est à l'étude dans le but d'affiner le modèle EPBB en comparant les surfaces estimées à partir des effectifs, à la géométrie des bâtiments issus de la BD_TOPO. Cela pourrait permettre de déceler d'éventuelles erreurs dans les effectifs déclarés, d'identifier les bâtiments à usage mixte et les bâtiments entièrement dédiés aux bureaux, ou encore d'étudier plus en détail les rapports entre effectifs de salariés et les surfaces de bureaux.

Le parc de bureaux ainsi obtenu peut ensuite être caractérisé du point de vue du bâti et des systèmes, notamment avec une approche typologique et l'utilisation de données statistiques et géographiques, ceci dans le but d'intégrer les bâtiments de bureaux dans une plateforme de simulation énergétique du parc bâti. Cette réflexion s'insère dans un travail plus large de description du territoire pour la modélisation de la demande en énergie. Les données publiées par l'INSEE issues du recensement de population sont déjà utilisées pour décrire les parcs de logements (Berthou et al. 2015). La base de données Sirene® sera aussi étudiée pour modéliser d'autres activités du secteur tertiaire, telles que l'enseignement ou l'hôtellerie.

5. REMERCIEMENT

Les auteurs remercient le fond européen «Actions Innovatrices Urbaines» du FEDER, pour son financement apporté dans le cadre du projet CoResponsibility in District Energy Efficiency & Sustainability (CoRDEES).

6. BIBLIOGRAPHIE

- ADEME. 2013. "Chiffres Clés Du Bâtiment." <http://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/chiffres-cles-batiment-edition-2013-8123.pdf>.
- APUR. 2015. "Le Parc de Bureaux Parisien et Son Potentiel Transformation."
- . 2017. "Recensement et Dynamiques Du Parc de Bureaux."
- ARENE. 2009. "Etude Sur Les Consommations D'énergie Dans Les Bureaux En Île-de-France."
- Berthou, Thomas, Bruno Duplessis, Philippe Rivière, Pascal Stabat, Damien Casetta, and Dominique Marchio. 2015. "SMART-E: A TOOL FOR ENERGY DEMAND SIMULATION AND OPTIMIZATION AT THE CITY SCALE," December. <https://hal-mines-paristech.archives-ouvertes.fr/hal-01462212>.
- Braulio-Gonzalo, Marta, María Dolores Bovea, María José Ruá, and Pablo Juan. 2016. "A Methodology for Predicting the Energy Performance and Indoor Thermal Comfort of Residential Stocks on the Neighbourhood and City Scales. A Case Study in Spain." *Journal of Cleaner Production* 139 (December). Elsevier: 646–65. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2016.08.059>.
- Buffat, René, Andreas Froemelt, Niko Heeren, Martin Raubal, and Stefanie Hellweg. 2017. "Big Data GIS Analysis for Novel Approaches in Building Stock Modelling." *Applied Energy* 208 (December). Elsevier: 277–90. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2017.10.041>.
- CEREN. 2015. "Données Statistiques Du CEREN," 1–32.
- Fonseca, Jimeno A., Thuy-An Nguyen, Arno Schlueter, and Francois Marechal. 2016. "City Energy Analyst (CEA): Integrated Framework for Analysis and Optimization of Building Energy Systems in

- Neighborhoods and City Districts.” *Energy and Buildings* 113 (February). Elsevier: 202–26. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2015.11.055>.
- Fonseca, Jimeno A., and Arno Schlueter. 2015. “Integrated Model for Characterization of Spatiotemporal Building Energy Consumption Patterns in Neighborhoods and City Districts.” *Applied Energy* 142 (March). Elsevier: 247–65. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2014.12.068>.
- IGN. 2017. “BD TOPO®.” 2017. <http://professionnels.ign.fr/bdtopo>.
- INSEE. n.d. “Base Sirene®.” <https://www.sirene.fr/sirene/public/static/contenu-base-sirene>.
- . 2010. “Enquête Emplois Du Temps.” <https://www.insee.fr/fr/statistiques/2118074>.
- . 2014. “Fichiers Détail Du Recensement de La Population.” 2014. <https://www.insee.fr/fr/information/2867866>.
- . 2016. “Connaissance Locale de L’appareil Productif / Clap.” 2016. <https://www.insee.fr/fr/metadonnees/definition/c1232>.
- Mata, Érika, Angela Sasic Kalagasidis, and Filip Johnsson. 2013. “A Modelling Strategy for Energy, Carbon, and Cost Assessments of Building Stocks.” *Energy and Buildings* 56 (January). Elsevier: 100–108. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2012.09.037>.
- ORIE. 2010. “Note n°24 - Le Parc de Bureaux Francilien En 2008 - Février 2010.” http://www.orie.asso.fr/sites/default/files/fichiers/note_methodologique_parc_orie_2017.pdf.
- Riederer, Peter, Vincent Partenay, Nicolas Perez, Christophe Nocito, Romain Trigance, and Thierry Guiot. 2015. “DEVELOPMENT OF A SIMULATION PLATFORM FOR THE EVALUATION OF DISTRICT ENERGY SYSTEM PERFORMANCES.” In *BS2015: 14th Conference of International Building Performance Simulation Association, Hyderabad, India*. <http://www.ibpsa.org/proceedings/BS2015/p2976.pdf>.
- Robinson, Darren, F Haldi, J Kämpf, P. Leroux, D. Perez, A. Rasheed, and U Wilke. 2009. “CITYSIM: COMPREHENSIVE MICRO-SIMULATION OF RESOURCE FLOWS FOR SUSTAINABLE URBAN PLANNING.” In *11th International IBPSA Conference*. <https://pdfs.semanticscholar.org/0fb6/af269aef7d6c69123e5aa8d778aa98ddd834.pdf>.
- Tuominen, Pekka, Riikka Holopainen, Lari Eskola, Juha Jokisalo, and Miimu Airaksinen. 2014. “Calculation Method and Tool for Assessing Energy Consumption in the Building Stock.” *Building and Environment* 75 (May). Pergamon: 153–60. <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2014.02.001>.

Modélisation de l'interaction entre une Toiture Terrasse Végétalisée et d'un Panneau Solaire Photovoltaïque

Farad-Idriss Mlanao¹, Abdelkrim Trabelsi^{*2}, Julien Bouyer³, Mohamed Amara², Damien David², Rémy Claverie³

¹ Cerema DTer SO / DAIT

Rue Pierre Ramond, CS 60013, F-33166 Saint-Médard-en-Jalles

² Univ Lyon, CNRS, INSA-Lyon, Université Claude Bernard Lyon 1, CETHIL UMR5008

F-69621, Villeurbanne, France

³ Cerema Dter Est/ Laboratoire de Nancy

71 rue de la grande haie, F-54510, Tomblaine, France

*abdelkrim.trabelsi@univ-lyon1.fr

RESUME. L'objectif de cet article est de présenter un modèle permettant d'étudier l'interaction entre une Toiture Terrasse Végétalisée (TTV) et un Panneau Solaire Photovoltaïque (PV). Le couplage de ces deux technologies peut s'avérer intéressant car il permet d'améliorer le rendement du PV en diminuant sa température grâce à l'effet rafraîchissant dû à l'évapotranspiration de la TTV. Le modèle proposé est basé sur les équations de bilan thermique et hydrique pour la TTV et purement thermique pour le PV. Les effets sensibles et latents ainsi que la production d'électricité sont considérés dans les équations de bilan. Ce modèle a été évalué en comparant les valeurs de température et de teneur en eau du substrat issues des simulations avec des mesures expérimentales provenant d'une plateforme expérimentale à taille réelle. Les résultats obtenus sont encourageants pour la suite du développement du modèle et de sa validation.

MOTS-CLÉS. Toiture végétalisée, Panneau photovoltaïque, Modélisation, Couplage thermique et hydrique, performance énergétique.

ABSTRACT. The purpose of this article is to present a model to study the interaction between a Green Roof (GR) and a Photovoltaic Solar Panel (PV). The coupling of these two technologies is interesting because it improves the performance of the PV by decreasing its temperature due to the cooling effect of the GR. The proposed model is based on thermal and water balance equations for GR and purely thermal for PV. Sensitive and latent effects as well as electricity production are considered in the balance equations. This model was evaluated by comparing the temperature and the water content of the substrate from simulations and experimental measurements from a full scale experimental platform. The results obtained are encouraging for further development of the model and its validation.

KEYWORDS. Green roof, Photovoltaic Panel, Modeling, Hygrothermal coupling, Energy performance.

1 INTRODUCTION

L'état de l'art actuel sur les dispositifs couplés toiture terrasse végétalisée (TTV) et panneau photovoltaïque (PV) est relativement restreint. Des études récentes montrent que cette association permet une amélioration des performances des PV. De plus, elle apparaît tout à fait pertinente en milieu urbain sur les bâtiments susceptibles de les accueillir, car elle permet de combiner production durable d'énergie, isolation thermique du bâtiment et services écosystémiques. En France le secteur du bâtiment représente près de 21% des consommations d'énergie finale (Ademe, 2016) soit environ 44% d'énergie primaire (Ademe, 2012) et plus de 20% des émissions de GES (Ademe, 2016). Les TTV qui permettent une baisse de la consommation notamment pendant les périodes d'été grâce à l'inertie thermique apportée par son substrat et les PV qui permettent de convertir l'énergie solaire en électricité, cherchent à répondre à ces objectifs. Les deux technologies sont rarement associées sur un même bâtiment, en effet un choix est souvent nécessaire entre la toiture végétale ou le panneau solaire, selon le projet d'aménagement.

Les études expérimentales publiées abordent les questions scientifiques selon différents angles qui convergent vers la démonstration de l'amélioration des performances des PV lorsqu'ils sont associés à une TTV : rôle de la végétation sur le rafraîchissement du PV (Scherba et al., 2011) ou sur la consommation énergétique du bâtiment (Hui et Chan, 2011). Grâce à des mesures expérimentales, (Köhler et al., 2007, 2002) ont montrés une augmentation du rendement du panneau solaire lorsqu'il est installé sur une TTV en comparaison à une installation sur une toiture classique. De même, (Chemisana et Lamnatou, 2014) ont pu mettre en évidence une plus grande puissance électrique produite pour la configuration sur TTV, attribuée à une différence de potentiel électrique en circuit ouvert supérieure. L'apport rafraîchissant de la TTV, permet de diminuer la température de l'air, proche du PV et donc de diminuer la température des cellules photovoltaïques (Köhler et al., 2007; Chemisana et Lamnatou, 2014).

Le présent article vise à modéliser les échanges énergétiques entre les surfaces du PV et la surface de la TTV (cf. fig. 1). L'objectif à terme est de montrer que la température du panneau photovoltaïque est bien abaissée lorsque celui-ci est positionné au dessus d'une toiture végétalisée.

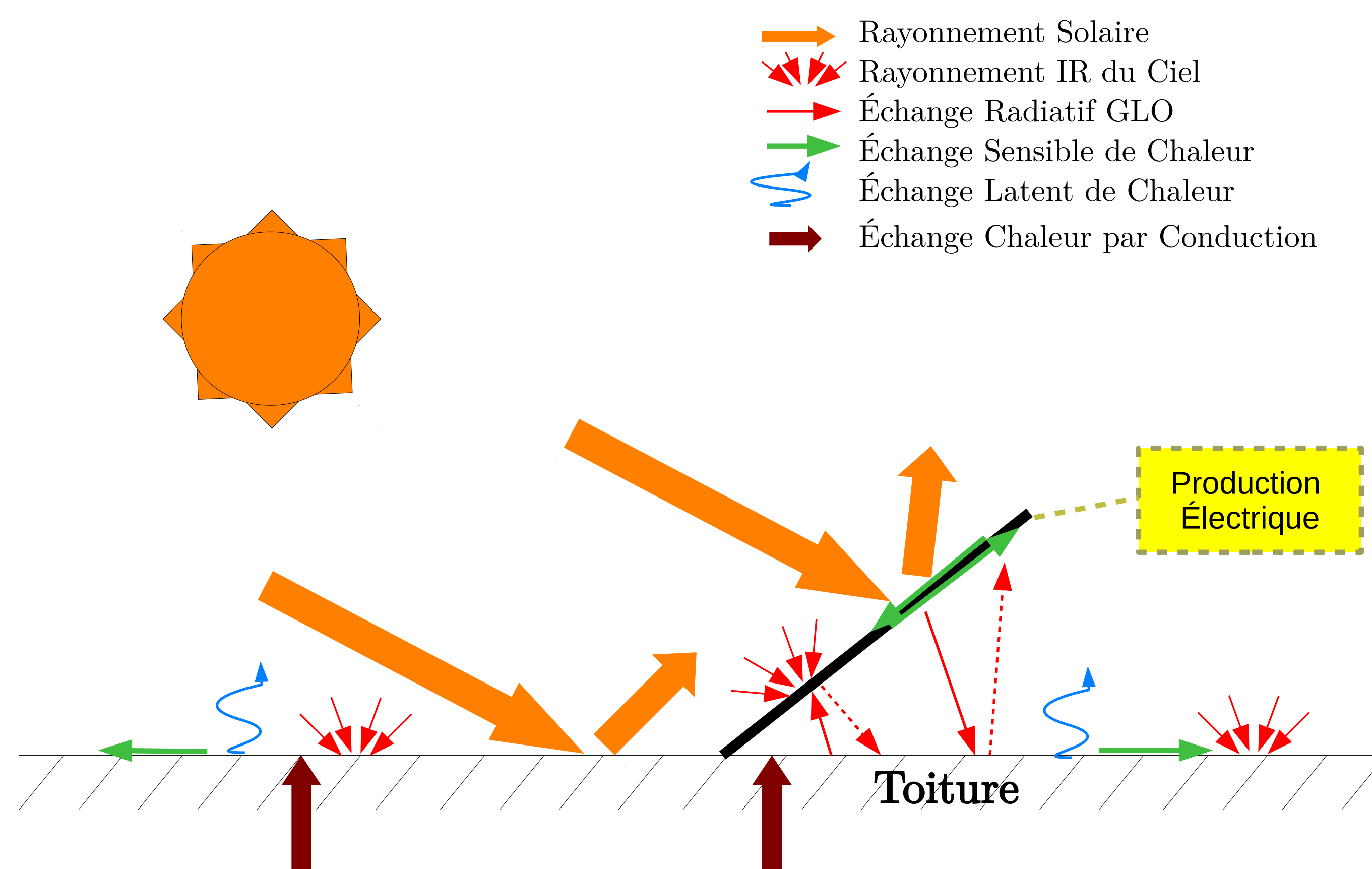


FIGURE 1. Schémas représentant les différents échanges énergétiques entre les surfaces avant et arrière du PV et la surface de la toiture végétalisée.

2 MODÉLISATION

Les interactions thermiques se produisant dans le système TTV-PV sont schématisées dans la figure 1. Le modèle proposé fait intervenir trois bilans énergétiques (PV, Zone foliaire et substrat de la toiture végétalisée) ainsi qu'un bilan hydrique au sein du substrat (cf. éq. (1)). Il s'appuie sur les modèles élémentaires de PV (Notton et al. (2005), Weiss et al. (2016)) et de TTV (Ouldboukhitine et al., 2011; Djedjig et al., 2012) et inclue les termes de couplage radiatifs en Courte et Grande Longueur d'Onde (effet d'ombrage, échanges radiatifs de surface à surface...).

$$\begin{cases} \Phi_{PV,net}^{CLO} + \Phi_{PV,net}^{GLO} + H_{PV} - P_{PV} = 0 \\ \varphi_{g,net}^{CLO} + \varphi_{g,net}^{GLO} + H_g + L_g + \varphi_{cond} = 0 \\ \varphi_{f,net}^{CLO} + \varphi_{f,net}^{GLO} + H_f + L_f = 0 \\ z_g \frac{\partial \theta}{\partial t} = P - D - ETP \end{cases} \quad (1)$$

Les différentes termes de l'équation (1) sont :

- $\Phi_{PV,net}^{CLO}$: apports de chaleur par rayonnement CLO
- $\Phi_{PV,net}^{GLO}$: apports de chaleur par rayonnement GLO
- H_{PV} : apports de chaleur sensible
- P_{PV} : pertes énergétiques du à la production électrique
- $\varphi_{\{f,g\},net}^{CLO}$: flux radiatif courte longueur d'onde
- $\varphi_{\{f,g\},net}^{GLO}$: flux radiatif gronde longueur d'onde
- $H_{\{f,g\}}$: flux surfacique de chaleur sensible
- $L_{\{f,g\}}$: flux surfacique de chaleur latent

Où f et g font respectivement référence au feuillage et au sol de la toiture végétalisée.

La première équation du système (1) désigne le bilan thermique du PV (Notton et al., 2005), (Weiss et al., 2016). La deuxième et la troisième équation du système décrivent les échanges énergétiques à la surface de la TTV. Elles représentent les phénomènes physiques présents sur le feuillage et sur le sol de la TTV (Sailor, 2008; Ouldboukhitine et al., 2011; Djedjig et al., 2012). La quatrième équation du système décrit le transfert d'eau à travers le substrat de la toiture végétalisée (Ouldboukhitine et al., 2011). Elle décrit l'évolution de la quantité d'eau sur l'épaisseur du substrat z_g (m) en fonction de la précipitation sur la toiture P , du drainage D en sortie de la TTV, et du phénomène d'évapotranspiration ETP .

L'évapotranspiration est le terme le plus complexe de ce bilan hydrique. Elle a été modélisée à l'aide de la formule de Penman-Monteith (Monteith, 1965), qui nous donne l'évapotranspiration en fonction de paramètres physiologiques des plantes et des conditions météorologiques.

Les termes radiatifs dans le système d'équations (1) intègrent les interactions entre le PV et la TTV. Le rayonnement solaire net $\varphi_{i,net}^{CLO}$ absorbé par une surface "i" s'écrit en faisant intervenir l'albédo ρ_i et l'éclairement de courte longueur d'onde E_i^{CLO} (équation (2)).

$$\varphi_{i,net}^{CLO} = (1 - \rho_i) E_i^{CLO} \quad (2)$$

Les multi-réflexions entre les différentes surfaces du PV (TTV \rightarrow face avant et TTV \leftrightarrow face arrière) sont prises en compte pour le calcul du rayonnement reçu. Le rayonnement total est calculé à l'aide de la méthode des radiosités appliquée aux courtes longueurs d'ondes.

Le calcul du rayonnement net en grande longueur d'onde absorbé par la surface "i" est calculé par la formule développée dans l'équation (3), et faisant intervenir le terme de radiosité en grande longueur d'onde J_i :

$$\varphi_{i,net}^{GLO} = \frac{\varepsilon_i}{1 - \varepsilon_i} (J_i - \sigma T_i^4) \quad (3)$$

Avec σ qui est la constante de Stefan-Boltzmann, ε_i l'émissivité de la surface 'i'.

Enfin, le système d'équation 4 permet d'exprimer les radiosités en fonction des différentes températures de surface du système PV-TTV.

$$\begin{cases} i = \{f, g, PV\} \\ \sum_j (\delta_{ij} - (1 - \varepsilon_i)F_{ij})J_j = \varepsilon_i\sigma T_i^4 \end{cases} \quad (4)$$

Les équations des systèmes 1 à 4 constituent notre modèle. Les termes non linéaires (températures à l'ordre 4 et pressions de vapeur saturante) du système d'équations (1) sont linéarisés à l'aide d'un développement de Taylor de premier ordre. On obtient alors un système d'équations linéaires avec trois inconnues (T_f , la température de feuillage, T_g , la température du sol et T_{PV} , la température du PV) que l'on résout de façon itérative jusqu'à convergence.

3 RÉSULTATS

Les données climatiques et les mesures expérimentales ont été obtenues sur le site du laboratoire du Cerema Dter Est à Nancy. La plateforme végétalisée possède une surface de 97 m². L'acquisition des données est réalisée au pas de temps de 15 minutes. Les simulations ont été faites sur des journées d'été entre le 2 juin et le 31 juillet 2017. Le rayonnement solaire ainsi que la vitesse du vent sont présentés sur les figures 2 et 3. Les résultats expérimentaux servant pour la comparaison aux résultats de simulation issus du modèle développé portent sur la température du sol et la teneur en eau du sol (figures 4 et 5).

Il est à noter que les comparaisons mesures-simulations présentés dans ce qui suit ne sont en aucun cas le fruit d'une procédure de calibration du modèle sur les résultats expérimentaux. Les paramètres d'entrée du modèle développé ont été évalués soit par des mesures directes réalisées par le Cerema soit pris de la littérature.

Sur la figure 4, nous pouvons constater que les températures de surface du sol mesurées et simulées présentent les mêmes tendances d'évolution. Cela laisse supposer que le modèle développé arrive à capturer les principaux phénomènes thermiques et hydriques mis en jeu notamment l'évapotranspiration qui joue un rôle important dans le rafraîchissement de la surface du substrat. Pour évaluer nos résultats de simulation, nous avons analysé l'écart absolu entre et les températures mesurées sur site et simulées en fonction du temps. Cet écart est fluctuant autour d'une valeur moyenne de 2.7°C sur toute la durée de simulation.

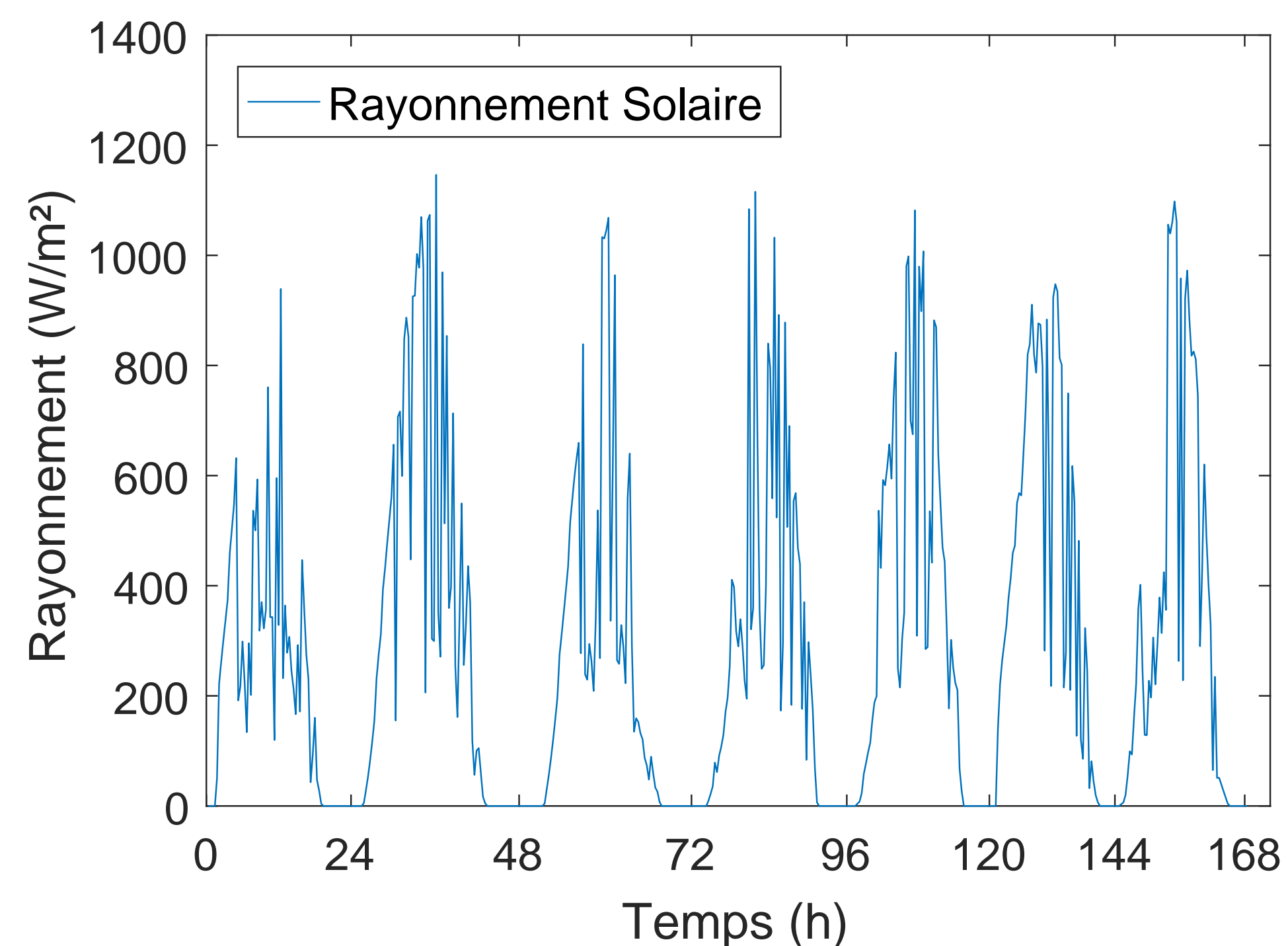


FIGURE 2. Rayonnement solaire

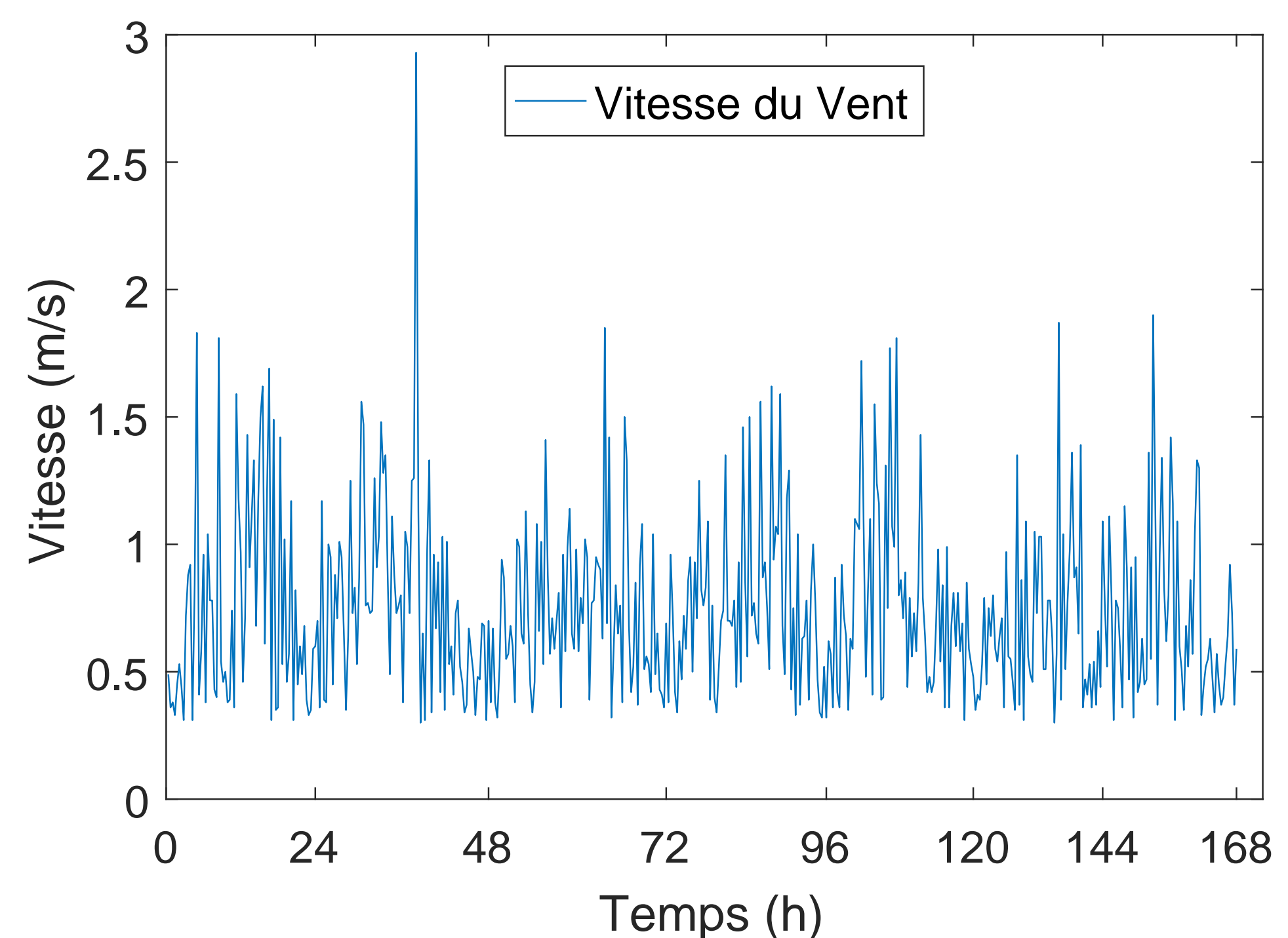


FIGURE 3. Vitesse du vent

Sur la figure 5, on voit que la teneur en eau moyenne du substrat décroît globalement que ce soit par modélisation ou par mesures. Néanmoins, les phases d'assèchement et d'humectation ne sont pas correctement reproduites en simulations.

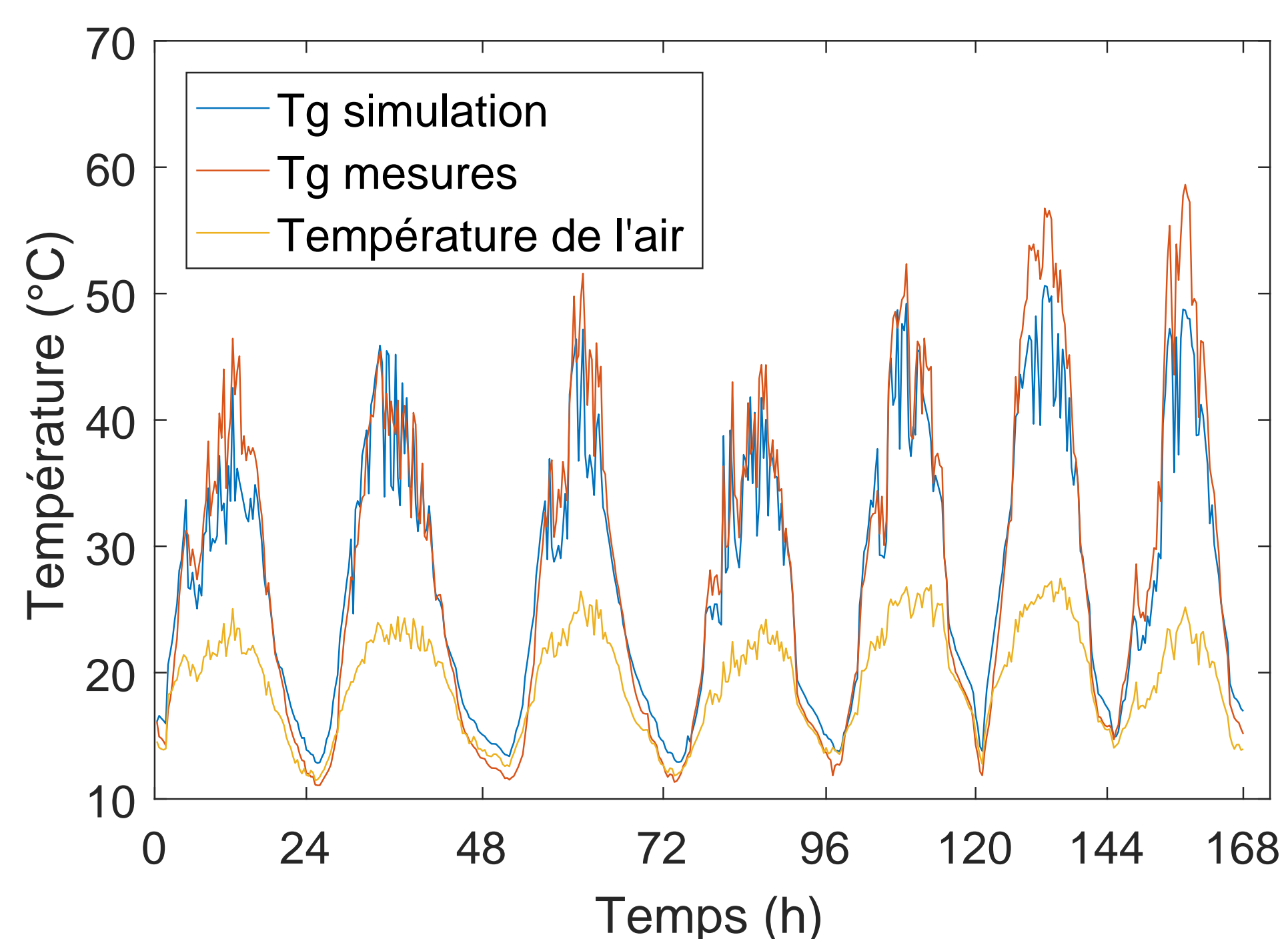


FIGURE 4. Températures de surface sol et d'air

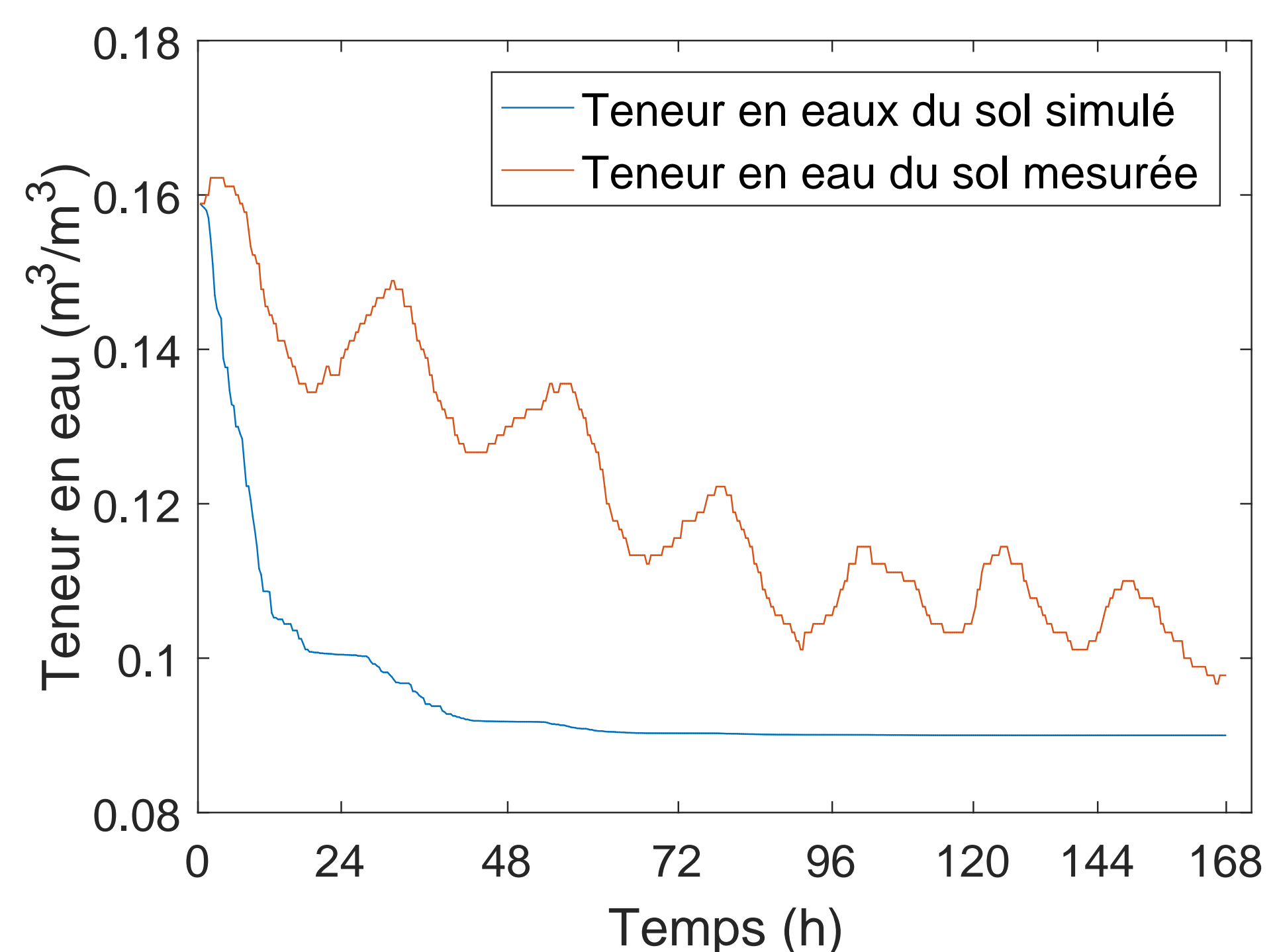


FIGURE 5. Teneur en eau du substrat

Les différences constatées peuvent être liées à plusieurs causes parmi lesquelles on peut citer les hypothèses retenues sur certaines caractéristiques non-disponibles de la toiture. Les données en question ont été prises de la littérature pour des toitures qui ne correspondent pas forcément à la toiture étudiée. Dans ce sens, on propose pour les travaux à venir de calibrer le modèle afin d'identifier les données manquantes de la toiture.

Pour ce qui est des écarts sur la teneur en eau, ils sont vraisemblablement dus à l'évaporation de l'eau piégée dans la couche de drainage et qui est absorbée par le substrat (Djedjig, 2013). Ce phénomène est aussi constaté dans les travaux de Djedjig (Djedjig, 2013). Sur chaque journée, la recharge en eau du sol est importante et nous ne la modélisons pas, ce qui implique une erreur importante.

Pour ce qui est de la température, une autre source d'erreur possible est la modélisation de la teneur en eau dans le sol. En effet, cette dernière a un impact important dans des échanges

latents de chaleur.

Concernant le panneau solaire, les résultats présentés figure 6 permettent de montrer une première tendance de la température du panneau. Nous constatons que la température dépasse tous les jours la température de référence donnée par le constructeur, ce qui impacte le rendement qui dépend de la température selon l'équation (5) (Krauter et Hanitsch, 1996)).

$$\eta = \eta_{ref} \times [1 - \beta_{ref} \times (T_c - T_{ref})] \quad (5)$$

Où T_{ref} est une température de référence du panneau, η_{ref} est le rendement, β_{ref} est un coefficient de rendement compris entre 0,4 et 0,5% (donné par le constructeur du panneau) et T_c est la température des cellules photovoltaïques.

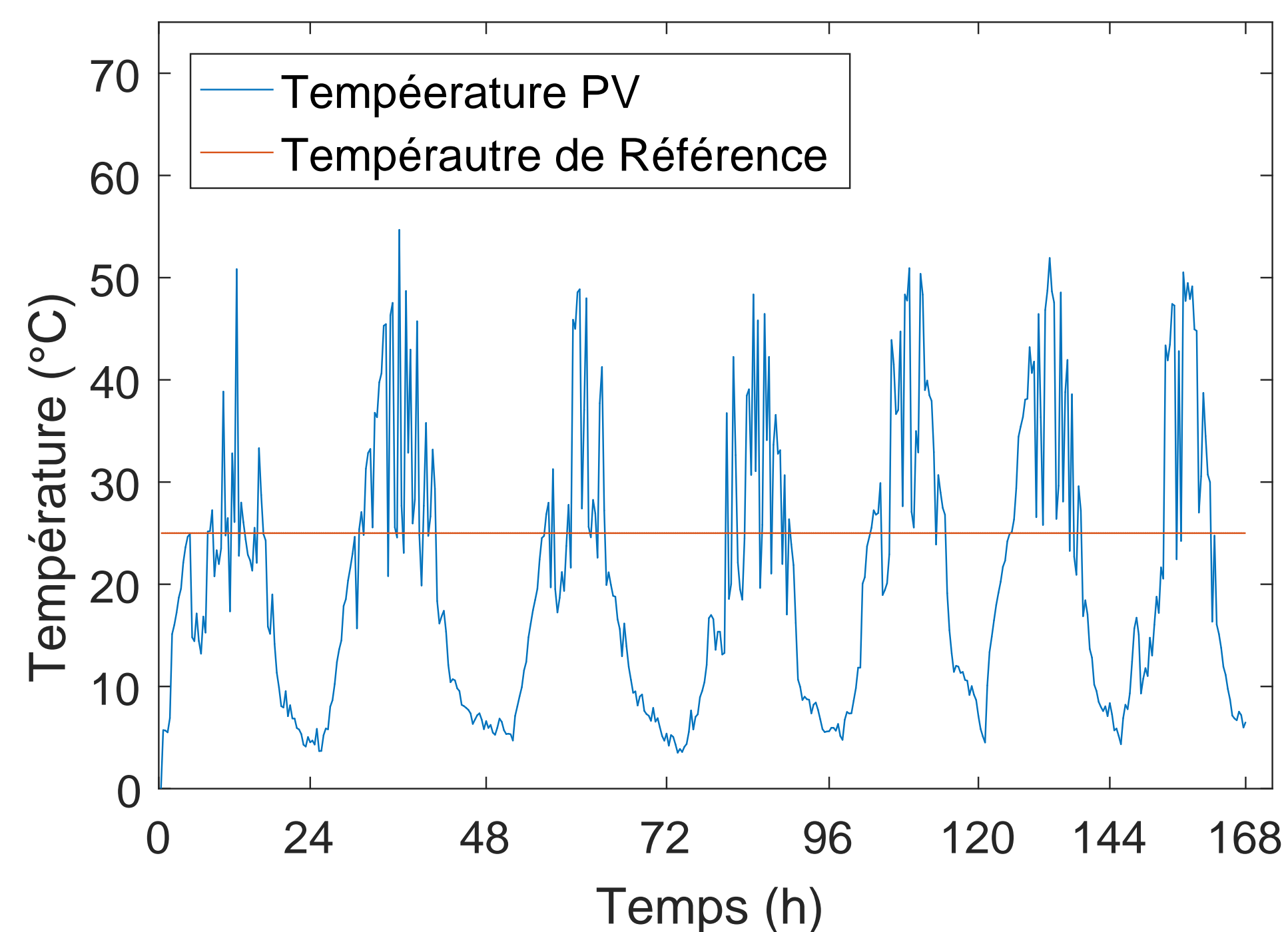


FIGURE 6. Température du panneau Simulée

4 CONCLUSION

Dans cet article, nous avons développé un modèle numérique qui permet d'étudier l'interaction entre un PV et une TTV et d'en déduire le rendement du PV en conditions dynamiques en fonction de sa température. Le modèle s'appuie sur des équations de bilan thermique et hydrique avec notamment, la prise en compte de l'évapotranspiration et des échanges radiatifs entre le PV et la TTV.

Le modèle a été comparé à des résultats expérimentaux sur une TTV de taille réelle munie de PV. Les mesures réalisées portent sur les données météorologiques ainsi que sur la température de surface et la teneur en eau global du substrat. Ces deux dernières grandeurs ont été utilisées pour la confrontation. Les premiers résultats sont prometteurs et permettent de définir des pistes pour l'amélioration du modèle.

Les premières pistes identifiées concernent une meilleure caractérisation de la toiture en identifiant ses paramètres par méthode inverse. La deuxième porte sur l'amélioration du modèle hydrique en optant pour un modèle de type "champs" à la place d'un bilan hydrique global.

RÉFÉRENCES

- Ademe (2012). Chiffres clés énergie et climat 2012. Technical report.
- Ademe (2016). Chiffre clés climat, air et énergie 2015. Technical report.
- Chemisana, D. et Lamnatou, C. (2014). Photovoltaic-green roofs : An experimental evaluation of system performance. 119 :246–256.
- Djedjig, R. (2013). Impacts des enveloppes végétales à l’interface bâtiment microclimat urbain.
- Djedjig, R., Ouldboukhitine, S.-E., Belarbi, R., et Bozonnet, E. (2012). Development and validation of a coupled heat and mass transfer model for green roofs. 39(6) :752–761.
- Hui, S. et Chan, S. (2011). Integration of green roof and solar photovoltaic systems. Joint Symposium 2011 : Integrated Building Design in the New Era of Sustainability, Hong-Kong.
- Köhler, M., Schmidt, M., Laar, M., Wachsmann, U., et Stefan, K. (2002). Photovoltaic panels on greened roofs : positive interaction between two elements of sustainable architecture. pages 151–159.
- Köhler, M., Wiartalla, W., et Feige, R. (2007). Interaction between pv-systems and extensive green roofs.
- Krauter, S. et Hanitsch, R. (1996). Actual optical and thermal performance of pv-modules. 41 :557–574.
- Monteith, J. L. (1965). Evaporation and environment. 19 :205–234.
- Notton, G., Cristofari, C., Mattei, M., et Poggi, P. (2005). Modelling of a double-glass photovoltaic module using finite differences. 25(17) :2854–2877.
- Ouldboukhitine, S.-E., Belarbi, R., Jaffal, I., et Trabelsi, A. (2011). Assessment of green roof thermal behavior : A coupled heat and mass transfer model. 46(12) :2624–2631.
- Sailor, D. J. (2008). A green roof model for building energy simulation programs. 40(8) :1466–1478.
- Scherba, A., Sailor, D. J., Rosenstiel, T. N., et Wamser, C. C. (2011). Modeling impacts of roof reflectivity, integrated photovoltaic panels and green roof systems on sensible heat flux into the urban environment. Building and Environment, 46(12) :2542 – 2551.
- Weiss, L., Amara, M., et Ménézo, C. (2016). Impact of radiative-heat transfer on photovoltaic module temperature : Impact of radiative-heat transfer on photovoltaic module temperature. 24(1) :12–27.

Mise au point de modèles réduits de la consommation énergétique en exploitation des bâtiments pour la contractualisation de Contrats de Performance Energétique

Aymeric Novel*^{1,2}, Francis Allard¹, Patrice Joubert¹

¹ LaSIE, Université de La Rochelle, Av. Michel Crépeau, 17043 La Rochelle cedex 1

² TERA0, 21 rue de Paradis, 75010 Paris

* anovel@terao.fr

RESUME : La gestion de l'énergie des bâtiments en phase exploitation fait apparaître le fait que la consommation énergétique est fortement impactée par les usages du bâtiment, souvent en décalage par rapport aux données contractuelles initiales. Pour les bâtiments performants, on peut même observer une décorrélation partielle de la consommation vis-à-vis du climat au profit d'une corrélation forte avec les usages. La variabilité des usages au cours de la vie d'un bâtiment nécessite de pouvoir quantifier a priori l'influence de facteurs variés. Si l'approche Simulation Thermique Dynamique est appropriée à de telles études, elle n'est cependant pas transposable à une approche métier pour les prestataires énergéticiens et des modèles « réduits » doivent être recherchés. La méthodologie proposée dans cet article repose sur l'utilisation des plans d'expérience pour construire un modèle polynomial de la consommation d'énergie d'un bâtiment en fonction des paramètres d'usage.

MOTS-CLÉS : Plans d'expérience, Usages, Simulation Thermique Dynamique

1. INTRODUCTION

La consommation énergétique observée d'un bâtiment est souvent supérieure à la consommation énergétique calculée en phase conception. Ceci se constate par des retours d'expérience comme ceux publiés dans le baromètre annuel de l'observatoire de l'immobilier durable pour le tertiaire (OID, 2017). Le périmètre limité du calcul réglementaire est une première raison évidente mais, en particulier pour les bâtiments performants, les facteurs d'occupation et de pilotage des installations apparaissent comme ayant une influence importante (Cerema, 2018). Cette sensibilité a été également mise en avant dans des travaux étudiant l'influence du comportement des occupants sur la performance énergétique des bâtiments (Vorger, 2015). Les projets mettant le plus en avant la consommation réelle sont les Contrats de Performance Energétiques (CPE). Le CPE est un outil de maîtrise du risque sur la consommation énergétique réelle. Un CPE modélise les risques non maîtrisables par l'exploitant sous la forme d'un modèle réduit appelé « l'équation d'ajustement ». Cet ajustement de la consommation de référence est classiquement lié à la corrélation climatique, au taux d'occupation des surfaces ou à la température de consigne. D'après Jaffal et al. (2017), les modèles simplifiés basés sur les DJU offrent des calculs rapides mais manquent de précision et ils ne permettent pas d'intégrer d'autres facteurs affectant la consommation. D'après Manfren et al. (2013), les facteurs les plus influents sur les consommations des bâtiments font partie des groupes suivants : climat, enveloppe, activités (occupation, process), éclairage, régulation CVC, linéaires hydrauliques, linéaires aérauliques, CTA (traitement de l'air et distribution associée), unités terminales, ECS, rendement de production et rendement de distribution. Certains de ces groupes sont complètement définis en phase conception/réalisation. Les autres sont des facteurs variables en phase exploitation: climat, activités (occupation, process), éclairage, régulation CVC, CTA

(traitement de l'air et distribution associée), unités terminales, ECS. La variabilité de ces groupes de facteurs au cours de la vie d'un bâtiment nécessite de pouvoir quantifier leur influence sur les consommations réelles. Si l'approche Simulation Thermique Dynamique (STD) est appropriée à de telles études, elle n'est pas facilement utilisable pour explorer complètement cet espace de variation. Caucheteaux et al. (2016), t Østergård et al. (2018) rappellent qu'en pratique, faire tourner des milliers de simulations est un obstacle pour les concepteurs de bâtiments pour explorer tout l'espace de conception, faire des analyses de sensibilité et d'incertitudes. Nous effectuons un raisonnement similaire pour les exploitants et les acteurs impliqués dans le suivi énergétique des bâtiments. Ceci nécessite l'utilisation des modèles réduits qui peuvent effectuer les calculs rapidement et en lien avec les mesures faites sur site. Romani (2015), Caucheteaux et al. (2016), Jaffal et al. (2017) posent que la méthode des plans d'expérience est adaptée pour créer une représentation simplifiée du besoin de chauffage et de climatisation des bâtiments en fonction de paramètres d'influence présélectionnés en utilisant la méthode des plans d'expérience pour limiter le nombre de simulations nécessaires. Parmi la diversité des plans d'expérience possibles, les plans D-optimaux semblent bien adaptés pour déterminer des polynômes de prédiction des consommations dans le bâtiment (Romani, 2015). La méthodologie proposée ici repose sur l'utilisation de la méthode des plans d'expérience pour construire un modèle polynomial des besoins de chauffage d'un bâtiment de bureaux en fonction de paramètres d'usage présélectionnés. Cette modélisation est faite sur le logiciel EnergyPlus®v8.4 via DesignBuilder®v4.6. Cet article présente les résultats obtenus pour un étage de bureaux type. Le modèle permet d'identifier les facteurs d'influence, et produit des modèles réduits susceptibles de fournir une équation d'ajustement pour l'élaboration de CPE.

2. PRESENTATION DU MODELE DE SIMULATION THERMIQUE DYNAMIQUE

2.1. GEOMETRIE ET ZONAGE

Le modèle utilisé dans cette étude pour élaborer une méthode robuste est volontairement simple mais suffisamment représentatif d'un espace de bureaux, cf. figure 1.

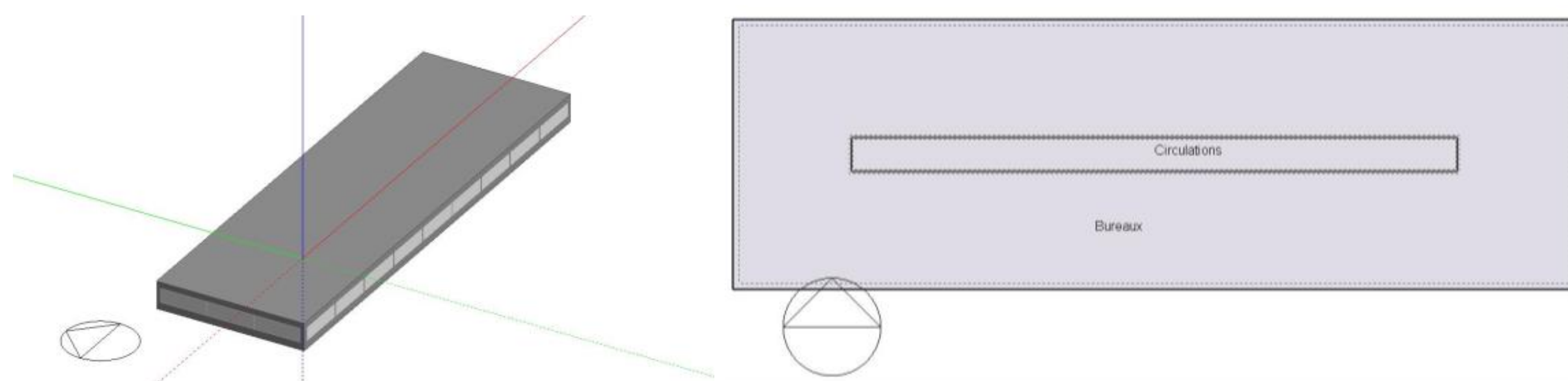


Figure 1 : Vue axonométrique et zonage thermique de l'étage de bureau modélisé

L'orientation des façades principales est nord/sud, avec les dimensions suivantes :

Caractéristique	Valeur
Surface	800m ²
Largeur	16m
Longueur	50m
Hauteur sous plafond	3m
Profondeur des bureaux	7m
Ratio de surface vitrée	50%

Tableau 1 : Caractéristiques géométriques du modèle

2.2. CARACTERISTIQUES THERMIQUES DE L'ENVELOPPE

Les caractéristiques thermiques reflètent un projet ayant de bonnes caractéristiques thermiques au niveau de la conception :

Caractéristique	Composition	U (W/m ² .K)	Facteur solaire (%)	Transmission lumineuse (%)
Murs extérieurs	150mm béton / 200mm ITE (fibre de verre) / 30mm bardage	0,20	-	-
Plancher intermédiaire	10mm Faux-Plafond / 100mm air / 100mm béton / 3mm moquette	1,4	-	-
Vitrages	Double vitrage basse émissivité 6/13/6 à lame d'argon	1,5	56%	74%
Stores extérieurs	Store diffusant	-	5%	5%

Tableau 2 : Caractéristiques thermiques de l'enveloppe

Comme nous simulons un étage courant, les planchers intermédiaires sont considérés adiabatiques.

Les infiltrations d'air de l'enveloppe sont modélisées en dynamique (simulation thermo-aéraulique) via l'objet AirflowNetwork intégré à EnergyPlus car nous modélisons les débits générés par l'ouverture des fenêtres pour le propos de cette étude. Les taux d'infiltrations calculés prennent en compte l'effet du vent et des différences de température et peuvent atteindre 0,5vol/h dans les pires conditions.

2.3. CLIMAT ET ENVIRONNEMENT

Le bâtiment est situé à Paris et les données météo sont celles de la station Paris Orly (données IWEC). Aucun masque n'est considéré et l'albédo est fixée à 20%.

2.4. APPORTS INTERNES ET VENTILATION

Le taux de ventilation est de 36m³/h/personne, pour une occupation de 0,1personne/m², avec un débit de ventilation asservi au taux d'occupation. Le métabolisme moyen considéré est de 110W/personne. Les horaires de présence sont définis de 9h à 18h avec 50% de présence entre 12h et 14h. La puissance installée d'éclairage est de 5W/m². La puissance utile moyenne de bureautique simulée est de 8W/m².

3. APPLICATION DE LA METHODE DES PLANS D'EXPERIENCE

Il existe une multitude de types de plans d'expérience, mais les plans D-optimaux semblent bien adaptés à notre problématique de consommation énergétique des bâtiments (Romani, 2015). Ces plans ont été développés pour réduire au maximum le nombre des combinaisons dans le cas d'un problème sans contrainte (Goupy, 2013). Nous considérons une liste des facteurs thermiques impactés par le comportement des usagers d'un espace de bureau classique, que nous résumons dans le tableau ci-après :

Famille de facteurs « Comportement des usagers »
Niveau d'ouverture des fenêtres
Heures d'ouverture des fenêtres
Niveau d'ouverture des stores
Heures d'ouverture des stores
Heures de fonctionnement bureautique
Heures de fonctionnement éclairage

Température de consigne
Nombre de jours d'absence

Tableau 3 : Paramètres thermiques impactés par le comportement des usagers

Les facteurs qui ne seront pas étudiés dans le cadre du plan d'expérience seront fixés à un niveau constant. Les paramètres de conception et le climat sont considérés fixes.

3.1. MATRICES D'EXPERIENCE

Nous considérons les deux matrices d'expériences présentées ci-après :

- Matrice d'expérience n°1 : Pas de limite aux ouvertures de fenêtres – très grande dérive possible des besoins de chauffage
- Matrice d'expérience n°2 : Limite définie pour les ouvertures de fenêtres – zoom sur les besoins de chauffage de faible amplitude, caractéristiques de bâtiment basse consommation.

Nom du facteur	Symbole	Valeur min	Valeur max	Valeur centrale	Commentaire
Niveau d'ouverture des fenêtres (1)	Ouv_Fen	5%	95%	50%	
Niveau d'ouverture des fenêtres (2)	Ouv_Fen	5%	10%	7,5%	
Heures d'ouverture des fenêtres (1)	Heures_Ouv_Fen	30min	8h30	4h30	Min : 9h-9h30 Max : 9h-17h30 Centre : 9h-13h30
Heures d'ouverture des fenêtres (2)	Heures_Ouv_Fen	30min	2h	1h15	Min : 9h-9h30 Max : 9h-11h Centre : 9h-10h15
Niveau d'ouverture des stores	Ferm_Stores	5%	95%	50%	Uniforme sur toutes les orientations
Heures d'ouverture des stores	Heures_Ferm_Stores	30min	8h30	4h30	Min : 9h-9h30 Max : 9h-17h30 Centre : 9h-13h30
Heures de fonctionnement bureautique	Heures_Bur	0h	9h	4h30	Min :N/A Max : 9h-18h Centre : 9h-13h30
Heures de fonctionnement éclairage	Heures_Ecl	0h	9h	4h30	Min :N/A Max : 9h-18h Centre : 9h-13h30
Température de consigne	Tc	17°C	23°C	20°C	
Nombre de jours d'absence	ETP_Abs	0%	10%	5%	

Tableau 4 : Matrice d'expérience – (1) Pas de limites aux ouvertures de fenêtres (2) Ouvertures des fenêtres limitées

Nous avons posé *a priori* un modèle de régression de premier degré avec interaction (PDAI) en nous appuyant sur Romani (2015) qui pose que la relation entre les paramètres d'un bâtiment et sa consommation d'énergie peut n'être que linéaire et/ou quadratique et/ou avec des interactions et que les modèles d'ordre 3 et supérieur ne donnent en général pas plus de précision. Les interactions considérées

sont d'ordre 2 uniquement, et sa mise en œuvre conduit à un plan d'expérience de 44 essais ce qui est un nombre très satisfaisant de simulations pour obtenir un modèle réduit des besoins de chauffage. Les plans d'expérience sont générés à l'aide du logiciel JMP (acronyme à développer, et/ou éditeur à préciser).

4. RESULTATS

4.1. OBTENTION ET CARACTERISATION DES MODELES POLYNOMIAUX

Les résultats des plans d'expérience permettent de classer les facteurs par force d'influence sur la réponse. Le critère permettant de déterminer si un facteur est influent sur la réponse est la *p-value*, qui mesure la probabilité qu'un événement soit rare. Cet indicateur est calculé grâce à l'écart-type associé au coefficient d'influence d'un facteur. Il est admis qu'une *p-value* supérieure à 0,01 montre un effet négligeable d'un facteur. Cela se traduit par la grandeur LogWorth qui vaut $-\log_{10}(p\text{-value})$. La valeur seuil de LogWorth est donc de 2. Il faut noter que cette valeur est à préciser et le choix de la réduction finale du modèle est laissé à l'expérimentateur.

Le groupe de paramètres influents selon le critère retenu sont, par ordre décroissant d'influence : *Ouv_Fen*, *Heures_Ouv_Fen*, *Ouv_Fen x Heures_Ouv_Fen*, *Heures_Ouv_Fen x Tc*, *Ouv_Fen x Tc* et *Tc*.

Dans le cas de la matrice d'expérience n°2, le groupe de paramètres influents est plus large et avec un classement différent des paramètres précédents : *Tc*, *Heures_Ouv_Fen*, *Ouv_Fen*, *Heures_Bur*, *Ouv_Fen x Heures_Ouv_Fen*, *Ferm_Stores x Heures_Ferm_Stores*, *Heures_Ecl*, *Ferm_Stores*, *Heures_Ouv_Fen x Tc*, *Heures_Ferm_Stores*, *Ouv_Fen x Tc* et *Heures_Bur x Tc*.

Nous voyons ici nettement que les facteurs influents sont plus nombreux et intègrent plus les apports internes et solaires avec des effets du même ordre que la température de consigne et l'ouverture des fenêtres. Ceci est plus cohérent avec le domaine de la basse consommation et les observations de décorrélation partielles des consommations par rapport au climat. Le coefficient de corrélation pour obtenu pour chacun de ces modèles est de 0,99. Le graphique suivant montre la corrélation entre les résultats issus du modèle polynômial et les résultats STD. Ces résultats sont ceux calculés sur les 44 points du plan d'expérience.

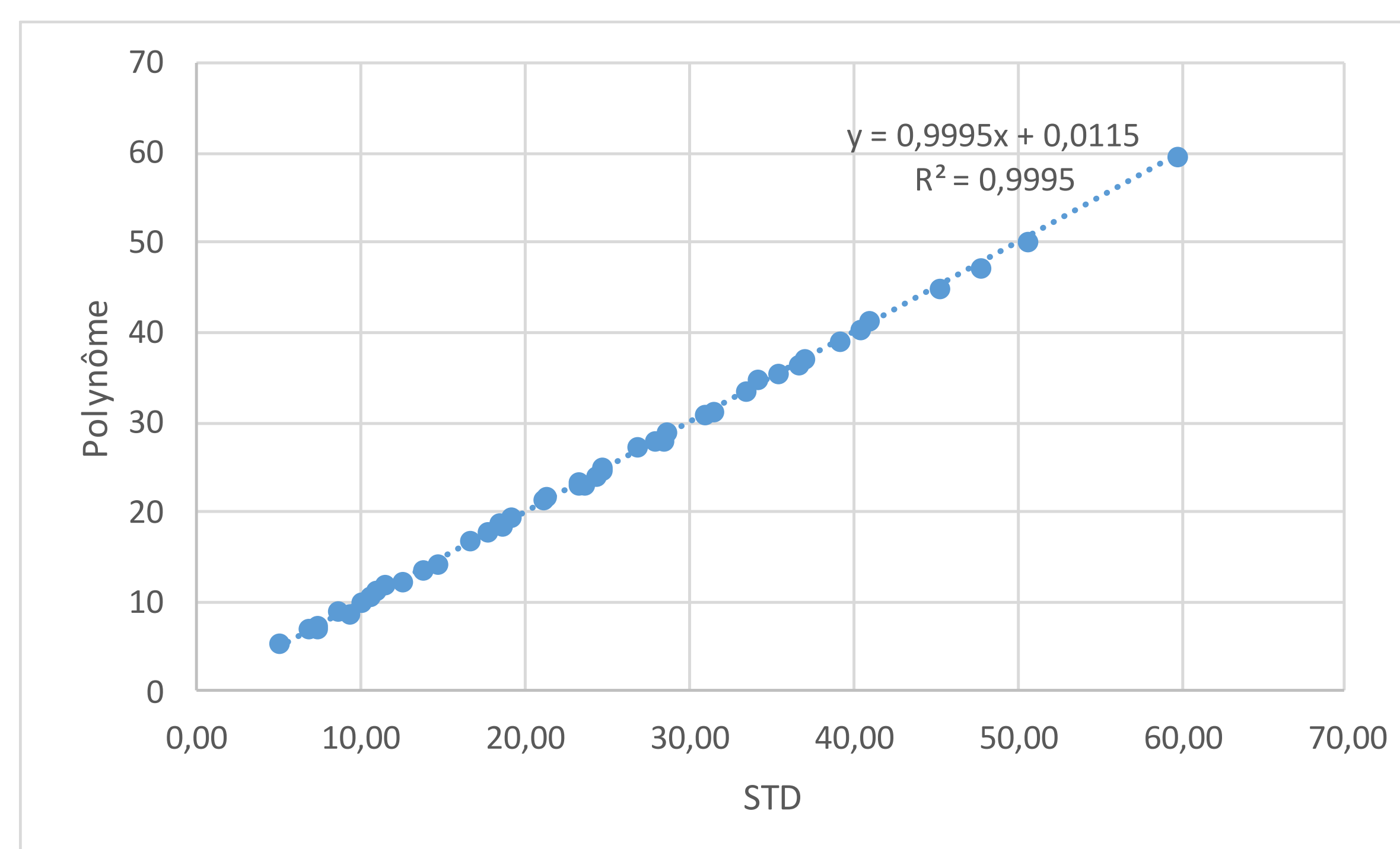


Figure 3 : Comparaison entre le polynôme et la STD pour la matrice d'expérience n°2 sur les points du plan d'expérience.

4.2. VALIDITE DES MODELES POLYNOMIAUX

Nous avons entrepris de vérifier la validité de ces modèles sur le domaine couvert par les valeurs min/max des facteurs. Nous avons donc simulé des valeurs aléatoires pour chacun de ces facteurs. Les tirages suivent ici une loi uniforme sur le domaine de chaque facteur. Il est important de noter que pour ces tests, concernant les facteurs de type « scénario », nous avons tout d'abord tiré aléatoirement des durées en considérant le même horaire de départ. Cela signifie un schéma de distribution dans le temps identique à celui considéré pour le plan d'expérience. Dans un deuxième temps, nous avons testé la résilience de la corrélation face à des scénarios plus aléatoires.

4.2.1. Tirages aléatoires uniformes sur l'ensemble du domaine de définition du polynôme

Le graphique suivant montre la corrélation entre les résultats issus du modèle polynômial et les résultats STD :

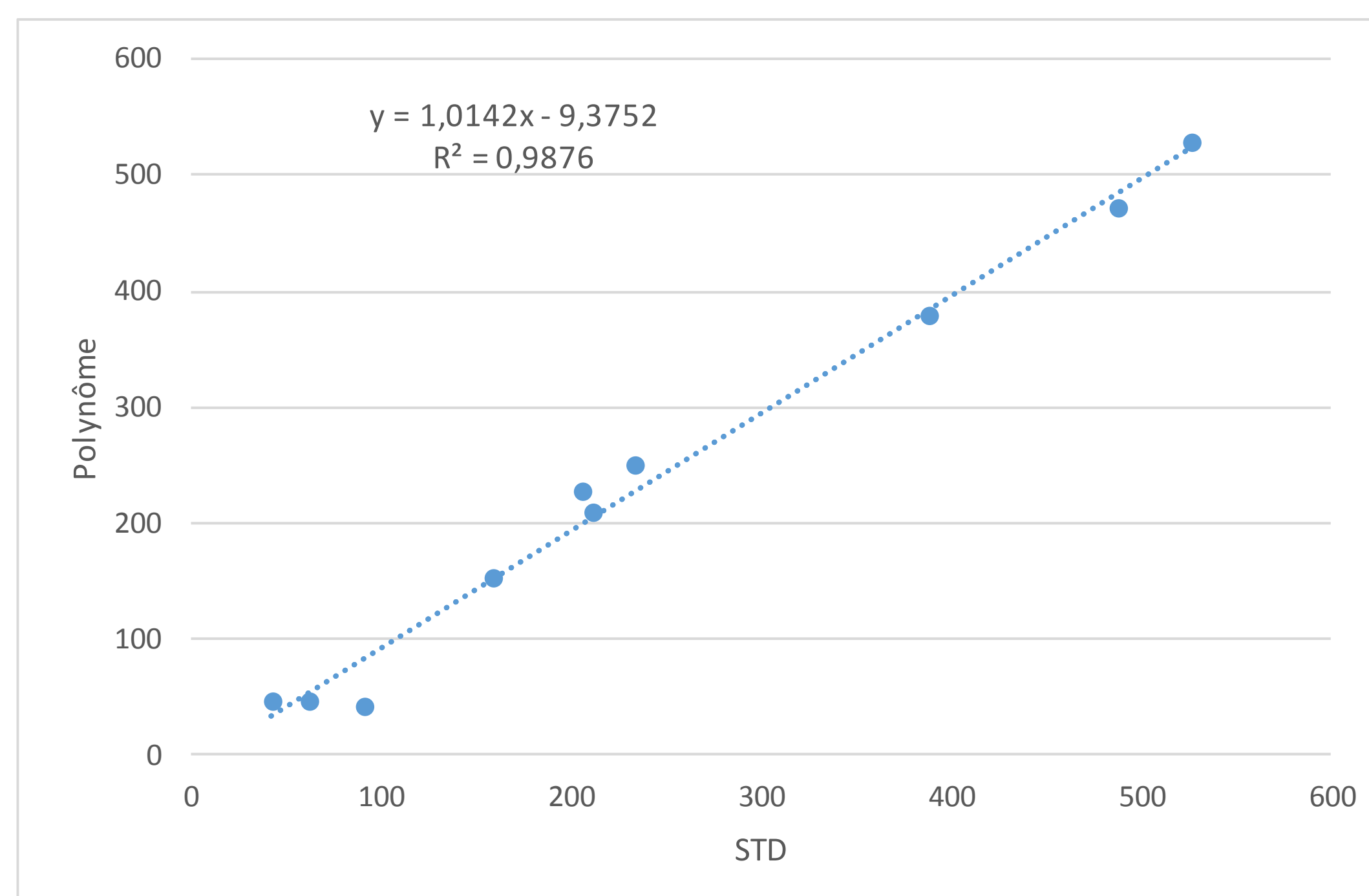


Figure 4 : Comparaison entre le polynôme et la STD pour la matrice d'expérience n°1 sur des points aléatoires du domaine à distribution de scénario équivalente au plan d'expérience.

La corrélation demeure très bonne avec un R^2 de 0,98. Nous obtenons le même résultat pour la matrice d'expérience n°2. Ces premiers tests montrent que la corrélation est résiliente face à un tirage aléatoire de valeurs à l'intérieur du domaine défini par la matrice d'expérience.

4.2.2. Zoom sur la partie « basse consommation » du domaine

Le polynôme issu de la matrice d'expérience n°1 couvre un très large domaine en termes de besoins de chauffage, au contraire du polynôme issu de la matrice d'expérience n°2.

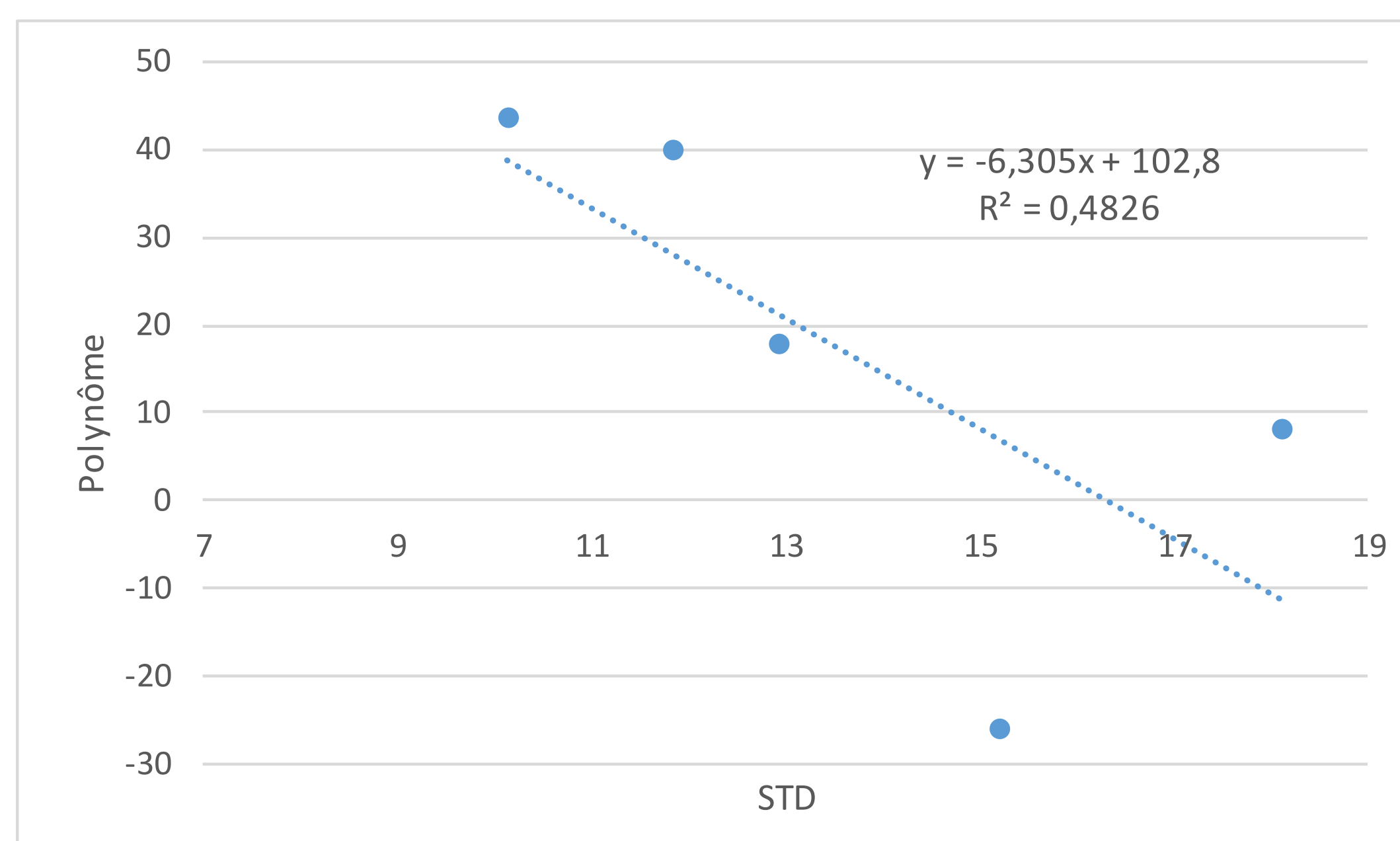


Figure 5 : Comparaison entre le polynôme et la STD pour la matrice d'expérience n°1 sur des points aléatoires du domaine en maintenant les valeurs min d'ouverture des fenêtres.

Nous voyons dans ce cas que la corrélation n'est pas bonne. Ceci est cohérent avec le classement de la force des facteurs présenté précédemment pour ce polynôme et montre que cette partie à la limite basse du domaine est mal représentée.

4.2.3. Distributions aléatoires de tous les facteurs y compris la distribution temporelle

Nous avons utilisé deux méthodes selon qu'il s'agit d'un facteur de type « niveau » ou d'un facteur de type « scénario ». Pour les facteurs de type « niveau », nous avons effectué le même tirage aléatoire que précédemment. Pour les facteurs de type « scénarios », nous générons sous Excel des scénarios aléatoires. Le tirage aléatoire de scénario se fait avec la fonction suivante : $SI(ALEA()<p;1;0)$. Un tirage de ce type entre 1 (ouvert) et 0 (fermé) fait que les chances d'être tiré sont égales pour les deux possibilités si $p=0,5$. Sur l'ensemble des heures du scénarios, cela permet de créer des distributions variées tournant autour d'une moyenne connue représentée par « p ». Nous associons à chacun de ces plannings aléatoires la valeur correspondant aux variables de notre polynôme. Ces tirages aléatoires sont placés dans une syntaxe propre au logiciel EnergyPlus. Ce test est fait sur un jeu de 51 valeurs différentes pour chaque facteur.

Les résultats pour le polynôme issu de la matrice d'expérience n°2 sont présentés sur la figure 6.

Ces résultats sont très bons avec un R^2 de 0,97. Ce polynôme décrivant les besoins de chauffage d'un espace de bureau dans un domaine correspondant à la basse consommation est donc fiable. Il peut être utilisé pour suivre en exploitation les performances en l'intégrant dans une démarche de M&V pour tenir compte des facteurs d'usages.

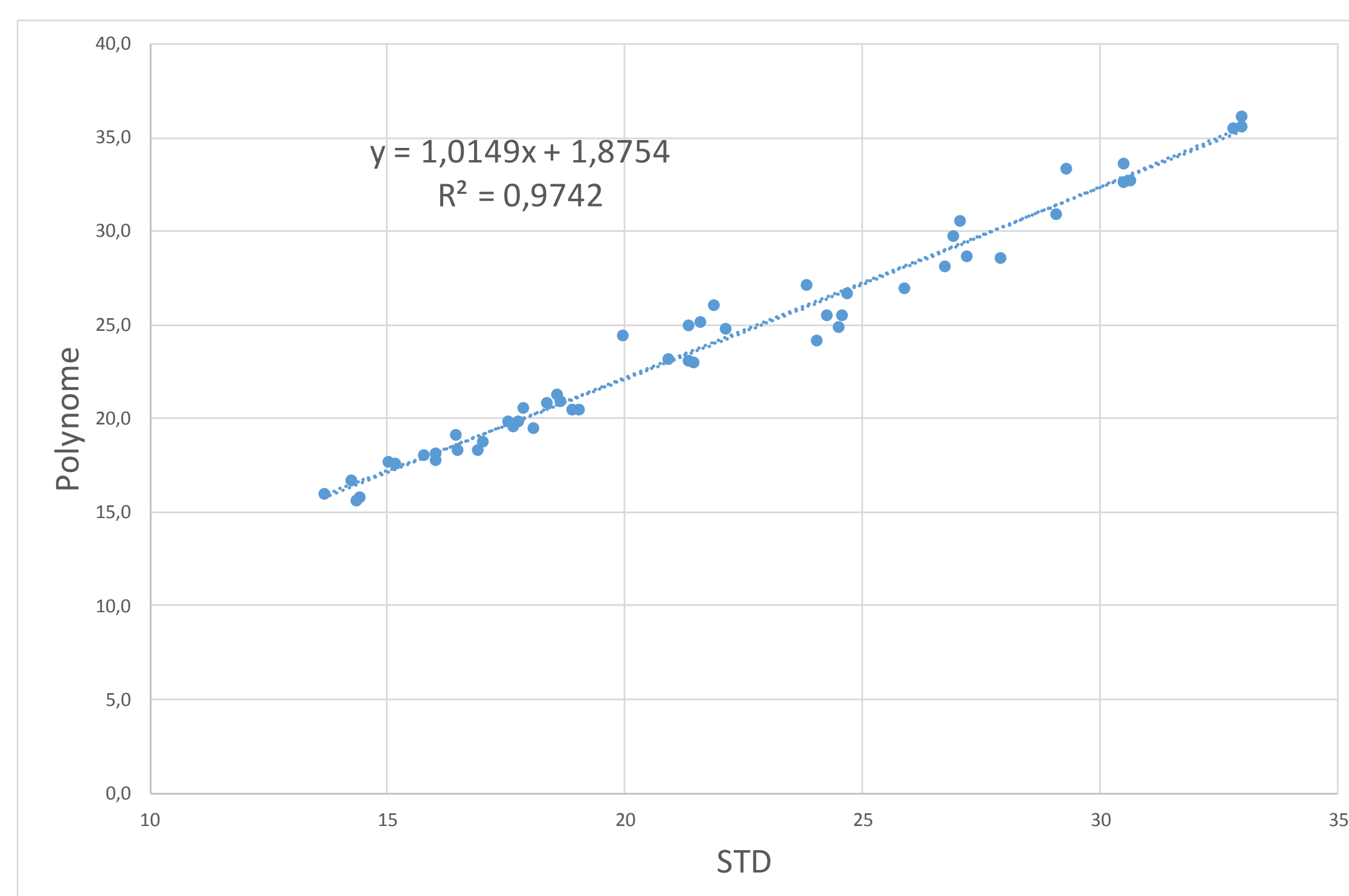


Figure 6 : Comparaison entre le polynôme et la STD pour la matrice d'expérience n°2 pour des valeurs de facteurs aléatoires

5. CONCLUSIONS

Nous avons pu mettre en évidence que la méthode des plans d'expérience est adaptée à la création de modèles réduits polynômiaux des besoins de chauffage des bâtiments, rejoignant ainsi des travaux antérieurs (Romani, 2015). En concentrant l'analyse sur l'impact des facteurs d'usages sur les besoins de chauffage, nous avons pu déterminer des règles méthodologiques pour l'élaboration de telles régressions.

Les expressions polynômiales générées sont faciles à interpréter en termes d'impact des facteurs sur la réponse. Nous notons que le critère de tri (p-value) doit être examiné de manière critique. Même si la

valeur proposée par défaut est un bon point de départ, un jugement physique est nécessaire sur les paramètres qui affichent une valeur proche de ce critère.

De plus, les valeurs min/max choisies dans la matrice d'expérience déterminent fortement la validité du polynôme sur un domaine de consommation donné.

Concernant les besoins de chauffage, nous obtenons une précision très satisfaisante avec des polynômes d'ordre 1 et d'interaction 2. Cette méthode présente un potentiel intéressant pour les bâtiments basse consommation qui sont très dépendants des usages.

6. BIBLIOGRAPHIE

- Romani, Z., 2015. « Développement d'une méthode d'aide à la décision multicritère pour la conception des bâtiments neufs et la réhabilitation des bâtiments existants à haute efficacité énergétique ». Thèse de doctorat, Université de La Rochelle. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01373443>.
- Vorger, E., 2014. « Etude de l'influence du comportement des occupants sur la performance énergétique des bâtiments ». Thèse de doctorat, Ecole nationale supérieure des mines de Paris. <https://pastel.archives-ouvertes.fr/tel-01144461>.
- Tinsson, W., 2010. Plans d'expérience constructions et analyses statistiques. Berlin; Heidelberg; London : Springer. ISBN 978-3-642-11471-7.
- Goupy, J., 2013. Introduction aux plans d'expériences avec applications 5^{ème} édition. Paris : Dunod. ISBN 978-2-10-059297-5.
- Cauchetaux, A., Gautier, A., Lahrech, R., 2016. « A meta model-based methodology for an energy savings uncertainty assessment of building retrofitting ». *Int. J. Metrol. Qual. Eng.* 7, 402 (2016). DOI : [10.1051/ijmqe/2016016](https://doi.org/10.1051/ijmqe/2016016)
- Jaffal, I., Inard, C., développer l'ensemble des auteurs. 2017. « A metamodel for building energy performance ». *Energy and Buildings* 151 (2017) 501-510. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.06.072>
- Østergård, T., Jensen, R., Maagaard, S., 2018. « A comparison of six metamodeling techniques applied to building performance simulations ». *Applied Energy* 211 (2018) 89-103. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.10.102>
- Manfren, M., Aste, N., Moshksar, R., 2013. « Calibration and uncertainty analysis for computer models – a metamodel based approach for integrated building simulation ». *Applied Energy* 103 (2013) 627-641. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.10.031>
- Cerema, 2018. Bâtiments démonstrateurs à basse consommation d'énergie, Enseignements opérationnels tirés de 141 constructions et rénovations du programme PREBAT 2012-2017. Editions du Cerema. ISBN 978-2-37180-262-9. <https://www.cerema.fr/fr/centre-ressources/boutique/batiments-demonstrateurs-basse-consommation-energie-prebat>
- OID, 2017. Baromètre de la performance énergétique et environnementale des bâtiments tertiaires. http://www.o-immobilierdurable.fr/hc_ressources/barometre-2017/

Identification *in situ* de la performance thermique d'une paroi : Comparaison de méthodes dans le contexte de bâtiments occupés.

Auline Rodler*^{1,2}, Sihem Guernouti^{1,2}, Marjorie Musy^{1,2}

**¹ Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et
l'aménagement, 9 rue René Viviani Nantes**

² Institut de Recherche en Sciences et Techniques de la Ville, Nantes, France

*auline.rodler@ec-nantes.fr

RESUME.

La mesure de la résistance thermique in situ est une étape clé pour le contrôle des performances des parois. Il existe actuellement différentes méthodes pour estimer les caractéristiques thermiques des parois. Souvent réalisées en laboratoire, elles ne prennent pas en compte les sollicitations locales dues à l'environnement ou aux occupants. Des protocoles in situ avec des préconisations de pose de matériel et de conditions climatiques à respecter sont aussi utilisés pour estimer la résistance thermique des parois. Dans ce papier, nous proposons de comparer une partie de ces méthodes in situ à la méthode usuelle 'moyenne' (ISO 9869-1), pour évaluer la résistance thermique d'une paroi de bâtiments situés à Nantes. Pour cela, la méthode ISO 9869-1 (ISO 9869-1 2014) et un modèle de paroi inverse sont étudiés. La première méthode requiert une instrumentation basée sur des thermocouples et fluxmètres. Le modèle de paroi utilise les mêmes mesures que la norme et un algorithme de minimisation. Sur un autre site expérimental, la méthode SEID (Pajani 2010) utilisant uniquement la caméra thermique et un échantillon dont la résistance thermique est connue est présentée.

MOTS-CLÉS : garantie de performance, résistance thermique, protocole expérimental in situ, modélisation de paroi

ABSTRACT.

It is important to know the in situ thermal walls resistance for inspection diagnosis. Different methods to estimate the walls resistance exist. Most of them have been developed in laboratory under controlled conditions, and thus do not consider the thermal stresses due to the close environment or to the occupation of the building. International standards with installation procedures and tests conditions to be respected are also usually used to estimate the in situ thermal resistance value of the wall. We propose in this paper a benchmark of protocols and methods to estimate in situ thermal resistance. These methods are applied to two sites in Nantes, France. ISO 9869-1 (ISO 9869-1 2014) is tested, using thermocouples and a heat flow meter. A method based on thermography SEID (Pajani 2010) is also applied: it uses a thermal camera and an insulation sample whose conductivity is known. The third one lies on an inverse wall model based on a minimization algorithm using the same inputs as the standard.

KEYWORDS: energy performance contracts, thermal resistance, in situ protocol, wall modelling

INTRODUCTION

Les préoccupations croissantes en matière de développement durable ont, depuis plusieurs années, mis en lumière l'importance majeure de l'industrie de la construction dans la consommation de ressources naturelles et d'énergie, et la nécessité d'adopter une démarche réfléchie de réduction de ces impacts environnementaux. En France, le bâtiment est à lui seul responsable du quart des émissions annuelles de CO₂ et d'environ la moitié de la consommation d'énergie finale. Le potentiel d'économies énergétiques et de réduction d'impacts dans ce secteur est donc très important.

Dans ce contexte, les réglementations et les priorités concernant l'efficacité énergétique des bâtiments amènent les professionnels du bâtiment à s'interroger sur la question de l'isolation du bâti et de l'évaluation des performances thermique réelles de l'enveloppe des bâtiments. Cependant, l'écart constaté entre les performances ciblées en phase de conception et les performances réelles une fois le bâtiment construit est important et les consommations énergétiques constatées sont souvent plus importantes que celles annoncées (ADEME 2017).

Pour anticiper et réduire cet écart et notamment dans le cadre de la garantie de performances énergétiques, il est nécessaire de disposer de méthodes simples et éprouvées à mettre en œuvre soit en chantier ou avant travaux dans le cas de bâtiments existants pour, dans le premier cas évaluer la performance thermique de l'enveloppe et dans le second disposer de données d'entrées fiables pour la conception des rénovations.

Notre étude consiste à tester et comparer trois méthodes d'évaluation de la résistance thermique *in situ*. La première méthode est la norme ISO 9869-1 (ISO 9869-1 2014) avec ses deux variantes : moyenne et dynamique. La deuxième méthode repose sur la thermographie infra rouge : la méthode du SEID (Pajani 2010) consiste à mesurer la température de la surface de la paroi et de la paroi modifiée. La dernière méthode repose sur la modélisation inverse couplée à des mesures *in situ*.

2. METHODES

2.1 METHODE ISO 9869-1

Cette méthode, aussi appelée méthode du fluxmètre est basée sur un certain nombre d'hypothèses simplificatrices. De manière théorique, la conductance U d'une paroi de bâtiment peut être obtenue en mesurant la densité de flux à travers la paroi à l'aide d'un fluxmètre et des températures de surface à l'intérieur et à l'extérieur. En régime permanent, le coefficient de transmission thermique de la paroi est alors défini dans la norme (ISO 9869-1 2014) comme la densité de flux divisée par la différence des températures de surface. Toutefois, étant donné que les conditions du régime permanent ne sont jamais rencontrées *in situ* en pratique, une mesure ponctuelle n'est pas possible. Plusieurs possibilités sont proposées dans la norme :

- **Méthode moyenne** : Nous admettons que la moyenne du flux et des températures de surface sur une période suffisamment longue peut donner une bonne estimation du régime permanent. Cela reste valable pour des parois à faible inertie et plus favorable pour un écart de températures de surface intérieur-extérieur ($\Delta T_{ie} : T_{sext} - T_{sint}$) élevé car la quantité de chaleur traversant la paroi sera plus importante.
- **Méthode dynamique** : La méthode dynamique, proposée par la norme (ISO 9869-1 2014) est utilisée ici afin de considérer les grandes variations de températures et de flux dans le temps. Celle-ci prend en compte des termes représentant les effets de l'inertie de la paroi.

Quelle que soit la méthode utilisée, certaines hypothèses et conditions définies dans la norme et des préconisations issues de l'expérimentation (Albatici and Tonelli 2010; Monchau, Ibos, and Feuillet 2014) sont tout de même à prendre en compte. Comme hypothèses, les matériaux sont considérés homogènes et le flux unidirectionnel. Des préconisations sont données :

- Les capteurs doivent être placés de façon à être représentatifs de la paroi considérée. Plusieurs fluxmètres et capteurs de température peuvent être utilisés (on utilisera alors une moyenne).
- Les capteurs doivent être placés loin des ponts thermiques structurels
- La surface extérieure doit être protégée de la pluie et du rayonnement solaire. Un mur orienté Nord est conseillé.
- Le test doit avoir une durée d'au moins 72h.
- Pour considérer le résultat comme probant, le U obtenu doit être \pm égal à 5% près au U obtenu 24h auparavant.
- La différence de température ΔT_{ie} ($T_{sext} - T_{sint}$) doit être comprise entre 5 et 10°C afin d'avoir un flux significatif et diminuer l'incertitude de mesure vis-à-vis de celui-ci.

2.2 MODELE INVERSE DE PAROI

Cette méthode est proche des méthodes dites passives. Ces dernières visent à déterminer la résistance thermique de la paroi à partir de températures sur la paroi extérieure obtenue par thermographie infrarouge. Ici, nous avons remplacé la caméra par des thermocouples en surface. Une modélisation aux éléments finis permet de résoudre le système thermique, les transferts par conduction étant considérés unidimensionnels.

Les conditions aux limites sont la température de surface extérieure et le flux mesuré du côté intérieur. La résolution implicite de l'équation (2) de la chaleur conduit à la discrétisation du temps et de l'espace et de manière matricielle s'écrit :

$$X T_{i+1} = T_i + B \quad (1)$$

avec i l'indice temporel, T le vecteur des températures, X et B les matrices détaillées ci-après et T_{se} la température de surface du mur et φ le flux mesuré :

$$X = I - \Delta t A \quad (2)$$

$$A = a/\Delta x^2 \begin{pmatrix} -2 & 2 & 0 & \dots & 0 \\ 1 & -2 & 1 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & -2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & -2 & 1 & 0 \\ \dots & \dots & 1 & -2 & 1 \\ 0 & 2 & -3 & \dots & \dots \end{pmatrix}, a = \frac{\lambda}{\rho c} B = \begin{pmatrix} \frac{2\Delta t}{\rho c \Delta x} \varphi_{i+1}^{in} \\ 0 \\ 0 \\ \dots \\ \frac{2a}{\Delta x^2} T_{se\ i+1} \end{pmatrix}$$

L'optimisation du résultat se fait par la maximisation de la vraisemblance (Choi et al. 2018) en minimisant l'écart entre la température de surface intérieure mesurée et simulée. Nous formulons une hypothèse sur la distribution à priori de la conductivité. Ici, la conductivité est supposée suivre une distribution uniforme.

2.3 METHODE DU SEID

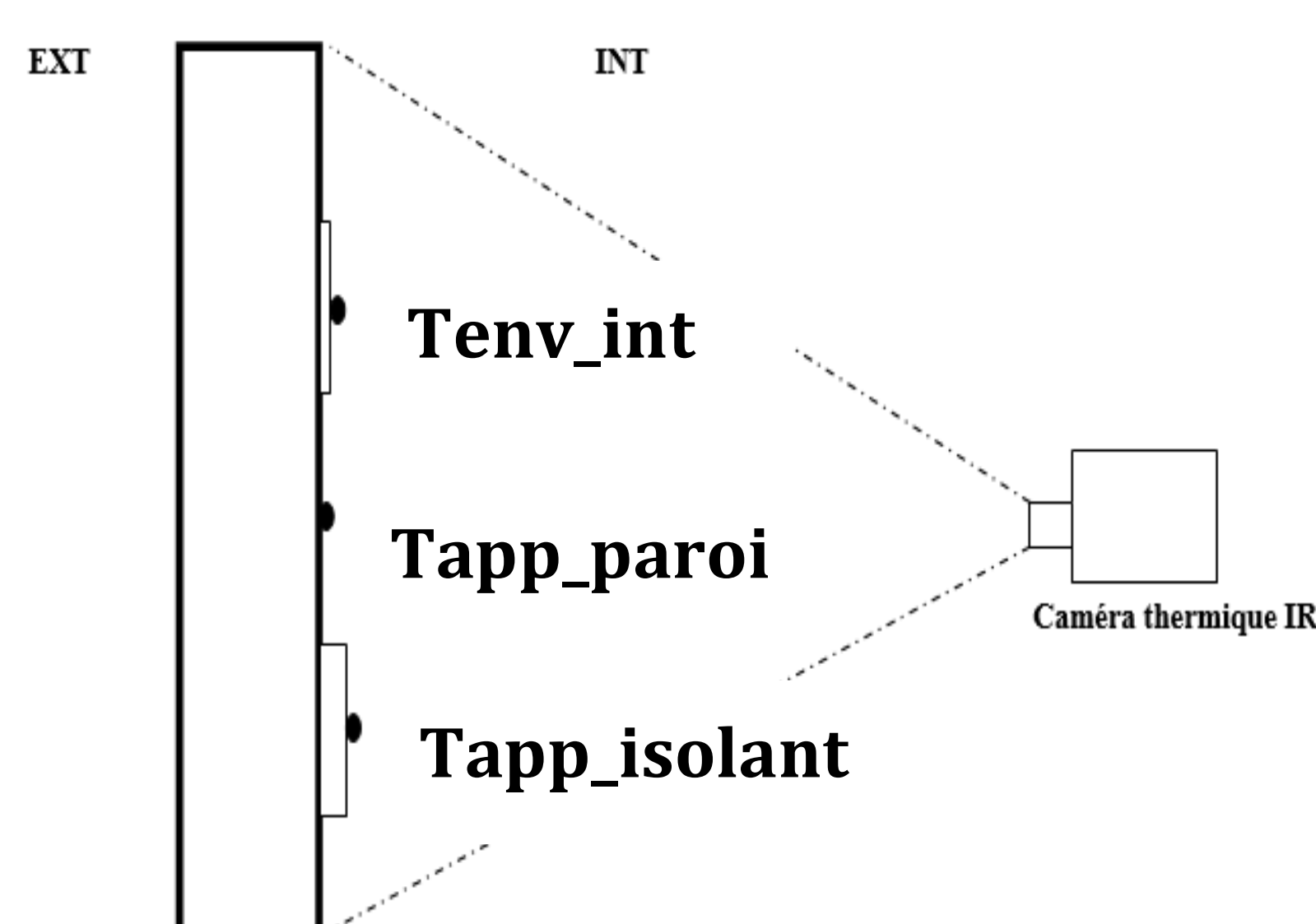


Figure 1 : Vue du dispositif expérimental utilisé pour la méthode du Seid

La méthode du Seid (Figure 1) a été développée par D.Pajani (Pajani 2010) et a pour particularité de n'utiliser que des mesures de flux thermiques à l'aide d'une caméra thermique IR et d'un seul et unique côté de la paroi (à l'intérieur). Elle consiste donc à placer un élément isolant dont la résistance $R_{isolant}$ est connue et dont l'émissivité est proche de celle de la paroi. La simple mesure de 3 températures apparentes en réglant l'émissivité à 1 (température apparente de la paroi, température apparente de l'isolant et température d'environnement) permet d'avoir une estimation de la différence de résistance thermique entre le mur avec et sans l'isolant. La résistance thermique R de la paroi est obtenue par la relation :

$$R = R_{isolant} \frac{T_{env,int} - T_{app,isolant}}{T_{app,isolant} - T_{app,paroi}} \quad (3)$$

La température apparente correspond à la température de l'objet visé, lue par la caméra thermique IR et calculée à partir de la mesure du rayonnement émis par l'objet. Elle ne correspond pas à la température de surface réelle de l'objet.

La température d'environnement correspond à la température apparente de l'environnement lue par la caméra thermique IR sur une surface réfléchissante (ex : feuille d'aluminium) et calculée à partir de la mesure du rayonnement émis par l'environnement extérieur sur l'objet (ciel, sol, bâtiments...).

3. SITE EXPERIMENTAUX OCCUPES

3.1 SITE DU PERRAY, NANTES

Le site du Perray est situé dans le Nord-Est de Nantes (Figure 2, Figure 3). Il est composé d'un ensemble de 7 immeubles sur 5 niveaux (R+4) construits en 1993. L'ensemble d'immeubles a été instrumenté comme suit. Sur le bâtiment central entouré en rouge sur la Figure 2 :

- 7 capteurs de température d'air, type AMR wM-Bus ambient sensor ARF7904AA (au 3^{ème} et 4^{ème} étage)
- 6 capteurs de température de surface intérieure, GIVE-Ecotropy sensor ARF8041AA.
- 13 capteurs d'ouverture/fermeture de fenêtres
- 2 fluxmètres. Le fluxmètre utilisé dans cet article est placé au niveau du couloir central du dernier étage.
- 6 capteurs de température des conduits d'eau pour le chauffage et débitmètre à ultrason.

Sur le bâtiment central et les façades des bâtiments environnants :



Figure 2: Photo aérienne du site du Perray à Nantes



Figure 3: Photo de la façade ouest du bâtiment central

- 138 capteurs de température de surface extérieure (façades extérieures aux 2^{ème} et 4^{ème} étage + température de surface de toiture terrasse), type GIVE-Ecotropy sensor ARF8041AA (Pt 100).
- Feuille d'aluminium en façade pour la température d'environnement
- Scotch avec émissivité de référence en façade

Sur la toiture terrasse du bâtiment central, on trouve également une station météo avec mesure de :

- Température ambiante extérieure
- Humidité relative
- Vitesse du vent
- Rayonnement global incident sur le plan horizontal.

Le tableau ci-dessous présente les incertitudes de mesure des appareils (Tableau 1). Les caractéristiques thermiques des murs et de la toiture sont données dans les Tableau 2 et Tableau 3. La composition des murs a été donnée par le bailleur social et les caractéristiques thermiques correspondent à des valeurs tabulées.

Tableau 1: Métrologie et précision des capteurs

Appareil de mesure	Valeur mesurée	Unité	Précision
AMR wM-Bus ambient sensor ARF7904AA	Température d'air	°C	± 0,5°C
GIVE-Ecotropy sensor ARF8041AA	Température de surface	°C	± 0,5°C
Captec Volt101A Q13463	Flux	W/m ²	± 3 %

Tableau 2: Composition de la toiture terrasse

Toiture terrasse			
Elément	épaisseur (m)	R (m ² .K/W)	ρc (J/kgK)
Dalle béton	0,20	0,25	2.02*10 ⁶
Isolant (Polystyrène XPS)	0,20	5,00	3*10 ⁴
Membrane bitumineuse	0,01	0,043	1.88*10 ⁶
Gravier	0,04	0,033	1*10 ⁵
	Réq	2.33	

Tableau 3 : Composition du mur

Mur extérieur			
Elément	épaisseur (m)	R (m ² .K/W)	ρc (J/kgK)
Isolant (Polystyrène EPS)	0,10	2,222	3*10 ⁴
Mur béton	0,19	0,146	2.02*10 ⁶
Plaque de plâtre	0,013	0,325	1*10 ⁶

3.2 SITE DE L'ILE DE NANTES

Les mesures sur le site de l'île de Nantes sont réalisées dans un appartement d'une tour d'immeuble (R+15) des années 1970. Toute l'instrumentation (Figure 5) a été placée à l'intérieur sur une allège de fenêtre non isolée orientée Sud-Est. On y retrouve un fluxmètre de type Captec Volt101A Q13463 scotché sur le mur, un capteur de température ambiante de type HOBO U12-011, un scotch de référence d'émissivité $\epsilon=0.95$ permettant de déterminer l'émissivité du mur ($=0.96$), une feuille d'aluminium pour la mesure de la température d'environnement dont l'émissivité se rapproche de 1 (Datcu et al. 2005) et un échantillon d'isolant de résistance thermique connue ($R=1.1\text{m}^2\text{K/W}$) (Figure 5). Pour l'acquisition des températures de surface intérieures, une caméra thermique infrarouge de type FLIR A600 a été utilisée en continu. Pour la température extérieure, un capteur de température de type HOBO U12-011

(Figure 4) a dû être placé à l'abri sur un balcon dont l'exposition diffère légèrement de celle de la paroi étudiée (même orientation mais exposition au rayonnement solaire et au vent différente).

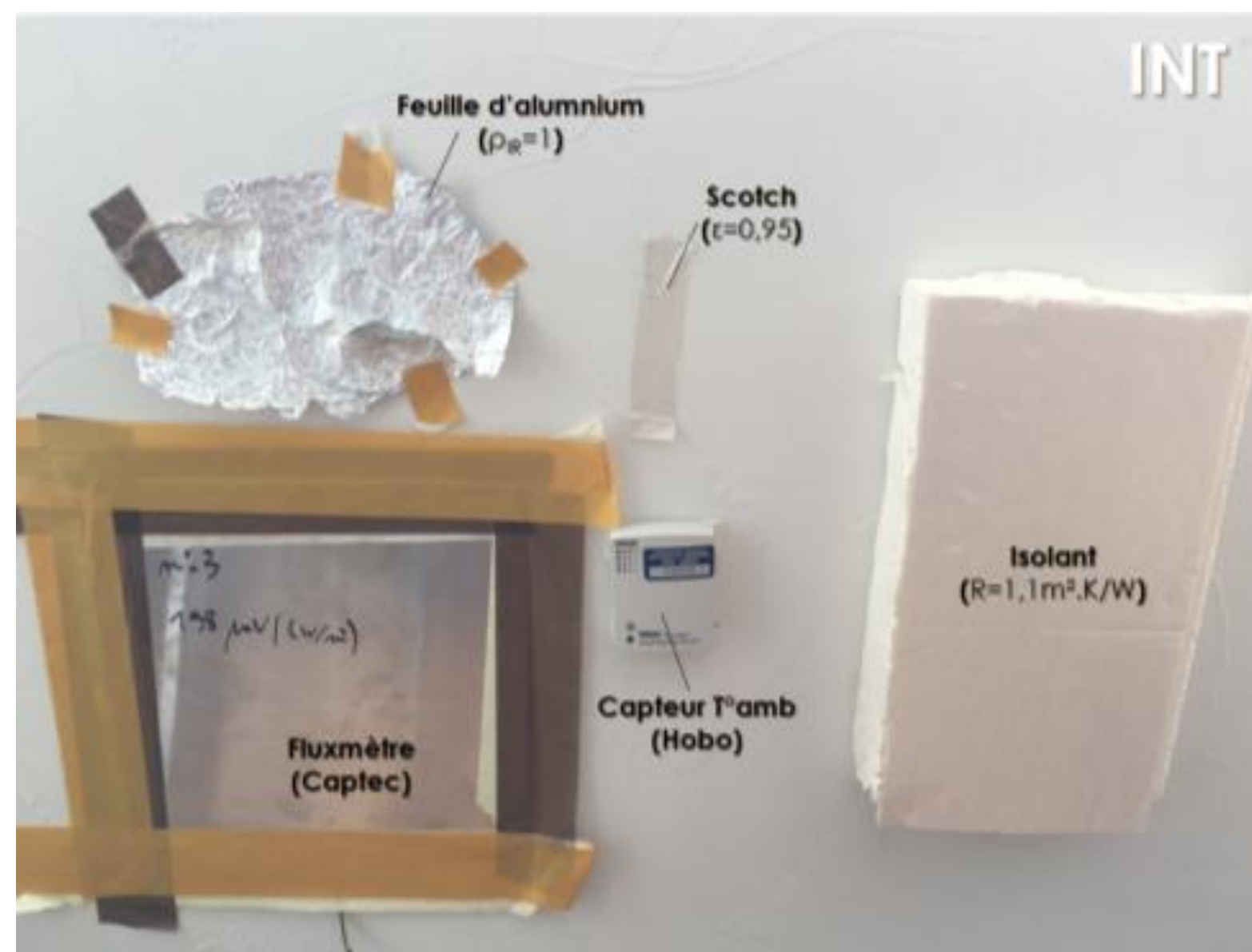


Figure 5: Instrumentation sur allège de fenêtre à l'intérieur



Figure 4: Emplacement du capteur de température extérieur

Le tableau ci-dessous (Tableau 4) présente les incertitudes de mesure de tous les appareils. Les caractéristiques thermiques des murs sont données ci-après et sont des valeurs tabulées ("Réglementation Thermique 2005") (Tableau 5).

Tableau 4: Métrologie et précision des capteurs

Appareil de mesure	Valeur mesurée	Unité	Précision
HOBO type U12-011	Température d'air	°C	± 0,35°C
Thermocouple type T	Température de surface	°C	± 0,5°C
FLIR A600-series	Tapparente	K	± 2°C
Captec Volt101A Q13463	Flux	W/m²	± 3%

Tableau 5: Composition du mur

Elément	Allège de fenêtre		
	épaisseur (m)	R (m².K/W)	ρc (J/kgK)
Mur béton	0,18	0,14-0,23	2.02*10 ⁶

4. RESULTATS ET DISCUSSIONS

Grâce aux données à notre disposition, nous avons appliqué la norme ISO 9869-1 au site du Perray (toiture) du 28 avril 2017 au 1 Mai 2017 (Figure 6), car au-delà nous avons un problème d'acquisition. Les valeurs attendues pour la résistance sont données dans un intervalle, car il s'agit de valeurs tabulées avec une incertitude importante et non mesurées en laboratoire (Tableau 6). Toutes les préconisations et hypothèses ont été respectées. Le protocole ISO 9869-1 semble plutôt concluant même si les valeurs sont surestimées (Tableau 6). La méthode de résolution moyenne surestime de 45% par rapport à la moyenne de la valeur attendue. La méthode de résolution dynamique s'avère plus précise avec une différence de 34% par rapport à la moyenne de la valeur attendue. La méthode dynamique est plus précise, compte tenu de la considération des effets dynamiques surtout pour les éléments à forte inertie. La modélisation inverse présente des résultats plus précis avec une différence moindre, de 11% sur la résistance attendue et de 4.3% sur la température de surface intérieure.

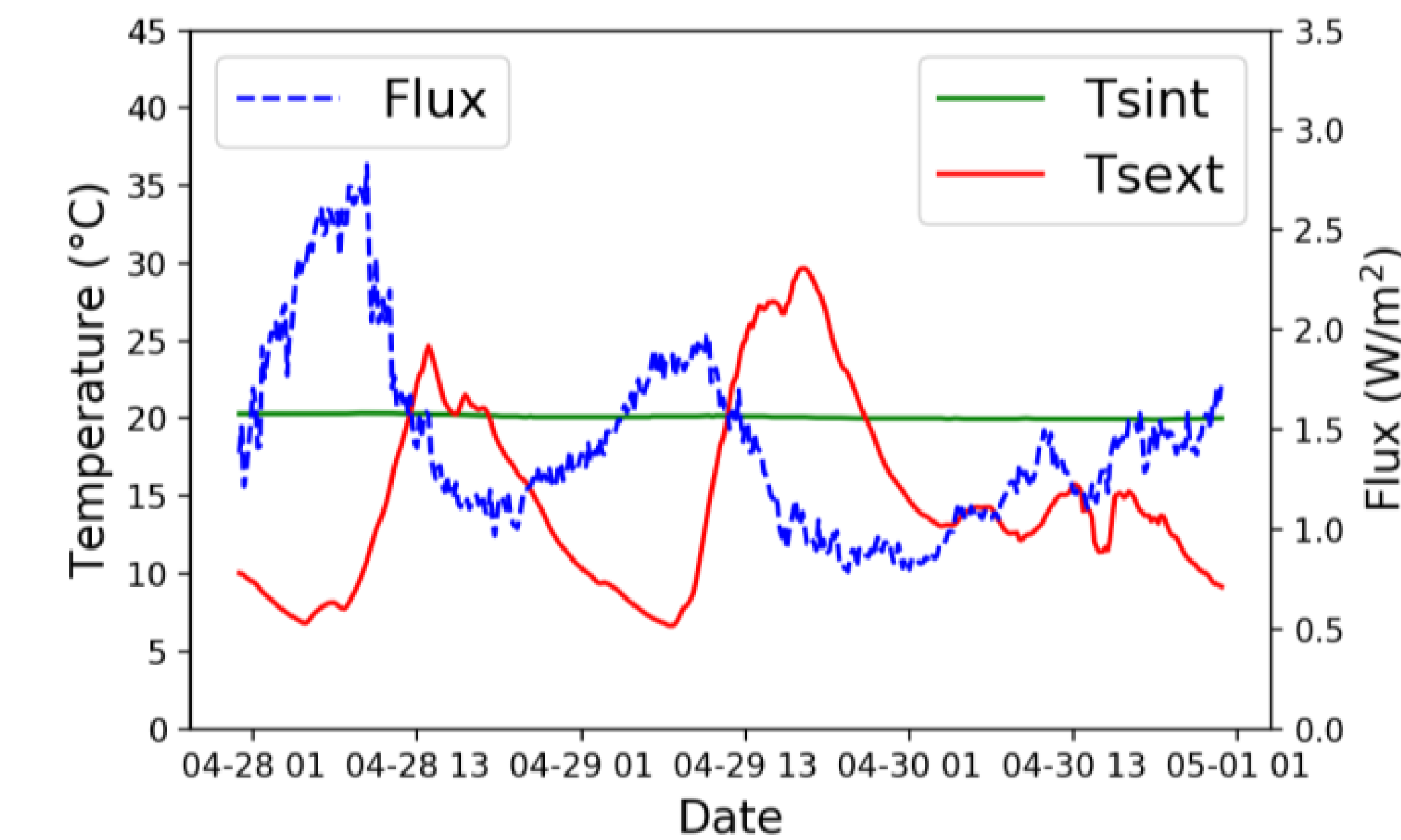


Figure 6: Mesures de flux et température de surface intérieur (Ti) et extérieur (Ti)

Tableau 6: Récapitulatif des résultats

Localisation	Site du PERRYAY : Toiture terrasse	Île de Nantes : Allège de fenêtre
R attendue	$2 \text{ m}^2.\text{K/W} < R < 3 \text{ m}^2.\text{K/W}$	$0,14 \text{ m}^2.\text{K/W} < R < 0,23 \text{ m}^2.\text{K/W}$
R méthode ISO 9869-1 (moyenne)	3,63 $\text{m}^2.\text{K/W}$	/
R méthode ISO 9869-1 (dynamique)	3,37 $\text{m}^2.\text{K/W}$	/
R méthode SEID ($\epsilon=1$)	/	0,667 $\text{m}^2.\text{K/W}$
R méthode SEID ($\epsilon=0,96$)	/	0,379 $\text{m}^2.\text{K/W}$
R modèle de paroi	2,25 $\text{m}^2.\text{K/W}$	/

La méthode SEID a été appliquée sur le site de l'île de Nantes en Mai. Nous rappelons que pour que la méthode puisse être appliquée, il faut vérifier certaines hypothèses : $T_{env_INT} \approx T_{int}$; $T_{app_paroi} \approx T_{si}$; $T_{app_isolant} \approx T_{isolant}$. En ce qui concerne la température d'environnement, celle-ci s'avère proche de la température ambiante intérieure durant les périodes nocturnes (Figure 7). Afin de valider l'utilisation de la température apparente mesurée par la caméra IR, celles-ci ont été comparées aux températures de surface de la paroi directement mesurées à l'aide d'un thermocouple entre le 23/05 et le 26/05 (Figure 8). La différence constatée entre les deux températures est inférieure à 1°C (en dessous de la précision de mesure de la caméra thermique). Ici, les résultats sont relativement éloignés (Tableau 6). Cependant, il semble important de bien corriger l'émissivité pour la mesure de la température apparente : avec l'émissivité corrigée nous obtenons une résistance plus proche de celle attendue (Tableau 6).

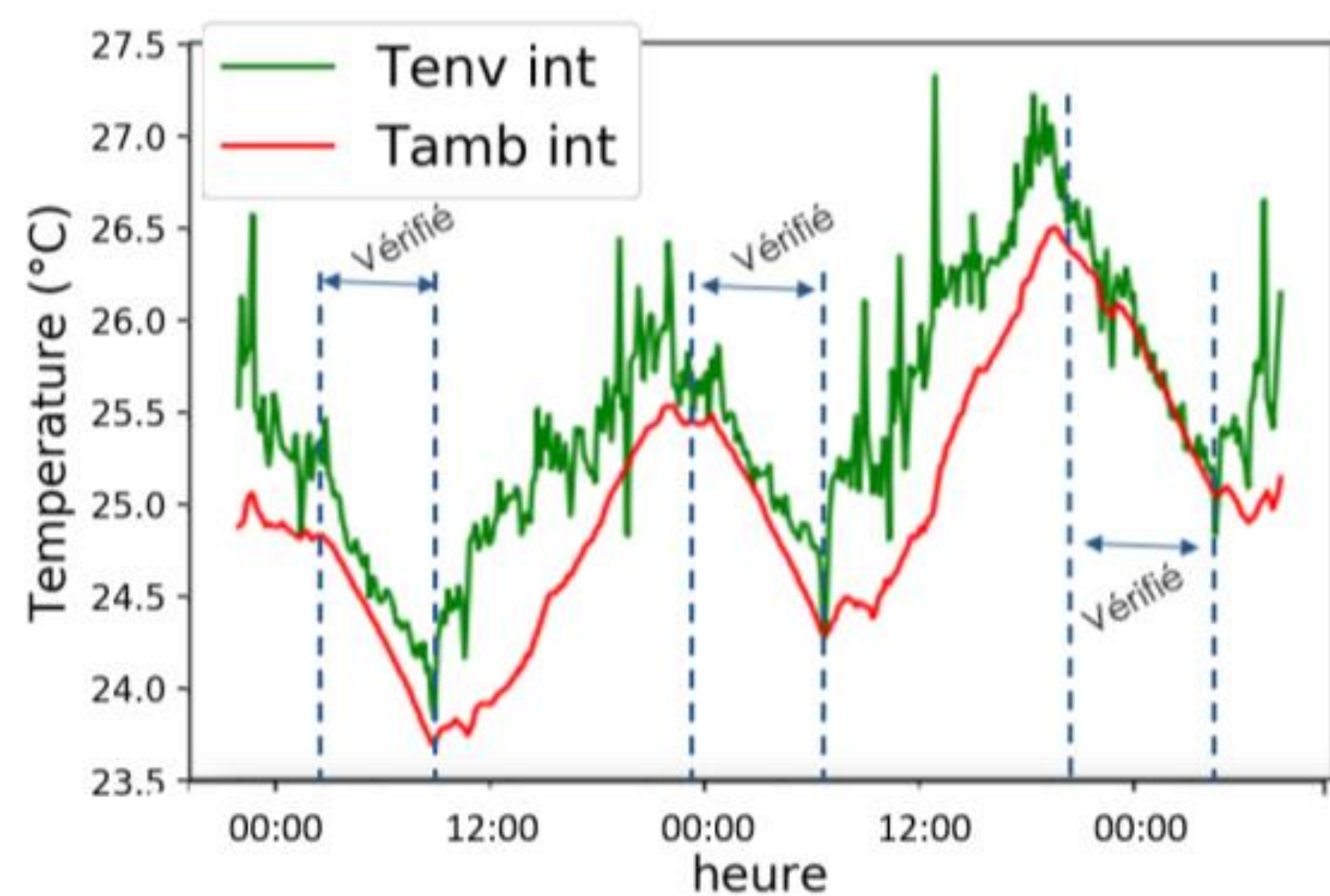


Figure 7: Température de l'environnement et ambiante du 23 au 26 Mai 2017

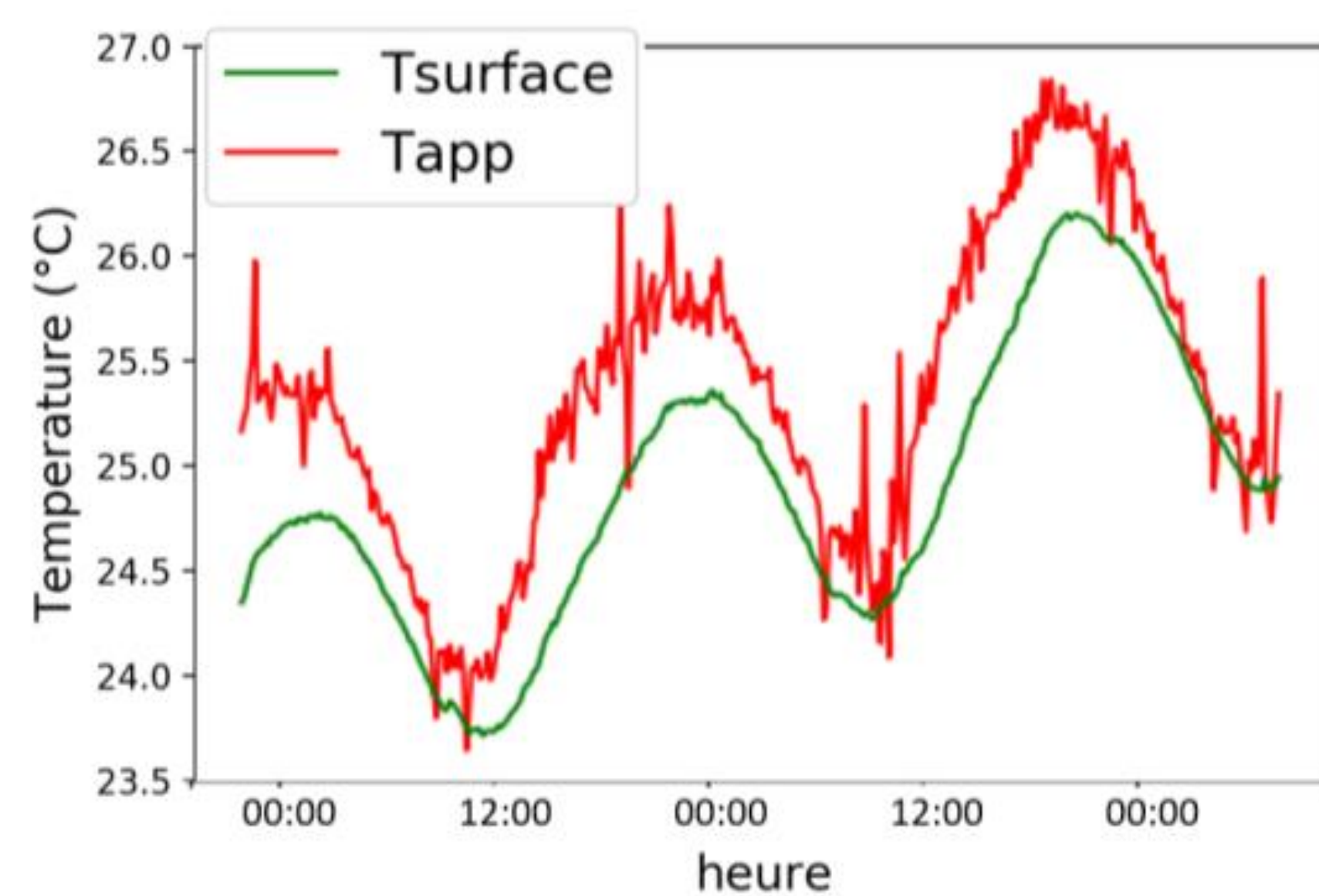


Figure 8: Température de surface intérieure et apparente du 23 au 26 Mai 2017

5. CONCLUSIONS

Différentes méthodes de détermination de la résistance thermique d'une paroi *in situ* ont été comparées dans ce papier. L'avantage de la norme ISO 9869 est l'utilisation uniquement de trois points de mesures : flux et températures de surfaces. Les fortes différences dans les valeurs obtenues sur les trois méthodes (ISO 9869 moyenne, ISO 9869 dynamique et modèle inverse) mettent en évidence que ces approches reposent sur des simplifications qui nécessitent d'être revues : le flux thermique 1D, le manque de prise en compte de l'inertie pour la norme (moyenne), pas suffisamment de mesures et un gradient thermique trop faible, qui pourrait être augmenté en utilisant une excitation (résistance chauffante, par exemple). Enfin, même si le modèle inverse permet d'obtenir des résultats plus proches de ceux attendus, les conclusions de ce travail comparatif devront être vérifiées sur des matériaux dont les caractéristiques sont connues avec précision et sur une période de mesures plus grande. Enfin, la méthode Seid présente l'avantage de n'utiliser qu'une caméra thermique, de travailler en relatif (différence de température entre chaque zone) et pour chaque pas de temps d'extraire toutes les mesures d'une seule et même image thermique mais les résultats ne sont pas concluants pour autant pour cette méthode.

REMERCIEMENTS

Ce travail préliminaire s'est effectué dans le cadre du projet européen (Grant Agreement No. 637221 – H2020-EeB-2014-2015), avec l'aide financière de l'Observatoire Nantais des Environnements Urbains pour l'instrumentation et avec le soutien du stage de Pablo Baumont.

BIBLIOGRAPHIE

- ADEME. 2017. "Performances Réelles Des bâTiments – Retours d'expériences / Ville & Aménagement Durable, L'EUROPE S'ENGAGE En Rhone-Alpes."
- 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>.
- Choi, Wonjun, Hideki Kikumoto, Ruchi Choudhary, and Ryoza Ooka. 2018. "Bayesian Inference for Thermal Response Test Parameter Estimation and Uncertainty Assessment." *Applied Energy* 209 (January): 306–21. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.10.034>.
- Datcu, Stefan, Laurent Ibos, Yves Candau, and Simone Mattei. 2005. "Improvement of Building Wall Surface Temperature Measurements by Infrared Thermography." *Infrared Physics & Technology* 46 (6): 451–67. <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2005.01.001>.
- ISO 9869-1. 2014. "Isolation Thermique -- Éléments de Construction -- Mesurage in Situ de La Résistance Thermique et Du Coefficient de Transmission Thermique -- Partie 1 : Méthode Du Fluxmètre."
- Monchau, Jean-Pierre, Laurent Ibos, and V. Feuillet. 2014. "Diagnosis of Insulated Building Walls Using Passive Infrared Thermography and Numerical Simulation." In . Nantes.
- Pajani, Dominique. 2010. *La Thermographie Du bâTiment, Principe et Applications Du Diagnostic Thermographique*.
- "Réglementation Thermique 2005."

Simulation spatiale du confort thermo-aéraulique

Alexis Sauvageon¹, Mateusz Bogdan^{*1}

¹ AREP

16 av. d'Ivry, 75013 Paris, FRANCE

*mateusz.bogdan@arep.fr

RESUME. Faisant suite à de précédents travaux sur le confort thermique et sa caractérisation dans les espaces extérieurs et semi-ouverts via la SET*, ce travail se concentre sur une des composantes du ressenti de confort : le vent. Lors de la prise en compte de ce dernier de manière fine dans la cartographie du confort, se pose la question de l'utilisation d'une base réduite de direction de vents afin de ne pas réaliser un trop grand nombre de calculs. Les traitements statistiques associés à la SET* étant similaires à ceux du confort au vent, nous explicitons dans la suite la seconde méthode (moins couteux en simulations) et étudions les limites de la base réduite de directions considérée.

MOTS-CLÉS. Confort, SET*, CFD

ABSTRACT. Following previous research on climatic comfort and its characterization in (semi-) outdoor environments via the SET*, this paper focuses on one of its components : the wind. When mapping the outside comfort, air speed data (from CFD simulations) must be incorporated with a very fine resolution, and thus arise the question of the reduce base one can use in order not to simulate every single wind incidence and speed. Since the statistical analysis on both thermal and wind comfort are similar, we focus on the latter (lower simulations time), and try to reduce the number of CFD simulations required with a controlled level of error.

KEYWORDS. Comfort, SET*, CFD

1 INTRODUCTION

La littérature fournit de nombreux indicateurs de confort dédiés aux espaces intérieurs Fanger et al., 1970. Toutefois, ces modèles ne tiennent pas compte des spécificités des espaces ouverts ou semi-ouverts. En effet, pour de tels espaces, il est nécessaire de prendre en compte les variations des vitesses d'air et de températures qui peuvent être rapides ou encore le taux d'occupation de l'espace, variable au cours du temps. Ces indicateurs classiques ne sont donc pas adaptés pour évaluer la sensation de confort des individus circulant dans des zones ouvertes.

Les auteurs de (Fanger et al., 1970) proposent un indicateur de type PMV/OUT_SET* (*Standard Effective Temperature*), dérivé du modèle original de Nishi et Gagge (1977) enrichi pour l'extérieur par Pickup et al. (2000), permettant de tenir compte plus finement des variations climatiques, spatiales et temporelles.

Outre l'amélioration de la prise en compte des flux solaire perçu par un individu et sa ré-

partition spatiale (Walther et Hamdani, 2018), ce modèle introduit également un correctif des résistances aux transferts de masse et chaleur provenant des effets de la vitesse d'air. En effet, la vitesse de l'air modifie les échanges de chaleur convectifs et augmente l'évaporation à la surface de la peau (Walther et Barry, 2016). Ainsi, les mouvements d'air tendront à diminuer la température du corps, ce qui peut s'avérer intéressant en été, mais gênant en hiver.

Afin d'aboutir à un indicateur de confort spatialisé adapté aux espaces ouverts et semi-ouverts représentatif d'une période donnée (annuelle, mensuelle), il est tentant de s'appuyer sur une approche statistique similaire à celle employée dans la cadre du confort aéraulique. Il apparait alors nécessaire de coupler plusieurs outils de simulation numériques, thermiques et aéraulique. Les différents paramètres nécessaires aux indicateurs de confort sus-cités sont déterminés heure par heure (résolution des fichiers météorologiques - on considère qu'à cette résolution les conditions varient peu) sur une année type complète. Par la suite, des statistiques sont effectuées pour se concentrer sur une période d'intérêt.

La fiabilité de l'indice de confort calculé est alors intrinsèquement liée à la qualité de la connaissance des champs de vitesses. L'approche du confort au vent propose, à travers un traitement statistique des données météorologiques, de réduire le nombre de calculs à certaines directions particulières de la rose des vents.

Ce travail présente, à travers l'exemple concret du parvis de la gare d'Avignon, l'influence qu'aura le choix du nombre de directions de vents incidents sur l'indice de confort au vent.

Nous présenterons dans un premier temps quelques éléments théoriques du confort au vent. Cette méthodologie sera appliquée au cas d'Avignon. Enfin, une étude de sensibilité mettra en évidence les écarts liés au choix de la rose des vents considérée pour les simulations numériques.

2 MÉTHODOLOGIE DU CONFORT AU VENT

La sensation de confort au vent d'individus présent dans un environnement ouvert est une notion difficile à définir qui reste peu étudiée. Afin de l'appréhender, différentes méthodes ont été mises au point par la communauté scientifique. Nous présenterons dans la suite quelques éléments de la méthodologie de référence en France (Delpech, 2005).

La détermination d'un indice de confort au vent s'appuie sur les variations des vitesses locales des vents en présence du bâti et sur les niveaux de turbulences. Les simulations numériques permettent de quantifier l'impact des éléments bâtis pour chaque direction de vent incident considérée. Elles mettent ainsi en évidence les zones protégées, ou au contraire soumises à des accélérations des flux d'air.

Par ailleurs, afin de prendre en compte l'ensemble des directions de vent ainsi que les différentes vitesses, la notion de confort au vent incorpore de façon statistique la météorologie complète de l'année. L'indicateur s'exprime alors comme une fréquence globale d'inconfort, exprimée en pourcentage du temps annuel, durant laquelle l'utilisateur ressentira de l'inconfort vis-à-vis du vent.

2.1 CARACTÉRISTIQUES DU VENT TURBULENT

Le vent est un phénomène turbulent. Ainsi, la vitesse de ce dernier en un point de l'espace varie : on observe une valeur moyenne de vitesse \bar{u} , et une fluctuation aléatoire u' autour de cette valeur (turbulence).

$$u = \bar{u} + u' \quad (1)$$

On caractérise la turbulence par son intensité :

$$I = \frac{\sigma_u}{\bar{u}} \quad (2)$$

Où σ_u correspond à la valeur de l'écart type de la fluctuation : $\sigma = \sqrt{u'^2}$. L'intensité de turbulence est généralement prise égale à 20% pour considéré un majorant (Basse, 2017).

2.2 GROUPEMENT DE NUISANCES

Le groupement de nuisance (noté Ψ dans la suite) est la grandeur qui permettra de quantifier l'influence de l'environnement sur les flux d'air. Ce groupement de nuisances correspond aux vitesses de vents dans la configuration du site étudié, rapportées à une vitesse de référence qui serait obtenue en l'absence de toute construction. Ψ est donc une quantité sans dimension, qui caractérise les effets de masque ou d'engouffrement d'une configuration urbaine.

$$\Psi = \frac{\bar{u} + \sigma_u}{(\bar{u} + \sigma_u)_{\text{ref}}} = \frac{\bar{u}}{\bar{u}_{\text{ref}}} \frac{(1 + I)}{(1 + I_{\text{ref}})} \quad (3)$$

Si la présence de la construction accélère les vitesses d'air, le groupement de nuisance Ψ sera supérieur à 1, et inversement si le bâti protège du vent, ce paramètre sera inférieur à 1.

2.3 SEUIL DE GÊNE

Le seuil de gêne correspond, pour une altitude donnée à la vitesse limite au delà de laquelle un individu ressent une sensation d'inconfort. Cette vitesse est choisie lors d'études en fonction des attentes d'un projet et du type d'espaces. Il est usuel de prendre un seuil à $\bar{u} = 3$ m/s pour les espaces extérieurs telles que des terrasses de cafés (limite entre les vents de force 2 et 3 sur l'échelle de *Beaufort*). Cette vitesse dépend des effets de site et donc du groupement de nuisance Ψ .

Pour la calculer, il est nécessaire, dans un premier temps, de relier la vitesse du vent de la station météorologique à celle à une hauteur d'intérêt pour tenir compte des effets de l'altitude. Ainsi, dans chaque direction de référence, le profil de vitesse d'entrée est fonction de la hauteur et de la rugosité du terrain en amont. Pour une vitesse de référence donnée, la vitesse moyenne du vent à une hauteur z s'exprime par la relation suivante :

$$\bar{u}(z) = c_r(z) \cdot \bar{u}_{\text{ref}} \quad (4)$$

où c_r , le coefficient de rugosité du terrain qui permet de prendre en compte la variabilité de la vitesse sur le terrain considéré :

$$c_r(z) = \begin{cases} k_r \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) & \text{pour } z > z_{\text{min}} \\ c_r(z_{\text{min}}) & \text{pour } z < z_{\text{min}} \end{cases} \quad (5)$$

où z_0 et z_{min} sont respectivement une hauteur de rugosité et une hauteur caractéristique dépendant du terrain. Enfin, le coefficient de rugosité k_r est donné dans En (1991) et dépend de la catégorie du terrain.

La combinaison des expressions (3) et (5) couplée au choix d'une vitesse seuil pour la gêne, permet d'écrire :

$$\bar{U}(z) > \bar{U}_{10\text{m}}^* = \frac{3,6}{\Psi \cdot c_r(z)} \quad (6)$$

2.4 PROBABILITÉ DE DÉPASSEMENT DU SEUIL DE GÊNE

La répartition de vitesses dans chacune des 12 directions considérées est ensuite décrite par une densité de probabilité de type *Weibull*, de paramètres k et λ :

$$f(\bar{u}, k, \lambda) = \frac{k}{\lambda} \left(\frac{\bar{u}}{\lambda}\right)^{(k-1)} \exp\left[-\left(\frac{\bar{u}}{\lambda}\right)^k\right] \quad (7)$$

On définit alors $P_{D,\theta}(\bar{U} > \bar{U}_{10m}^*)$ la probabilité que la vitesse dans une direction θ soit supérieure au seuil de gêne \bar{U}_{10m}^* par :

$$P_{D,\theta}(\bar{U} > \bar{U}_{10m}^*) = \exp \left[- \left(\frac{3.6}{\Psi_{c_r}(z) \lambda} \right)^k \right] \quad (8)$$

L'indicateur de confort au vent correspond finalement à la prise en compte pour l'ensemble des directions de vent considérées du dépassement de seuil de gêne. Cette probabilité de dépassement du seuil de gêne est donc défini par P_D :

$$P_D(\bar{U} > \bar{U}_{10m}^*) = \sum_{\theta} f_{\theta} P_{D,\theta}(\bar{U} > \bar{U}_{10m}^*) \quad (9)$$

Nous allons par la suite appliquer cette méthodologie au parvis de la gare d'Avignon.

3 EXEMPLE D'APPLICATION À LA GARE D'AVIGNON

Les simulations numériques sont réalisées à l'aide du logiciel OpenFOAM.

3.1 CONFIGURATION DU SITE ET DONNÉES MÉTÉOROLOGIQUES

La gare centrale d'Avignon dessert le centre historique de la ville éponyme du Vaucluse, dans la région Provence-Alpes-Côte d'Azur. La gare se situe à environ 6 kilomètres vers le sud de la ville.



FIGURE 1. Situation géographique de la ville d'Avignon (a) et de la gare centrale (b)
De part sa situation géographique, Avignon présente un climat méditerranéen. En hiver, la cité est connue pour être parcourue par des vents froids, dont le plus fort est le Mistral, provenant du nord. La fréquence d'occurrence des directions peut être synthétisée dans une rose des vents. Ici, on considère, la rose des vents est d'Avignon est discrétisée en 12 directions (FIGURE 2).

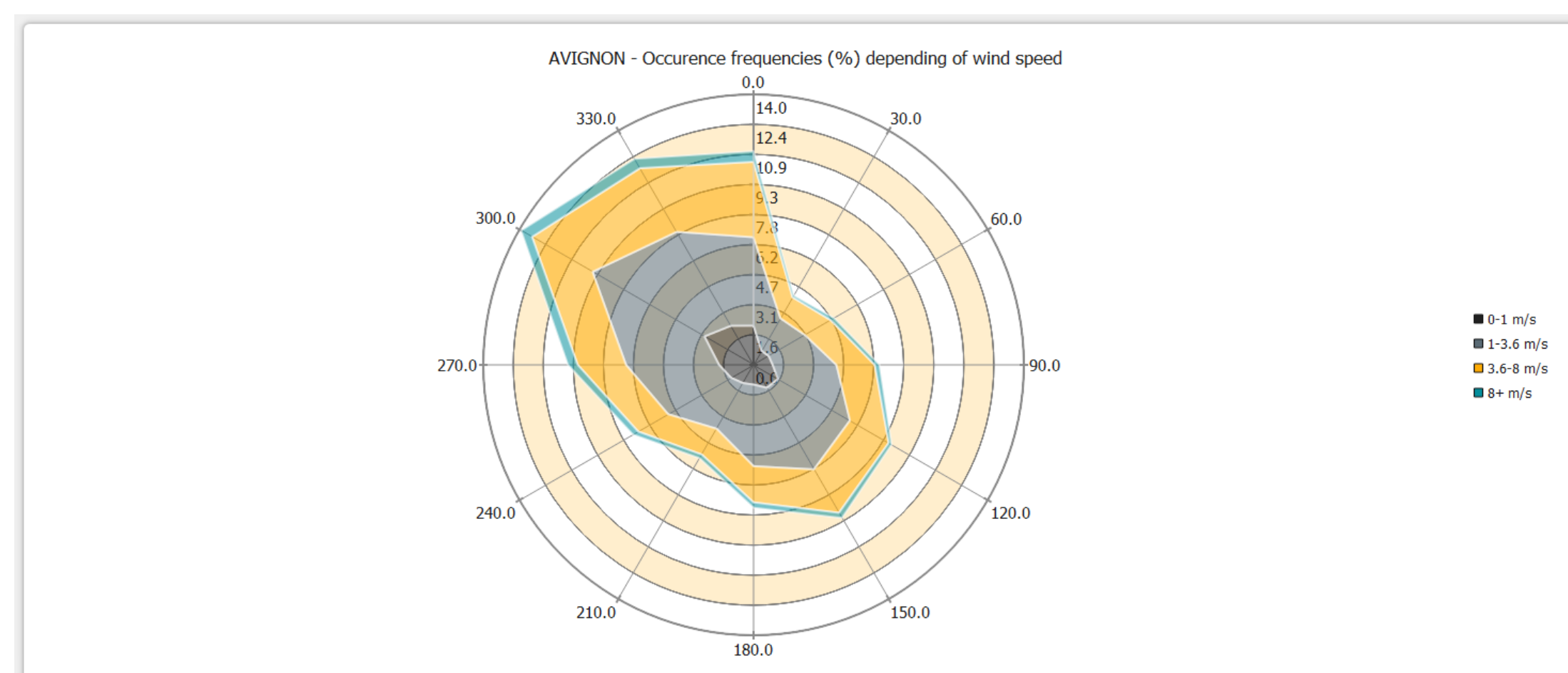


FIGURE 2. Rose des vents - Avignon - 12 directions caractéristiques

3.2 HYPOTHÈSES DE MODÉLISATION

La répartition des vitesses et l'écoulement de l'air, représentatif du vent moyen autour du bâti, est analysé par simulation numérique de type CFD. On résout de façon itérative les équations de Navier-Stokes à l'aide du code de calcul OpenFOAM (version 3.1). Les paramètres de résolution principaux sont détaillés ci-après :

- L'air est considéré comme un fluide incompressible, à 25°.
- Les effets du tirage thermique ne sont pas pris en compte,
- Résolution en régime permanent (approche stationnaire),
- Modèle de turbulence RNGk-Epsilon ,
- Solveur SIMPLE (Semi-IMPlicit Pressure-Linked Equations) ,

Les conditions aux limites imposées sont classiques, avec au bornes du domaine de calcul :

- Conditions de type « Inlet » (ENTREE) dans la direction incidente, avec un profil de vent logarithmique représentatif de la couche limite atmosphérique (*Atmospheric Boundary Layer*, avec les coefficients et longueurs de rugosité issus des Eurocode) ,
- Conditions de type « Outlet » (SORTIE) en aval du bâtiment d'intérêt,
- Conditions de type « Slip » (GLISSEMENT) sur les faces supérieures et latérales (permet de garantir la tangence du champs des vitesses),
- Condition de type « Wall » (PAROI) sur les différents éléments de bâti et sur le sol. Le sol est traité à l'aide d'une *Atmospheric Wall Function* et les parois sont traitées avec des conditions limites qui détermine le y^+ en fonction de critères fondées sur la viscosité cinématique turbulente.

3.3 VITESSES D'AIR ET CARTE DE CONFORT

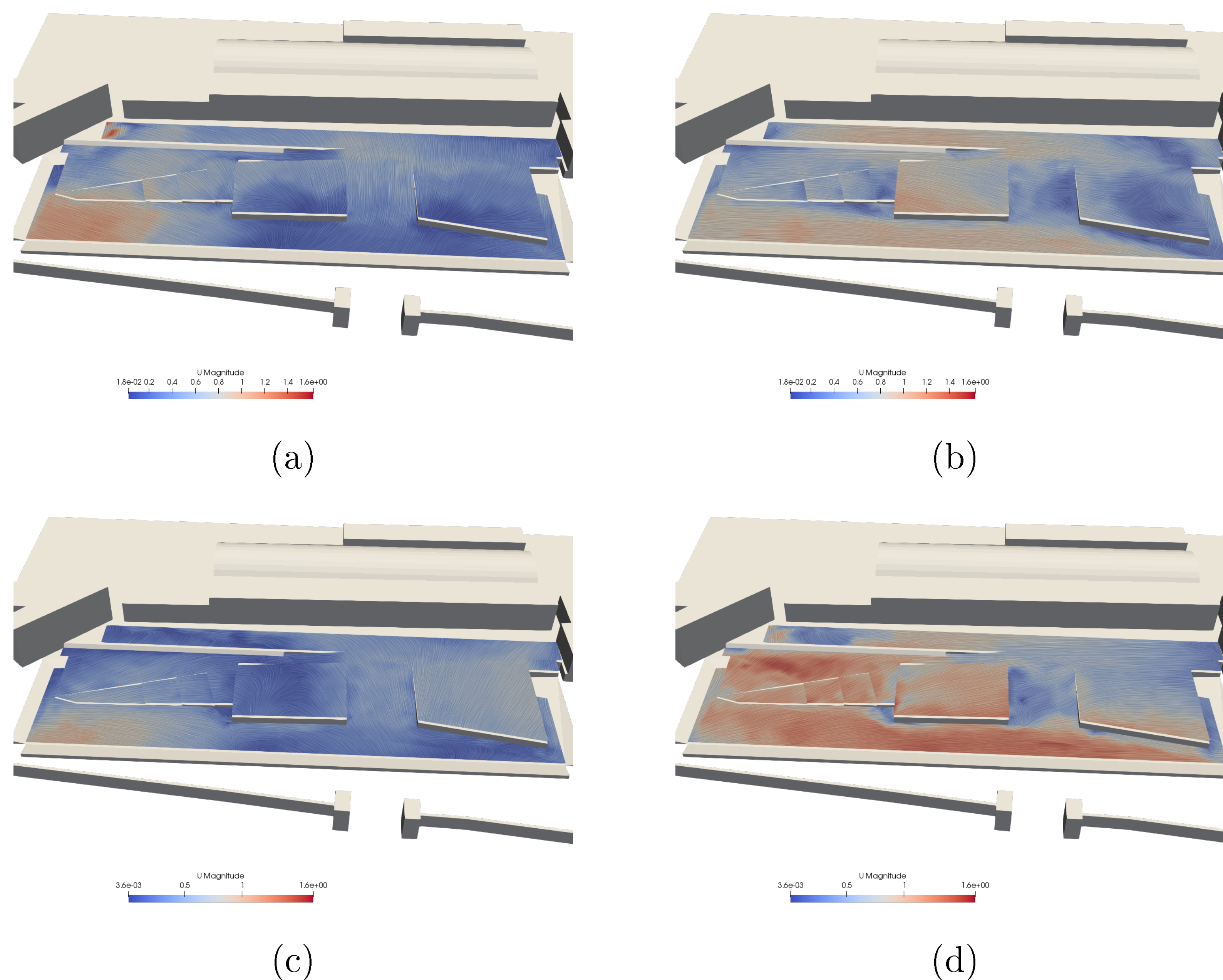


FIGURE 3. Champ des vitesse pour des vents originaire : du Nord (a), du Sud-Est (b), du Sud-Ouest (c) et du Nord-Ouest (d)

Les cartes de vitesses obtenues sur le parvis de la gare d'Avignon pour des vents trouvant leur origines aux quatre directions les plus fréquentes du Nord, du Sud-Est, du Sud-Ouest et du

Nord-Ouest sont données dans les FIGURE 3(a) à FIGURE 3(d).

Dans chaque cas, la vitesse sur le parvis est inférieure (1.6m/s maximum) à la vitesse du vent incident (2m/s). Le parvis est en effet bien protégé par un environnement urbain dense (FIGURE 1). Ce résultat se retrouve sur l'indicateur de confort qui reste très bas (FIGURE 4).

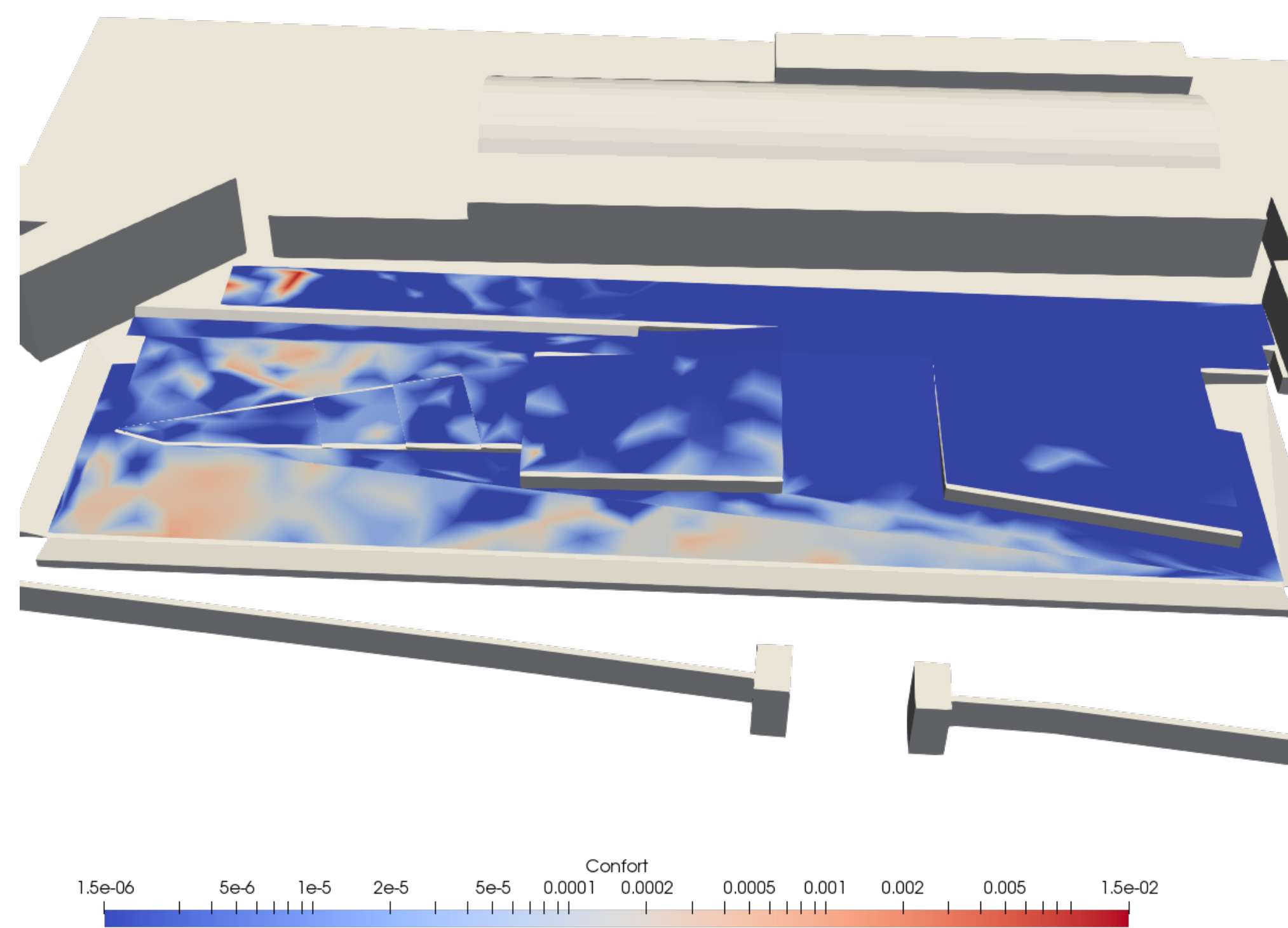


FIGURE 4. Carte de confort - 12 directions caractéristiques

4 INFLUENCE DE LA ROSE DES VENTS SUR L'INDICATEUR DE CONFORT

Dans la suite, nous nous intéressons à l'influence de la rose des vents choisie pour les simulations numériques sur la carte de confort. Nous retenons pour cela cinq roses des vents différentes obtenues pour 6 directions principales, 9, 12, 18 et 36 directions principales. La FIGURE 5 décrit les nouvelles roses des vents introduites en plus du cas testé précédemment (FIGURE 2)

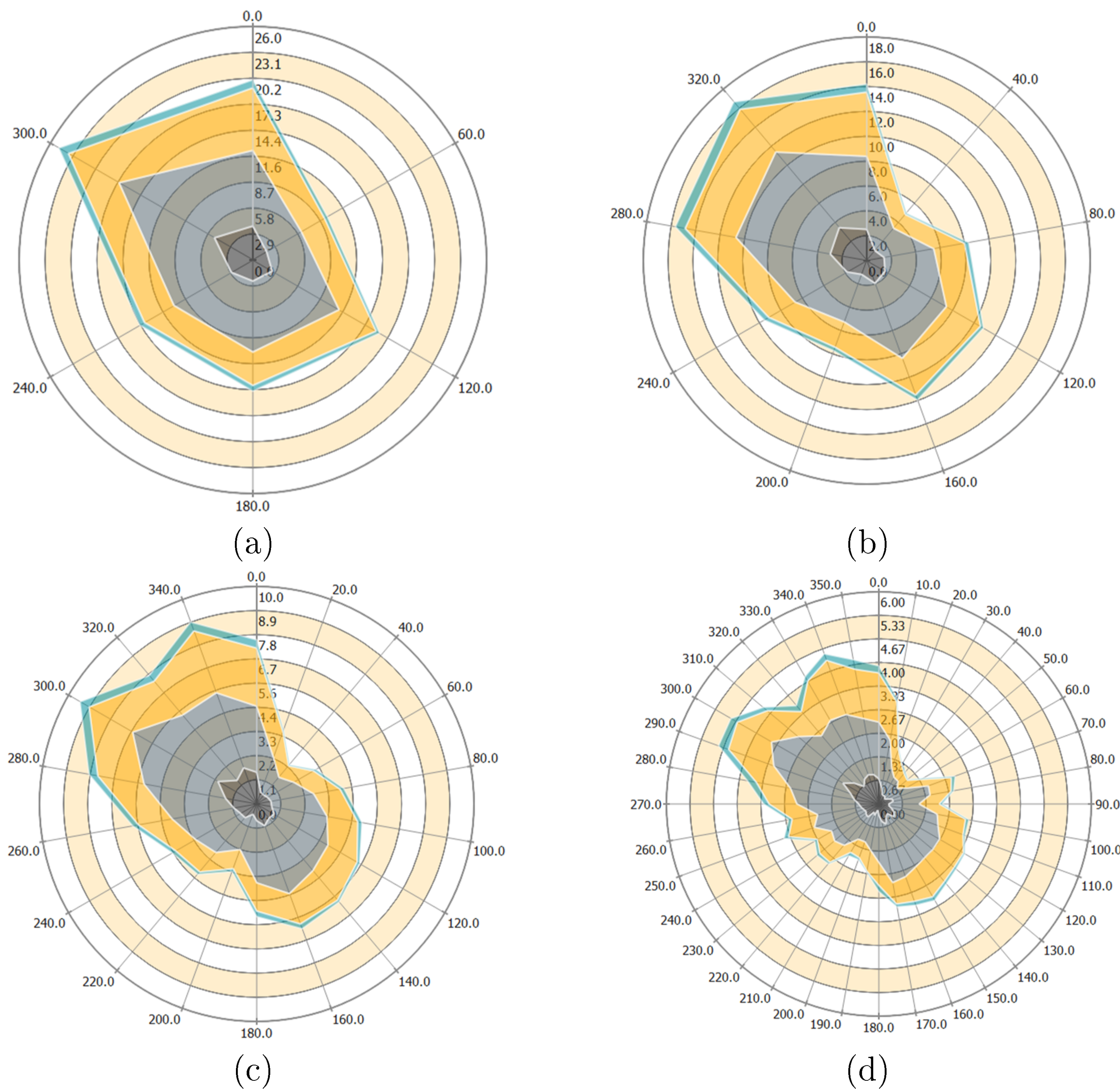


FIGURE 5. Roses des vents - Avignon - Directions : 6 (a), 9 (b), 18 (c) et 36 (d)

On observe dans les FIGURE 5 et FIGURE 2 que l'apparence de la rose des vents fortement 6 et 9 directions, 9 et 12 directions, 12 et 18 directions. Les roses des vents obtenues pour 18 et 36 directions présentent des formes moins différentes.

Pour chacune de ces roses des vents, les répartition des vitesses dans chacune des directions considérées sont décrites par des lois de Weibull identifiées par une méthode de Levenberg King (2009) sur la base des relevés météorologiques. A partir de ces informations et de la méthode présentée dans la partie 2, il est possible d'obtenir les cartes de confort associées à chaque rose des vents.

En prenant comme référence, la rose des vents la plus précise (36 directions), il est possible de dresser des cartes d'erreurs absolue (ΔE) et relative (δE) :

$$\begin{aligned} \Delta E_i(x, y, z) &= \|P_D(\bar{U} > \bar{U}_{10m}^*)_i - P_D(\bar{U} > \bar{U}_{10m}^*)_{36}\| \\ \delta E_i(x, y, z) &= \left\| 1 - \frac{P_D(\bar{U} > \bar{U}_{10m}^*)_i}{P_D(\bar{U} > \bar{U}_{10m}^*)_{36}} \right\| \end{aligned} \quad (10)$$

Où i est le nombre de directions de la rose des vents actuellement considérée.

Les champs d'erreurs absolues et relatives sont données pour les deux cas de rose des vents : 6 ou 18 directions dans la figure suivante.

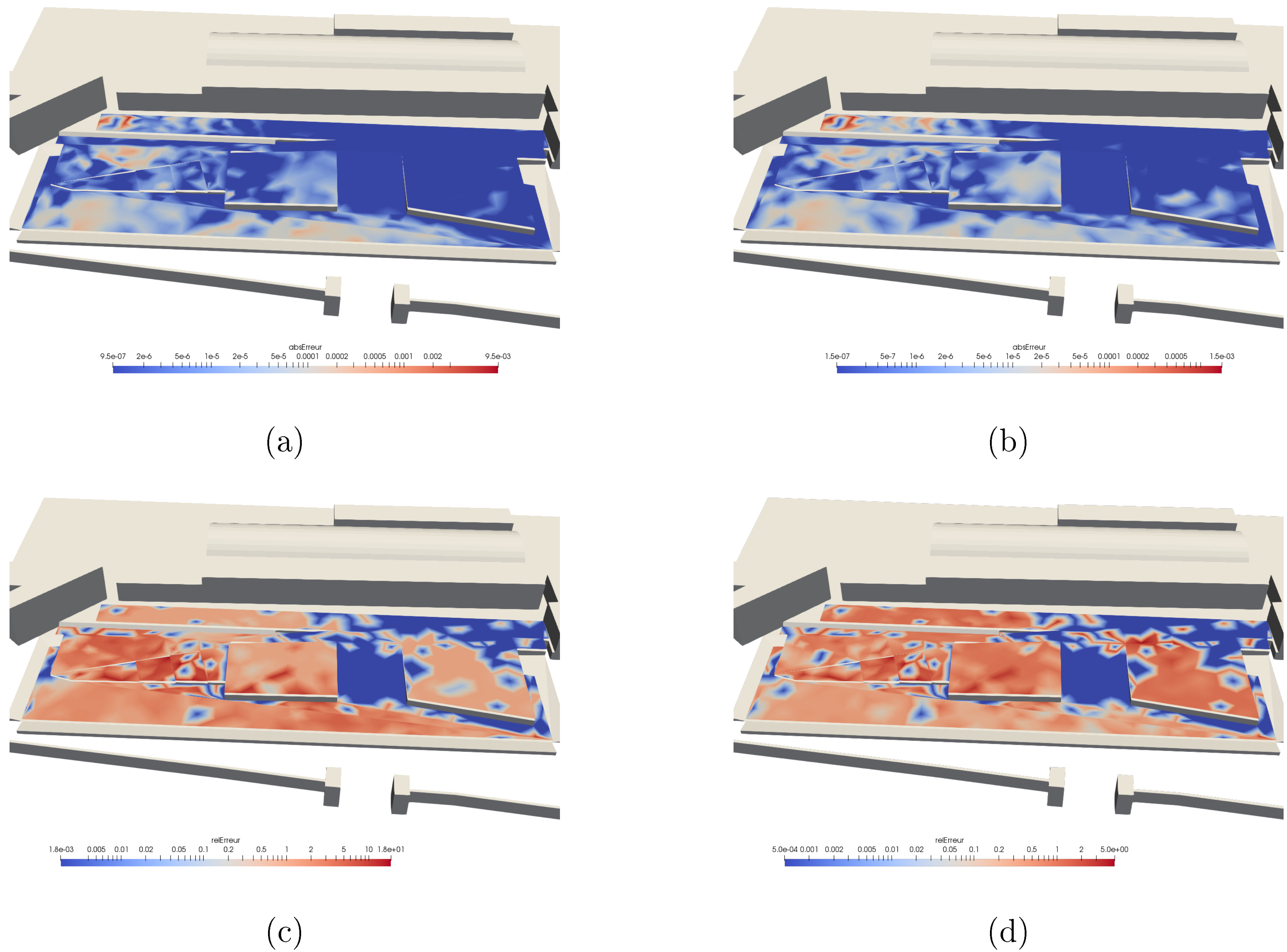
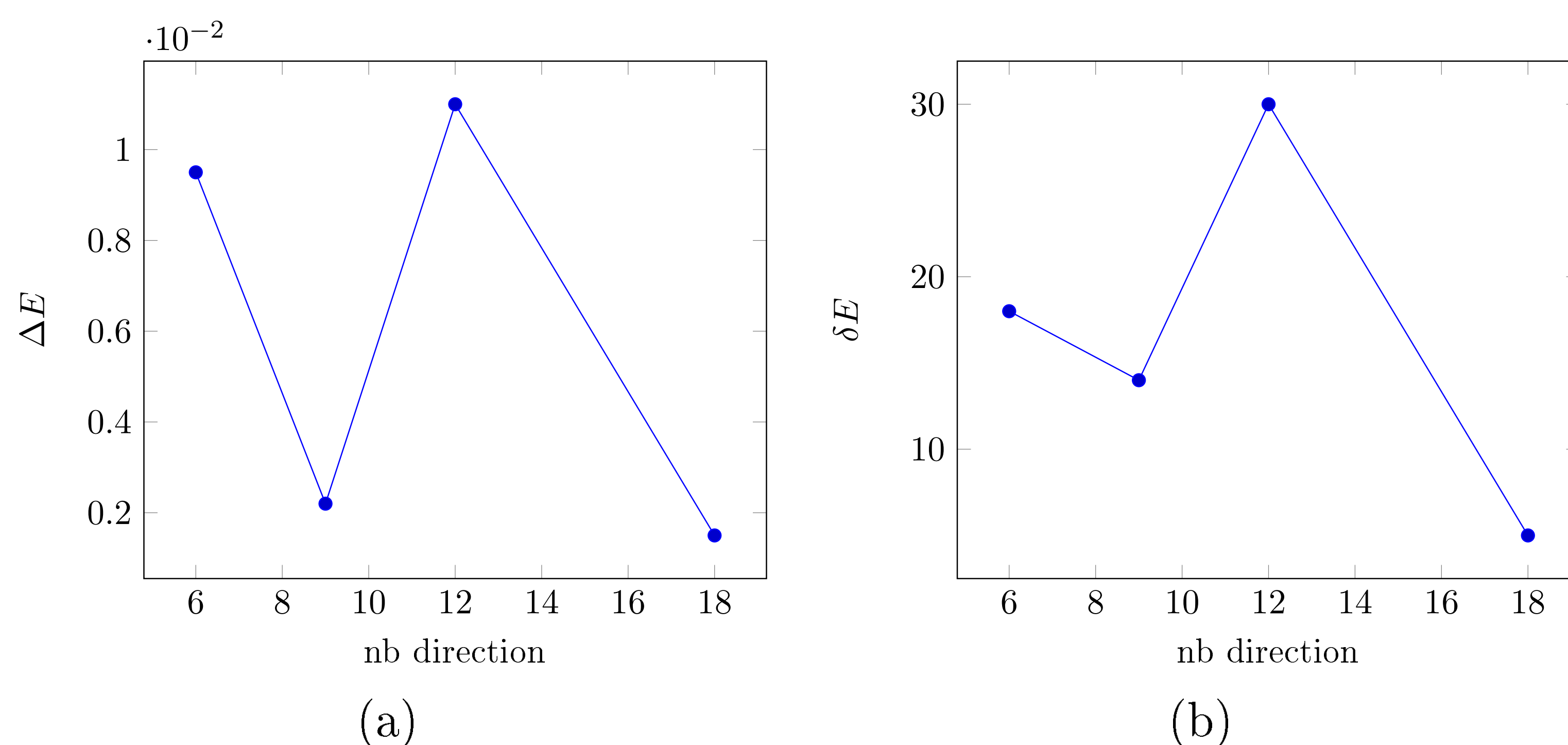
FIGURE 6. Erreurs absolues : ΔE_6 (a), ΔE_{18} (b) et relatives : δE_6 (a), δE_{18} (b)

FIGURE 7. Erreurs absolues (a) et relatives (b) en fonction de la rose des vents

Il est intéressant de constater que dans tous les cas, les champs d'erreurs absolus (sous-figures a et b de FIGURE 6) sont sensiblement similaires au champ de l'indicateur de confort (FIGURE 5). Les champs d'erreurs relatives paraissent plus étendus et cette dernière semble assez haute. Ce constat doit être tempéré au vu des très faibles écarts relevés sur l'erreur absolue.

Enfin, les graphes présentés dans la FIGURE 7 témoignent d'un même comportement des erreurs absolues et relatives avec la discrétisation de la rose des vents. Ainsi, le passage de 6 à 9 et de 12 à 18 directions s'accompagnent d'une diminution des erreurs. Au contraire, les erreurs augmentent lors du passage de 9 à 12 directions. Cette augmentation pourrait s'expliquer par le changement important dans la forme de la rose des vents observée précédemment et les très faibles valeurs de l'indicateur de confort qui impliquent que de petites variations de l'indicateur vont entraîner de grandes variations des erreurs.

5 CONCLUSION

Dans cet article, nous nous sommes intéressés à la problématique du confort aéraulique dans l'objectif de coupler la simulation aéraulique avec des indicateurs de confort de type PMV/OUT_SET*. Dans un premier temps, nous avons présenté une méthodologie permettant à l'aide d'un traitement statistique de définir un indicateur de confort au vent. Cet indicateur a été exploité pour le parvis de la gare d'Avignon qui dans cette modélisation est particulièrement protégé du vent par l'environnement urbain.

Peu de recommandations précisent le nombre de direction à considérer dans le choix de la rose des vents. Nous avons donc étudié les écarts sur l'indicateur de confort pour le cas d'Avignon pour différents scénarios de rose des vents. L'étude a montré qu'une discrétisation plus fine de la rose des vents se traduisaient par une modification de l'intensité de l'indicateur de confort mais une conservation de sa répartition spatiale. Dans le cas testé, les faibles valeurs de l'indicateur de confort rendent les erreurs étudiées très sensibles aux petites variations. Néanmoins, on a pu remarquer que ces erreurs étaient corrélées à la forme de la rose des vents qui se précise avec sa discrétisation.

L'optimum entre le nombre de directions considérées et la qualité des cartes de confort n'a donc pas été identifiée. Nous pensons aussi que le critère d'erreur utilisé n'est pas complètement adaptée à des géométries aussi complexes que celle présentée.

Des efforts supplémentaires doivent toutefois être fournis pour dégager une tendance plus claire et parvenir à des recommandations claires. Traiter un cas plus exposé au vent et aller au-delà de 36 directions pourraient apporter les informations manquantes.

RÉFÉRENCES

- Basse, N. T. (2017). Turbulence intensity and the friction factor for smooth-and rough-wall pipe flow. *Fluids*, 2(2) :30.
- Delpech, P. (2005). Pedestrian wind comfort assessment criteria : a comparative study. In *Proc. 4th European & African Conference on Wind Engineering, Prague, 2005*.
- En, B. (1991). 1-4 : 2005 eurocode 1 : Actions on structures—general actions—wind actions.
- Fanger, P. O. et al. (1970). Thermal comfort. analysis and applications in environmental engineering. *Thermal comfort. Analysis and applications in environmental engineering*.
- King, D. E. (2009). Dlib-ml : A machine learning toolkit. *Journal of Machine Learning Research*, 10 :1755–1758.
- Nishi, Y. et Gagge, A. (1977). Effective temperature scale useful for hypo-and hyperbaric environments. *Aviation, space, and environmental medicine*, 48(2) :97–107.
- 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.
- Walther, É. et Barry, R. (2016). Réduction des incertitudes de modélisation de ventilation naturelle et prédiction du confort en espace semi-ouvert. In *Conférence IBPSA France*.
- Walther, É. et Hamdani, E. M. (2018). Calcul trigonométrique du flux solaire reçu par un individu. In *Conférence IBPSA France*.

Evaluation du confort microclimatique Apports de la modélisation des radiations solaires

Assia Talhi*¹², Aline BARLET², Boudjemâa AICHOURL¹

¹*L'AUTRe, université de Batna 1, Algérie*
Rue des Frères Boukhlouf, 05000, Batna, Algérie

²*GRECCAU (EA MCC 7482) ENSAPBx, Bordeaux, France*
740 Cours de la Libération - CS70109, 33405 Talence

* assia.talhi@bordeaux.archi.fr

RESUME. Les études des ambiances urbaines thermiques en Algérie demeurent très rares, et les outils permettant d'évaluer le confort microclimatique s'avèrent compliqués et loin d'être à la portée des concepteurs de la ville. Afin d'affiner notre méthodologie globale qui conjugue trois approches complémentaires : (1) la simulation numérique (2) l'approche subjective par questionnaire et (3) l'évaluation objective basée sur un protocole de mesures. Nous avons mené une recherche sur les outils de simulation numérique existants. Le présent travail propose dans une première partie une synthèse rapide sur les concepts définis dans cette étude. Dans la deuxième partie nous présentons un modèle d'analyse des radiations solaires, il s'agit de Solar Analysis intégré dans Autodesk Insight 360®. La connaissance de cet outil nous permettra de comparer les différentes typologies urbaines développées dans la Casbah d'Alger au fil du temps. Dans cet article nous nous concentrons sur les étapes de manipulation de cet outil pour réussir à simuler l'ensoleillement dans les espaces extérieurs de notre cas d'étude.

MOTS-CLÉS: formes urbaines, simulation numérique, confort thermique extérieur.

ABSTRACT. The study of urban thermal ambiances on Algeria remains very rare, the existing tools that lead to evaluate the comfort of the microclimatic are complicated and far from being within the reach of the designers. In order to outline our general methodology, which combines three complementary approaches: (1) digital simulation, (2) the subjective questionnaire approach, and (3) objective evaluation based on a measurement protocol. We did a research on the existing numerical simulation tools. In the first part of the present work, we propose a fast synthesis of the concepts defined in this study. In the second part, a model of solar radiation analysis has been presented; Solar Analysis Plugin integrated into Autodesk Insight 360®. Using this tool will enable us to compare the different urban typologies developed in the Kasbah of Algiers over time. This paper focuses on the steps of manipulating this tool to successfully simulate solar radiation in outdoor spaces.

KEYWORDS: urban forms, numerical simulation, thermal outdoor comfort.

1. INTRODUCTION

La simulation numérique des ambiances architecturales et urbaines offre aujourd'hui des outils indispensables à l'évaluation des formes existantes et à la conception de nouveaux projets. Beaucoup d'outils sont apparus ces dernières années avec pour objectif d'aider les praticiens à améliorer le niveau de performance de leurs architectures. Mais cela demeure peu utilisé et à peine maîtrisé à l'échelle architecturale, et beaucoup moins connu et pratiqué à l'échelle urbaine. C'est à partir de ce constat que nous avons développé ce travail. L'idée est de choisir un outil de modélisation qui nous aidera à effectuer notre étude d'évaluation des conditions de confort microclimatique basée sur la comparaison de différentes formes urbaines. Les résultats obtenus grâce à cette simulation nous serviront de guide pour mener à bien nos études de terrain.

2. DEFINITIONS ET POSITIONNEMENT

2.1. AMBIANCES ARCHITECTURALES ET URBAINES

Avec le développement des recherches dans ce domaine, nous pouvons trouver différentes définitions de la notion d'ambiances architecturales et urbaines. L. Adolphe définit l'ambiance comme :

“... la synthèse pour un individu et à un moment donné, des perceptions multiples que lui suggère le lieu qui l'entoure”

Partant de cette définition et de l'ensemble de la littérature, nous pouvons schématiser les ambiances architecturales ou urbaines comme étant le résultat des interactions de l'utilisateur avec les éléments physiques et sociaux de l'environnement dans ses dimensions spatiales et temporelles (fig. 1).

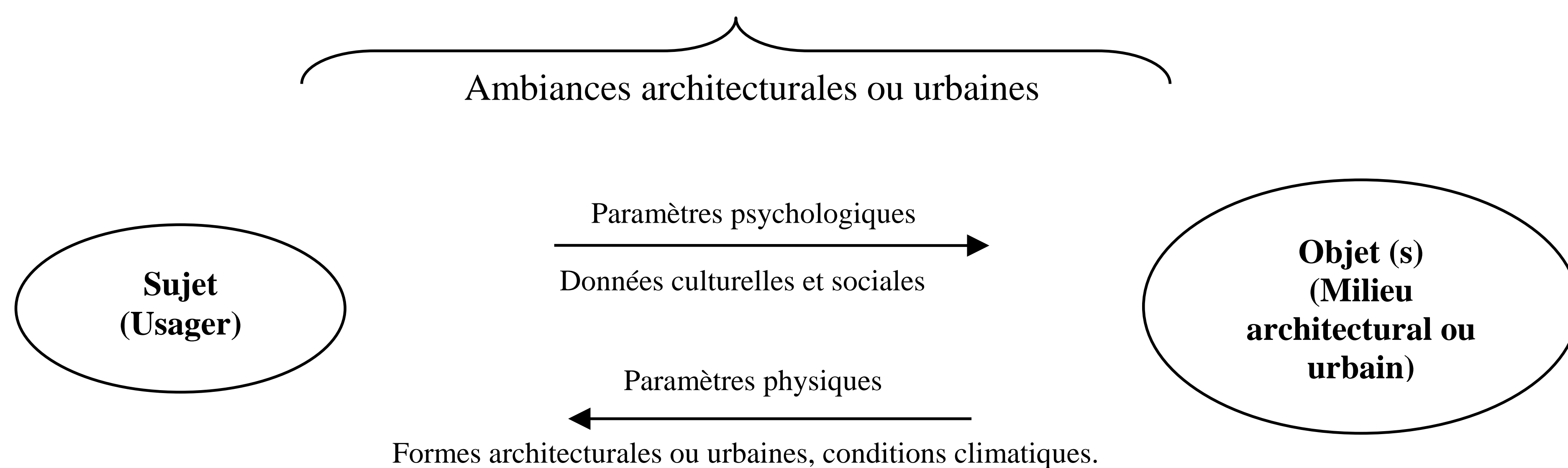


Figure 1 : Schéma synthétique de la notion des ambiances architecturales et urbaines. Source : auteur.

2.2. CONFORT THERMIQUE A L'EXTERIEUR

Au sein de la complexité des ambiances urbaines, nous nous intéressons plus particulièrement aux données microclimatiques et à leurs impacts sur le confort de l'utilisateur.

M. Nikolopoulou (2004) indique à ce sujet que « *Les paramètres influençant les conditions thermiques à l'extérieur bien que semblables à ceux rencontrés à l'intérieur, occupent une plus grande palette et sont plus variables. C'est pourquoi, du fait de cette complexité en terme de variabilité, temporelle et spatiale aussi bien que du fait du grand nombre d'activités humaines impliquées, les tentatives de compréhension du confort en conditions extérieures demeurent peu nombreuses.* »

Dans l'objectif d'évaluer le confort thermique à l'extérieur dans le cas précis de la Casbah d'Alger, des connaissances d'ordre physique (climatiques) doivent être acquises, afin de pouvoir expliquer l'état de confort ou d'inconfort des usagers. L'objectif est d'être en capacité d'améliorer la configuration des espaces et leur aménagement qui peuvent influencer sur les conditions microclimatiques. La littérature scientifique a montré que les paramètres pris en considération pour l'évaluation du confort microclimatique sont généralement les températures, les vents, l'ensoleillement et l'humidité de l'air (A. Boussoualim, 2002). J. Vinet a rajouté à ces paramètres la température de la voûte céleste et les phénomènes naturels (la pluie, la grêle, la neige...).

2.3. CONFORT D'ETE ET RAYONNEMENT SOLAIRE

Concernant le rayonnement solaire, S. Kitous (2012) relève que « *L'absorption du rayonnement solaire et l'échange du rayonnement de grande longueur d'ondes affectent fortement l'état du confort thermique du corps humain* ». En s'intéressant aux conditions du confort dans les espaces publics, nous

portons une attention particulière aux effets de l'ensoleillement sur l'utilisateur à l'échelle du quartier. Notre réflexion se concentre sur le confort d'été qui connaît aujourd'hui une altération dans la plupart des villes du monde. L'effet d'îlot de chaleur urbain y est très présent et affecte au moins le confort et au plus la santé des habitants. De ce fait, nous allons présenter une synthèse des outils de simulation développés dans l'objectif de diminuer ces effets non souhaitables.

3. OUTILS DE SIMULATION A L'ECHELLE DU QUARTIER

L'évaluation du confort microclimatique à l'échelle du quartier dépend de plusieurs facteurs comme dit précédemment. C'est pour cela que plusieurs modèles et outils de simulation existent. Principalement les outils proposent deux types de simulation : la simulation thermo-aéraulique couplé au code CFD (J, Vinet 2000) (M, Musy et all, 2017) et la simulation de l'ensoleillement à l'échelle urbaine.

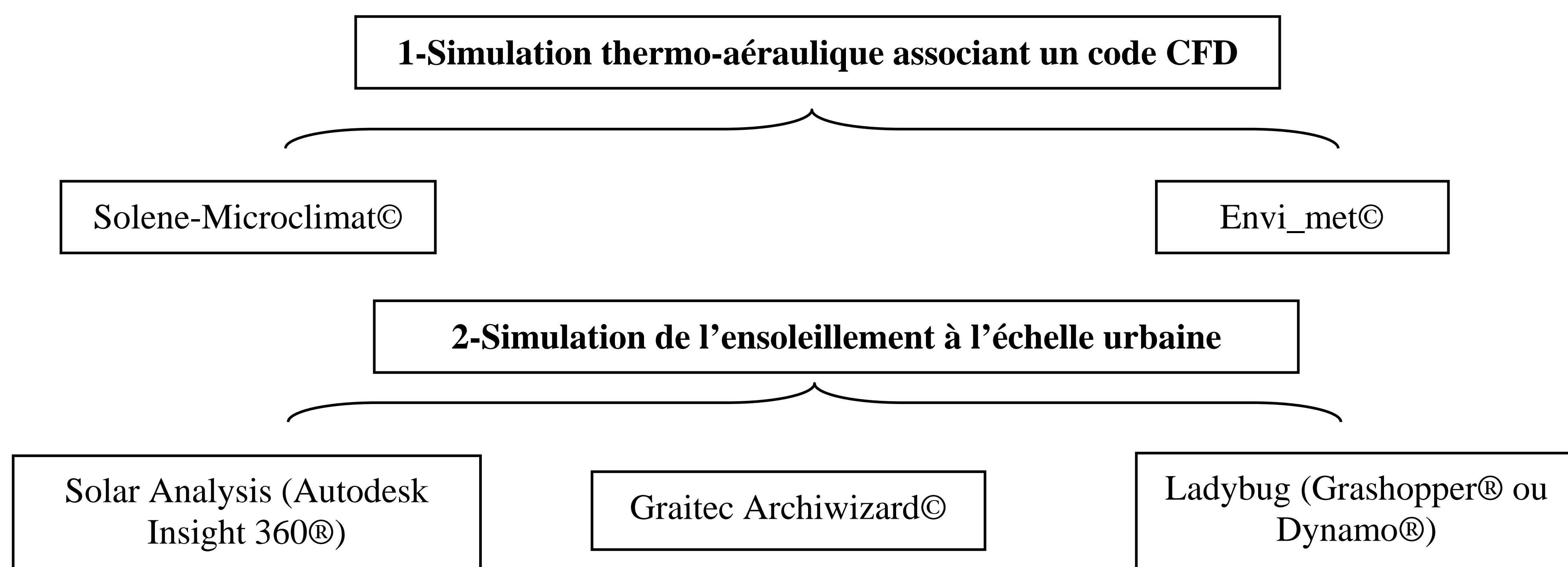


Figure 2 : Schéma récapitulatif des outils d'évaluation des conditions climatiques, énergétique et/ou du confort à l'échelle du quartier. Source : auteur.

Deux catégories d'outils utilisés pour l'évaluation et la comparaison des scénarios à l'échelle du quartier sont présentées en figure 2. La première catégorie s'intéresse à la microclimatologie urbaine en prenant en considération le confort des usagers, mais l'utilisation de ces outils demeure compliquée et nécessite des connaissances complexes. La seconde catégorie regroupe des outils aidant à l'analyse de l'ensoleillement à l'échelle du quartier d'une manière plus ou moins facile et rapide.

Cette seconde catégorie correspondant davantage à nos objectifs de recherche, nous avons choisi de réaliser une analyse de l'ensoleillement avec l'outil Solar Analysis (Autodesk Insight 360®) sur des espaces publics de la Casbah d'Alger. Nous avons choisi ce logiciel pour sa facilité de prise en main et la fiabilité de ses résultats. Il s'agit de l'une des fonctions du plugin Insight 360® qu'on peut ajouter au logiciel de modélisation Autodesk Revit®.

4. METHODOLOGIE GENERALE

L'étude est basée sur une réflexion méthodologique qui regroupe trois approches complémentaires afin d'évaluer les ambiances thermiques à l'échelle du quartier de façon globale (fig.3). L'approche objective vise à comparer les valeurs des paramètres physiques (température de l'air, température

opérative, humidité, vitesse du vent) dans les différentes configurations urbaines. L'approche subjective permet de quantifier le degré de satisfaction et les attentes des usagers dans les différents tissus urbains.

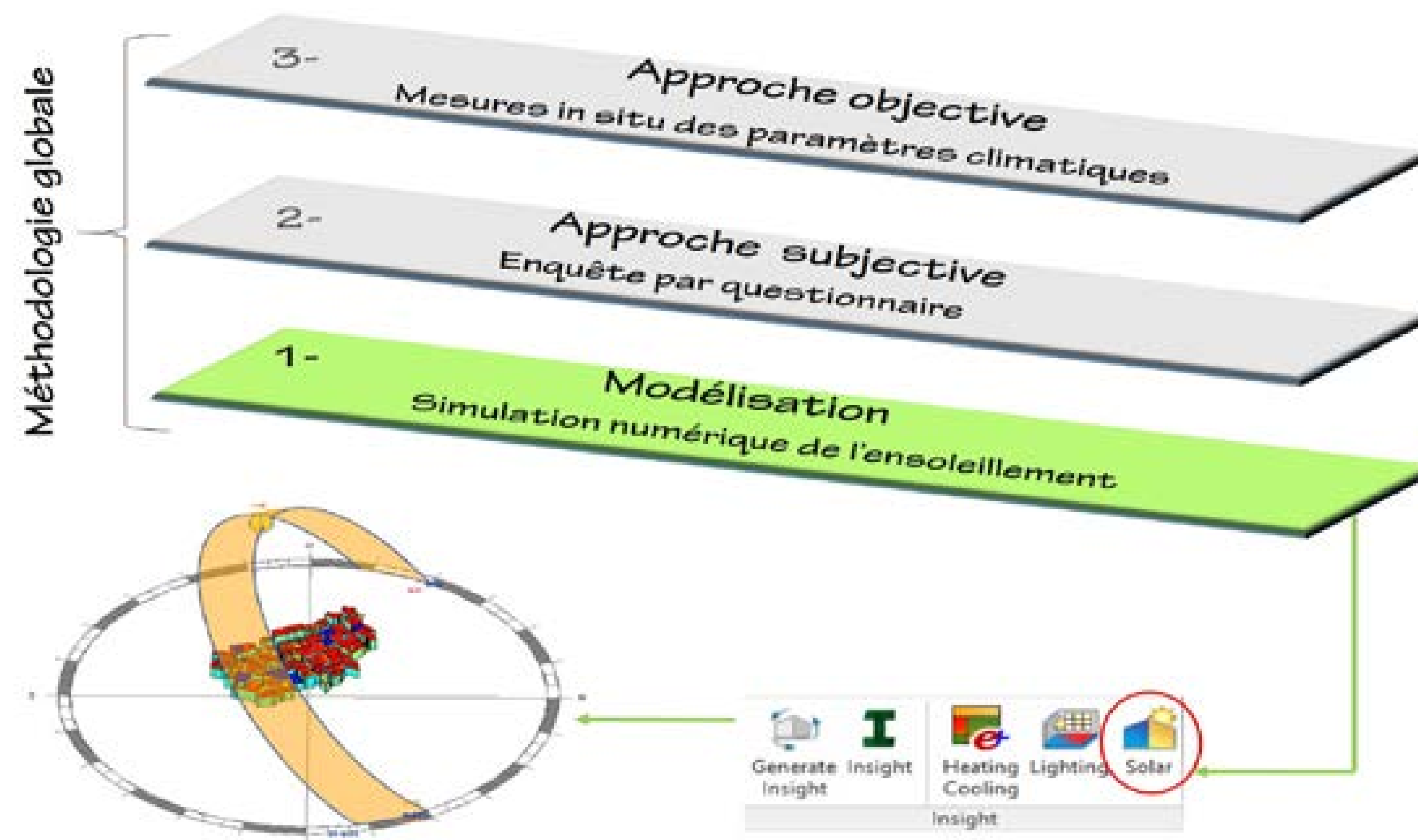


Figure 3 : Schémas méthodologique de la recherche. Source : auteur.

L'approche de modélisation, objet de ce travail, consiste à simuler l'ensoleillement dans différents tissus urbains algérois développés au fil du temps. Les résultats obtenus servent à définir les espaces plus ou moins exposés au soleil selon les formes urbaines existantes. Un travail de terrain vient compléter cette recherche afin de préciser les conditions de confort thermique selon les données culturelles du site et les apports des autres paramètres climatiques agissant sur le bilan thermique.

5. PRESENTATION DES FORMES URBAINES ETUDIEES

5.1. TYPOLOGIE ANCIENNE

Le tissu ancien de la Casbah d'Alger fondé sur un plan arborescent est caractérisé par sa densité urbaine considérable et ses rues étroites. Dans cette typologie nous trouvons différentes formes urbaines spécifiques issues du façonnement architectural de l'espace intérieur. Cela donne naissance à des espaces typiques tels que les Sabats ou chevauchement de deux bâtisses au niveau de l'étage constituant un espace couvert au niveau de la rue (fig.4).

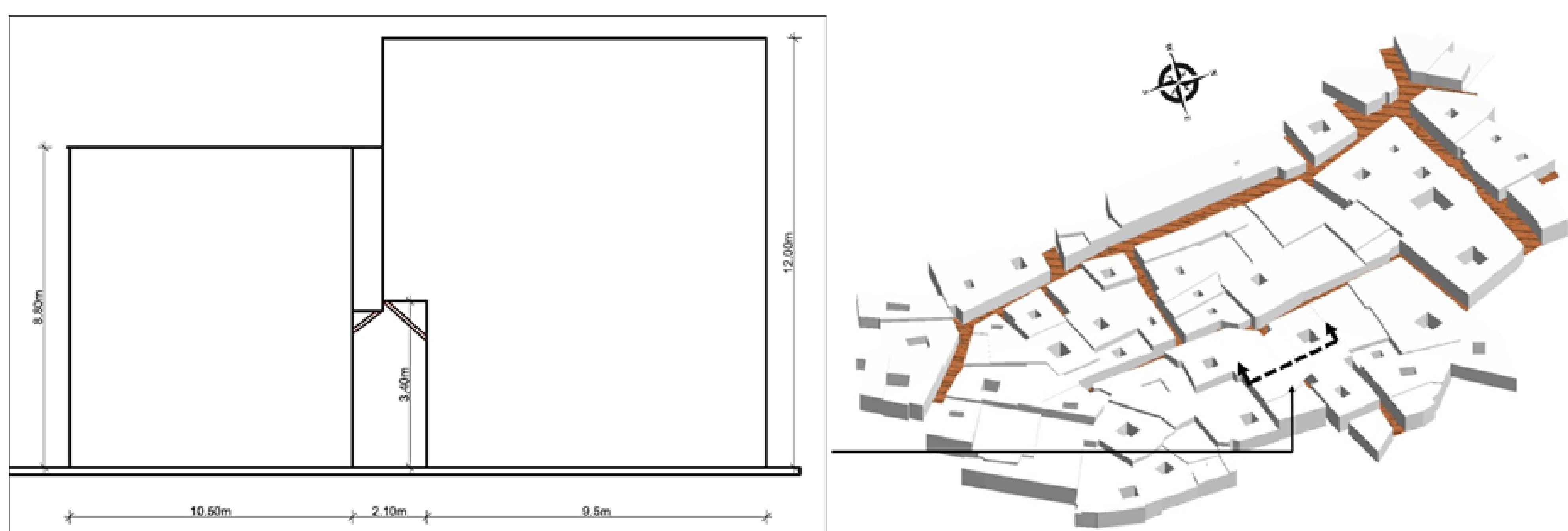


Figure 4 : Morphologie urbaine du tissu ancien d'Alger (à droite, coupe schématique d'une rue-typique). Source : auteur.

5.2. TYPOLOGIE HAUSSMANNIENNE

Le tissu haussmannien, résultat de l'intervention coloniale sur la partie basse de la casbah d'Alger apparaît sous forme d'ilots d'une géométrie régulière (fig.5). La typologie coloniale a introduit les

boulevards et l'élargissement des rues. La présence des arcades en double hauteur marque l'architecture du quartier simulé.

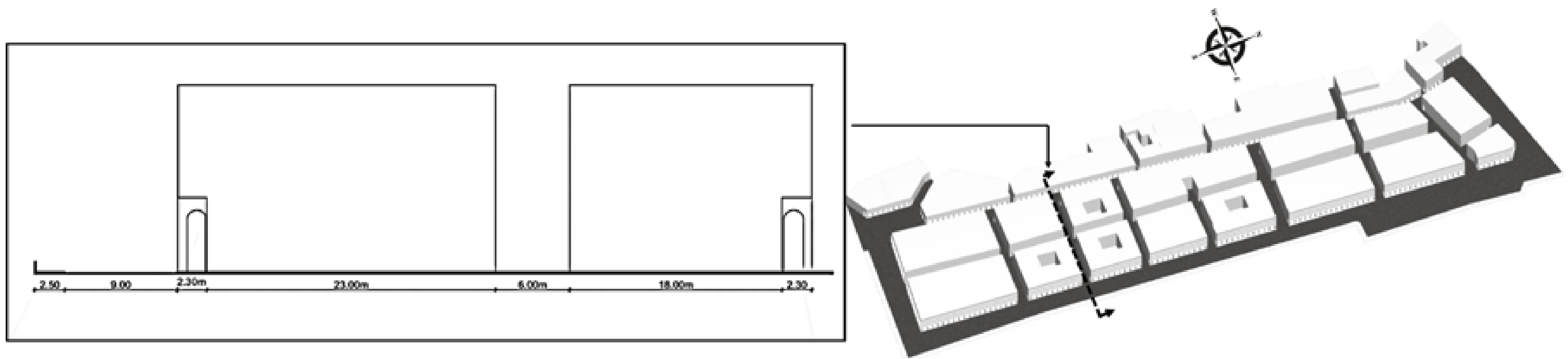


Figure 5 : Morphologie urbaine du tissu haussmannien à Alger (à gauche, coupe schématique d'une rue-type). Source : auteur.

5.3. TYPOLOGIE MODERNE

Ce tissu est développé au cours des dernières années de colonisation et surtout durant la partie postcoloniale. Caractérisée par ses bâtiments en forme de barres et ses voies de circulation larges (fig.6), cette typologie présente aussi une partie couverte sous forme d'arcades intégrées aux rez-de-chaussées urbains.

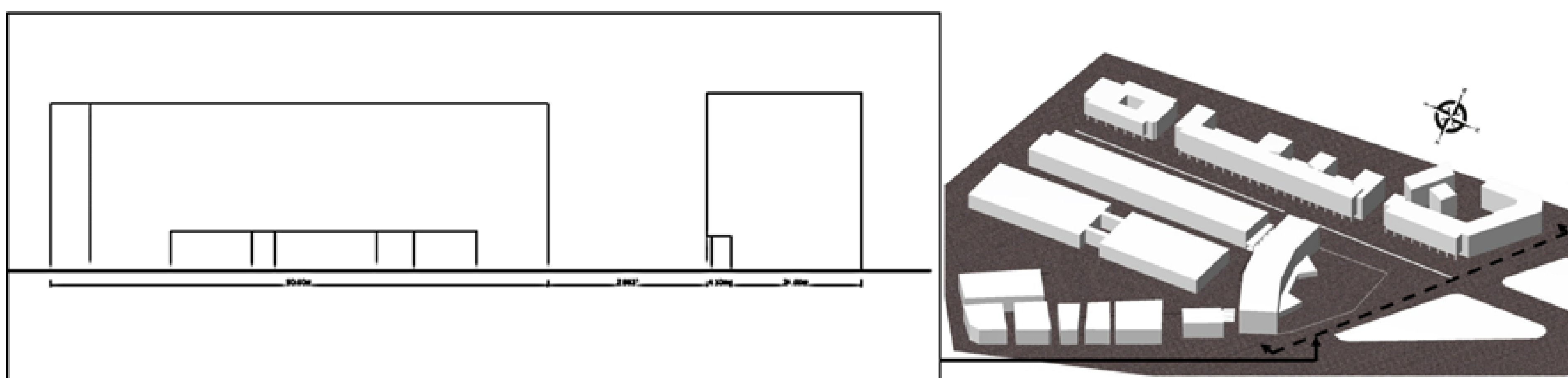


Figure 6 : Morphologie urbaine du tissu moderne à Alger (à gauche, coupe schématique d'une rue-type). Source : auteur.

6. ANALYSE ET DISCUSSION DES RESULTATS :

Dans l'objectif de préparer la campagne de mesures d'été, une simulation des radiations solaires type «insolation cumulée» a été lancée pour une journée d'été (01 août 2018) du lever au coucher du soleil.

6.1. TYPOLOGIE ANCIENNE :



Figure 7 : Analyse de l'insolation cumulée sur la typologie ancienne d'Alger. Source : auteur.

Il apparaît que le soir en été, la totalité des rues de l'ancien tissu reçoit une faible quantité de rayonnements solaires du fait de l'étroitesse des voies. Toutefois, nous pouvons voir que dans les rues principales, un peu plus larges, le taux de cumul est un peu plus élevé ne dépassant que rarement les 1800wh/m². Dans le cas des Sabat, les rayons de soleil n'atteignent pas le sol grâce à leur autoprotection, cette forme s'avère adaptée aux conditions de confort d'été dans les espaces extérieurs.

6.2. TYPOLOGIE HAUSSMANNIENNE :

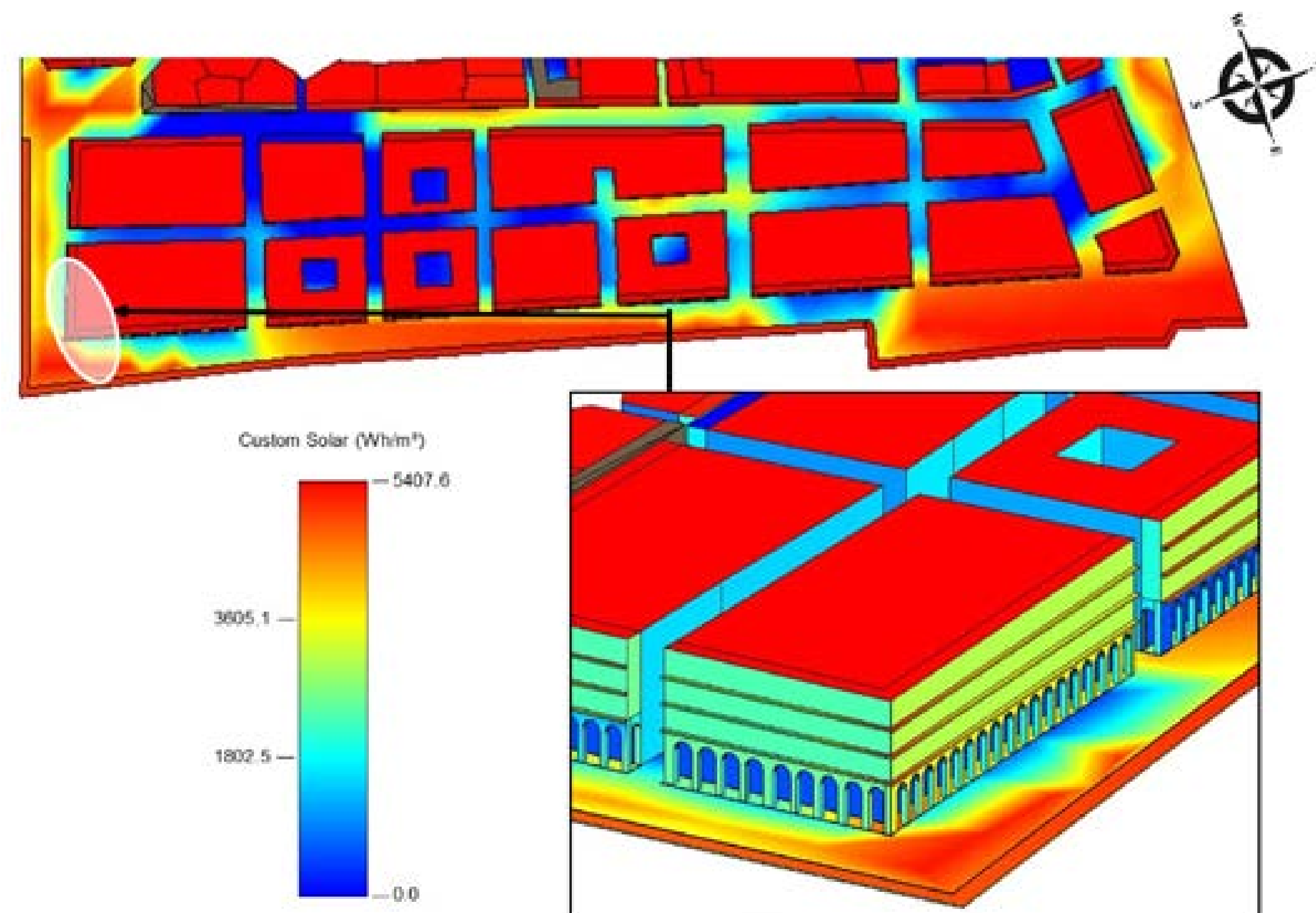


Figure 8: Analyse de l'insolation cumulée sur la typologie haussmannienne à Alger. Source : auteur.

La deuxième typologie présente un résultat similaire au premier. Néanmoins, l'espace piéton à l'est et au sud est beaucoup plus exposé au soleil. Cela indique que l'utilisateur risque de sentir un stress thermique considérable. La galerie piétonne sous arcade s'avère satisfaisante avec côté sud taux d'insolation compris entre 1800 et 3600wh/m².

6.3. TYPOLOGIE MODERNE :

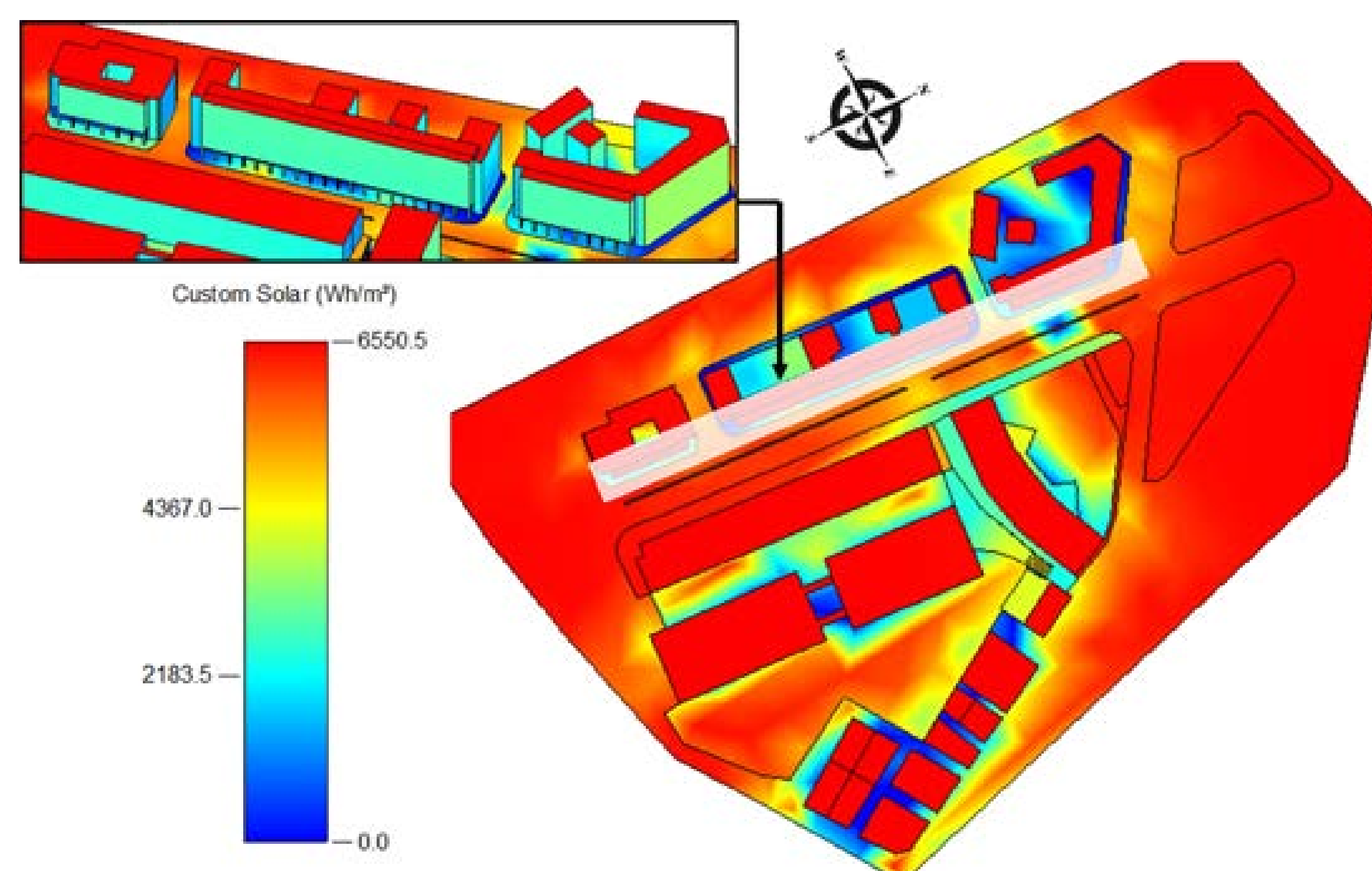


Figure 9 : Analyse de l'insolation cumulée sur la typologie moderne à Alger. Source : auteur.

Cette dernière typologie présente un taux maximum d'insolation cumulée de 6550wh/m². L'ensemble des espaces piétons est exposé aux rayonnements solaires (fig.09), cela signifie que la forme du bâti n'est pas adaptée à un usage confortable pour le piéton. Une partie des constructions coloniales

présente aussi des galeries sous-arcades, ce qui minimise l'exposition au soleil mais la partie postcoloniale s'avère très exposée aux rayonnements solaires.

La comparaison entre les trois typologies étudiées met en évidence que la conception des espaces dédiés aux piétons dans le tissu ancien intègre des stratégies permettant de garantir le confort des usagers. La typologie haussmannienne présente également des résultats satisfaisants. Toutefois, la voie la plus large propose un niveau de confort insuffisant mais qui est compensé par la présence d'arcades laissant aussi le choix aux piétons. La dernière typologie s'avère beaucoup moins protégée des rayonnements solaires, ce qui influence négativement le confort des usagers.

7. CONCLUSION

La simulation numérique des aspects climatiques s'avère une approche efficace et rapide pour évaluer des espaces publics et comparer différentes typologies existantes ou scénarios proposés. L'outil Solar Analysis intégré au plugin Autodesk Insight 360® nous a permis d'achever une partie de notre processus d'évaluation des ambiances thermiques urbaines de la Casbah d'Alger. L'utilisation de cet outil peut permettre aux concepteurs et aménageurs des espaces urbains de prévoir aisément les conditions de confort thermique à l'échelle du quartier selon les besoins des usagers.

8. REFERENCES

Aicha Boussoualim. 2002. « Contribution à la caractérisation de l'impact et de l'incidence du microclimat sur l'usage et les activités en espace public extérieur. Etude de cas à Blagnac ». Thèse de doctorat, Université de Nantes, Ecole polytechnique de Nantes, école d'architecture de Toulouse.

Jérémy Bernard. 2017. « Signature géographique et météorologique des variations spatiales et temporelles de la température de l'air au sein d'une zone urbaine ». Thèse de doctorat, génie civil, école Centrale de Nantes.

Jérôme Vinet. 2000. « Contribution à la modélisation thermo-aéraulique du microclimat urbain. Caractérisation de l'impact de l'eau et de la végétation sur les conditions de confort en espaces extérieurs ». Sciences de l'ingénieur (physics). Université de Nantes.

Marjorie Musy, Philippe Maillard, Marie-Hélène Azam, Jean-Baptiste Bailly, Elsa Barel, et al. 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 ». [Rapport de recherche] ADEME ;IRSTV FR CNRS 2488. 2017. <hal-01590630>.

Marc Lotteau. 2017. « Développement d'une approche d'intégration des questions de morphologie urbaine dans l'évaluation environnementale des projets d'aménagement à l'échelle du quartier basée sur l'analyse de cycle de vie ». Thèse de doctorat : Chimie analytique et environnement, université de Bordeaux.

Marialena Nikolopoulou, Spyros Lykoudis and Maria Kikira. 2004. « Modèles de confort thermique pour les espaces extérieurs en milieu urbain ». Projet Ruros, Centre for Renewable Energy Sources, Department of Buildings, Greece.

Luc Adolphe. 1998. *Ambiances architecturales et urbaines*. Les cahiers de la recherche architecturale 42/43. Editions Parenthèses.

Samia Kitous. 2012. « Forme urbaine et environnement thermo-aéraulique en climat chaud et sec : Cas du ksar de Ghardaïa dans le Sahara algérien ». Thèse de doctorat, Ecole Polytechnique d'Architecture et d'Urbanisme d'Alger.

Indicateur de confort P.E.T. : une revue critique

Edouard Walther^{*1}, Quentin Goestchel^{*2}

¹ AREP

16 avenue d'Ivry, 75013 Paris

*edouard.walther@arep.fr

² LMT Cachan, ENS Paris-Saclay

61 avenue du Président Wilson, 94230 Cachan

*quentin.goestchel@ens-paris-saclay.fr

RESUME. La Physiological Equivalent Temperature (*PET*) est un indicateur de confort pour les milieux extérieurs et semi-extérieurs largement utilisé. Cependant, celui-ci n'est pas développé en détail dans la littérature ou dans la norme VDI qui en fournit le code. En analysant cette routine, des erreurs et un modèle de diffusion de vapeur incohérent ont pu être identifiés. De plus, une hypothèse forte d'indépendance des variables limite la précision du modèle. Une version corrigée est proposée, intégrant un modèle de diffusion de vapeur conforme à l'état de l'art, ainsi qu'une méthode numérique actuelle pour la résolution du système non-linéaire donnant la *PET*. Le code est proposé en téléchargement.

MOTS-CLÉS. indicateur confort, *PET*, diffusion de vapeur

ABSTRACT. The Physiological Equivalent Temperature (*PET*) is a widespread comfort index for outdoor and semi-outdoor spaces. It has however not been described thoroughly neither in the literature nor in the VDI norm. Performing reverse engineering on the routine provided in the VDI norm, the present work underlines the simplifications made in solving the equation system for the *PET* and proposes a correction of the errors in the much used version of the *PET* calculation routine. A comparison of the corrected model with a stringent solving of the equation system is made. The original vapour diffusion model is also examined and shows no dependency to the clothing level. The comparison with a state-of-the-art vapour transfer model exhibits a significant -7 to $+2.6$ [K] discrepancy with the corrected *PET* model in the studied conditions. Links to the two versions of the code are provided.

KEYWORDS. comfort index, *PET*, diffusion vapour transfer

1 INTRODUCTION

La *PET* est un indice de confort basé sur les travaux de Höpfe (1993, 1999) utilisé comme référence par la norme allemande VDI (2008) qui a également été implanté dans l'outil populaire GrassHopper/LadyBug Sadeghipour Roudsari & Pak (2013). Cet indice de confort a été utilisé dans de nombreuses études de cas au cours des dernières années Mayer et al. (2008); Setaih et al. (2013); Gomez et al. (2013); Lin & Matzarakis (2011); Department of Architecture CUHK

(2008).

La PET est calculée à partir d'un modèle de thermorégulation du corps humain d'après Gagge et al. (1971, 1986). Dans ce modèle, le corps est représenté sous forme cylindrique et caractérisé par ses températures de peau et de noyau (on l'appelle ainsi modèle "à deux noeuds") afin d'évaluer l'évolution des températures corporelles pour en déduire le confort. On calcule donc la température du centre du corps, dite "de noyau", la température de peau, la température des vêtements et la mouillure cutanée, résultantes de l'exposition à l'environnement étudié.

L'indicateur PET à proprement parler est une température. Il s'agit de la température opérative d'un environnement de référence qui provoquerait sur le sujet la même réponse physiologique que l'environnement étudié, soit les mêmes températures de peau et de noyau. Cet environnement de référence, proche de celui d'un bureau, est défini comme tel : une vitesse d'air faible de 0.1 [m/s] et 1200 [Pa] de pression partielle de vapeur d'eau (soit 50% d'humidité relative à 20°C). La génération de chaleur métabolique est fixée à 80 [W] et le niveau d'habillement à 0.9 [clo].

La description de la genèse du PET et du détail des calculs Höppe (1984) n'est pas disponible en version numérique. Le modèle est cependant partiellement décrit dans Höppe (1993, 1999); VDI (2008) ou déchiffrable depuis le code en annexe de Department of Architecture CUHK (2008); VDI (2008)¹. Dans une première partie de ce travail on s'attache donc à expliquer le modèle en détaillant les hypothèses qui mènent à la résolution de la PET. Les différences résultant d'hypothèses simplificatrices dans le modèle sont exposées dans un second temps. En ouverture, l'impact de la variabilité physiologique sur la PET est abordé.

2 DESCRIPTION DU MODÈLE

Pour des raisons de concision, on ne présente ici que l'essentiel des équations. L'exposé de l'intégralité des calculs est disponible dans Walther, É. and Goestchel, Q. (2018).

2.1 ÉQUATIONS GOUVERNANTES

Le métabolisme humain modélisé par Höppe est basé sur le modèle "à deux noeuds" de Pierce Gagge et al. (1971, 1986), dont une mise à jour peut être trouvée dans ASHRAE (2013). Dans ce modèle, le corps est un système régulé en température, composé de deux cylindres concentriques représentant la couche de peau et le centre du corps appelé "noyau". Le schéma électrique équivalent du transfert de chaleur entre le centre du corps et l'environnement extérieur est donné sur la figure 1. Le transfert de chaleur entre les noeuds de température de noyau T_c et de peau T_{sk} a lieu par conduction *via* la conductance de peau U_{sk} , et par débit sanguin $(q_m C_p)_b$.

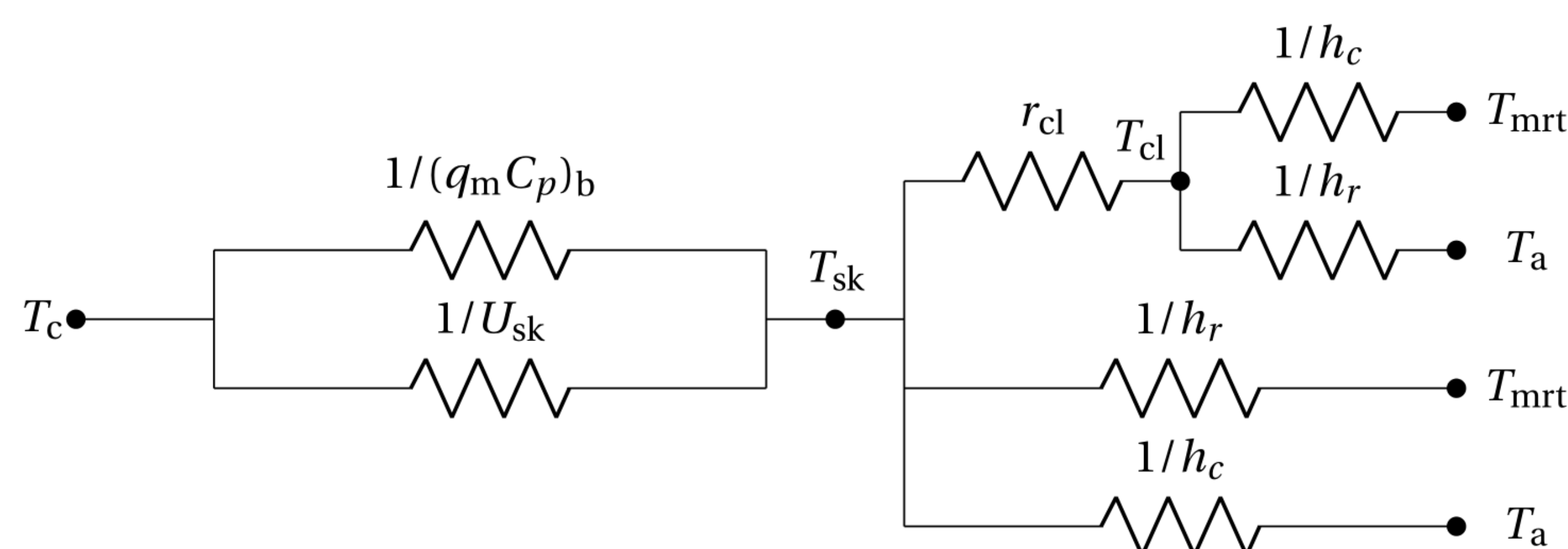


FIGURE 1. Schéma électrique équivalent du transfert de chaleur entre le noyau et l'environnement extérieur (température d'air T_a , rayonnante T_{mrt} , de vêtire T_{cl} , de noyau T_c), de peau T_{sk}).

Le transfert de chaleur entre la peau et l'environnement a lieu de en parallèle à travers la couche de vêtire de résistance thermique r_{cl} , ainsi qu'à la surface de la peau. En écrivant l'égalité

1. La version originale du code source pour le calcul de la PET peut aussi être téléchargée [sur Github](#).

du flux à travers les vêtements qui correspond aux pertes par radiation et convection à la surface des vêtements, on obtient :

$$\frac{(T_{\text{sk}} - T_{\text{cl}})}{r_{\text{cl}}} = h_c \frac{A_{\text{cl}}}{A} (T_{\text{cl}} - T_{\text{a}}) + \sigma \varepsilon_{\text{cl}} f_{\text{eff}} \frac{A_{\text{cl}}}{A} (T_{\text{cl}}^4 - T_{\text{mrt}}^4) \quad (1)$$

La deuxième équation du modèle est une égalité sur le noeud du "noyau". La somme de l'activité métabolique M et des pertes par respiration Q_r correspond au flux thermique entre le "noyau" et la peau et à l'échange de chaleur par conduction entre le flux sanguin et la peau :

$$M + Q_r = (T_c - T_{\text{sk}}) \times \left(U_{\text{sk}} + \rho_b c_b \times \frac{q_b^{\text{set}} + C_d(T_c - T_c^{\text{set}})}{1 + C_s(T_{\text{sk}}^{\text{set}} - T_{\text{sk}})} \right) \quad (2)$$

Dans l'équation (2), le terme de gauche correspond à la production métabolique de chaleur M ainsi qu'aux pertes par respiration latentes et sensibles, Q_r . Le terme de droite représente le transfert de chaleur depuis l'intérieur du corps vers la surface externe de la peau par conduction dans la chair *via* la conductance U_{sk} et par le flux transporté par le débit sanguin q_b . On remarquera que le débit sanguin est affecté par les termes C_d, C_s qui correspondent aux actions de régulation de dilatation et de vasoconstriction, détaillées dans la section 2.2.

La troisième équation du modèle est la somme des flux sur le corps en régime permanent. Elle somme l'activité métabolique M , les transferts par convection C , radiation R , transpiration E_{sw} et les pertes par diffusion E_{diff} et respiration Q_r :

$$M + C + R + E_{\text{sw}} + E_{\text{diff}} + Q_r = 0 \quad (3)$$

Dans l'équation (3) C et R représentent la convection et la radiation sur les fractions habillées et nues du corps. E_{sw} correspond aux pertes par sudation et E_{diff} à celles par diffusion de la sueur à travers les pores de la peau. L'équation (3) contient intrinsèquement les réactions métaboliques de régulation des températures corporelles, présentées dans la partie qui suit.

2.2 RÉGULATION DES TEMPÉRATURES CORPORELLES

Le mode de régulation des températures physiologiques inclus dans la PET est aussi issu du modèle de Pierce Gagge et al. (1971). Celui-ci considère le corps comme un système thermique régulé en température qui évolue en réponse aux écarts aux consignes des températures de peau et de noyau.

La régulation se fait principalement selon deux mécanismes : la vasomotricité et la sudation. La régulation de température par tremblement en conditions très froides, présentée dans Gagge et al. (1986); Höpfe (1993), n'est pas utilisée dans la version du code fournie par la norme VDI (2008).

Le débit sanguin q_b est régi par les différences entre la température de peau, la température de noyau et leur valeur de consigne respectives $T_{\text{sk}}^{\text{set}}, T_c^{\text{set}}$:

$$q_b = \frac{q_b^{\text{set}} + C_d(T_c - T_c^{\text{set}})}{1 + C_s(T_{\text{sk}}^{\text{set}} - T_{\text{sk}})} \text{ [L/m}^2\text{/h]} \quad (4)$$

Les coefficients C_d et C_s représentent les phénomènes de dilatation et de constriction des vaisseaux sanguins. Le mécanisme de contrôle est fait de telle manière que les différences de températures sont fixées à zéro dans l'équation (4) quand elles sont négatives (ceci permet par exemple d'éviter la vasodilatation lorsque le corps est en hypothermie). La limite maximale du débit sanguin est fixée à 90 [L/m²/h] et la valeur de consigne du flux sanguin, q_b^{set} est 6.3 [L/m²/h].

Dans la norme VDI, la fraction massique du corps étant de la peau ou du noyau est constante et ne dépend pas du débit sanguin, il n'affecte donc pas le calcul de T_b , contrairement à ce qui

se trouve dans le modèle transitoire détaillé dans Gagge et al. (1971, 1986); Doherty & Arens (1988).

La sudation est contrôlée par la température du corps, qui déclenche la production de sueur en fonction de la différence entre avec la température de consigne du corps et du coefficient de sudation $C_{sw} = 304.94 \times 10^{-3}$ [kg/(m².h.K)] :

$$q_m^{sw} = C_{sw} \times (T_b - T_b^{set}) \text{ [kg/m}^2\text{/h]} \quad (5)$$

La température du corps, T_b est la moyenne pondérée de la température de peau et de la température de "noyau".

$$T_b = 0.1 \times T_{sk} + 0.9 \times T_c \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (6)$$

L'évaporation E_{sw} à la surface de la peau dépend de la production de sueur et de la chaleur latente L_v .

$$E_{sw} = L_v \frac{q_m^{sw}}{3600} \text{ [W/m}^2\text{]} \quad (7)$$

Le flux de chaleur maximal E_{max} pouvant être évaporé par la peau à pression de vapeur saturante $p_{vs}(T_{sk})$ et transféré à l'environnement étudié, à pression partielle p_a , dépend de l'efficacité du transfert de vapeur F_{pcl} et du coefficient de transfert par chaleur latente h_e :

$$E_{max} = L_v F_{pcl} f_{cl} h_e (p_{vs}(T_{sk}) - p_a) \text{ [W/m}^2\text{]} \quad (8)$$

Dans la littérature, le facteur d'efficacité de transfert de vapeur, F_{pcl} de l'Equation (8), est souvent exprimé comme suit Doherty & Arens (1988) (une démonstration complète est donnée dans Nishi & Gagge (1973)) :

$$F_{pcl} = \frac{1}{1 + \frac{f_{cl} h_e}{h_{e,cl}}} \quad (9)$$

Le coefficient de transfert par chaleur latente, h_e [W/m²/Pa], est donné selon la relation de Lewis LR :

$$h_e = LR \times h_c \quad (10)$$

La relation de Lewis, LR , est calculée suivant l'analogie entre transferts de masse et de chaleur Fobelets & Gagge (1988).

$$LR = \frac{L_v}{\rho C_p K} \frac{M_w}{RT L e^{\frac{2}{3}}} = \frac{L_v}{\rho C_p K} \frac{D^{\frac{2}{3}}}{\alpha^{\frac{2}{3}}} \times \frac{M_w}{RT} \text{ [K/Pa]} \quad (11)$$

Le facteur K de l'équation (11) représente la contre-diffusion d'air sec par rapport au débit de vapeur d'eau, généralement égale à 4% du flux de vapeur, Fobelets & Gagge (1988). Le ratio de Lewis vaut usuellement $LR \sim 0.0165$ [K/Pa].

Dans le code de la norme VDI, La relation pour le coefficient de transfert par évaporation est donnée par l'équation (12) pour laquelle aucune référence n'a pu être trouvée :

$$h_e = 0.633 \times \frac{h_c}{p_{atm} c_a} \text{ [W/Pa]} \quad (12)$$

Cette expression donne des résultats du même ordre de grandeur qu'avec le rapport de Lewis en étant toutefois $\sim 10\%$ en dessous des valeurs obtenues par l'équation (11).

2.3 DÉTAIL SUR LE TRANSFERT DE MASSE PAR DIFFUSION

Dans cette section, une attention particulière est portée au modèle de diffusion original de la PET afin d'en exposer une incohérence.

À la surface de la peau, le flux latent total E est la somme des phénomènes de sudation et de diffusion :

$$E = E_{\text{diff}} + E_{\text{sw}} \quad (13)$$

Pour calculer les pertes par diffusion, E_{diff} , la mouillure cutanée w est introduite. Elle représente le rapport entre le flux de chaleur latente dissipé par sudation à la surface de la peau E et le flux latent maximal E_{max} .

$$w = \frac{E}{E_{\text{max}}} \quad (14)$$

Si la mouillure cutanée w est plus grande que un, sa valeur est fixée à l'unité et le flux latent à la surface de la peau est maximal : $E_{\text{sw}} = E_{\text{max}}$. En général la diffusion se produit sur la partie sèche de la peau ($1 - w$), selon la relation suivante, donnée dans le modèle de la PET VDI (2008) :

$$E_{\text{diff}} = \frac{L_v \times (1 - w)(p_{\text{vs}}(T_{\text{sk}}) - p_{\text{a}})}{R_{\text{d}}} \quad [\text{W/m}^2] \quad (15)$$

La résistance à la diffusion de vapeur R_{d} de l'équation (15) est définie comme une constante $R_{\text{d}} = 0.79 \times 10^7$ [Pa.s/Kg], sans justification ni référence. Nous supposons qu'il s'agit d'un coefficient de diffusion de vapeur dans les tissus cutanés, cependant cette formulation est surprenante : cela signifierait prendre la pression de vapeur à la surface de la peau et négliger totalement l'effet des vêtements sur les pertes par diffusion.

Une formule conforme à l'état de l'art pour modéliser les pertes par diffusion de vapeur à la surface de la peau serait la suivante Nishi & Gagge (1973) :

$$E_{\text{diff}} = \frac{(1 - w)(p_{\text{vs}}(T_{\text{sk}}) - p_{\text{a}})}{R_{\text{e}}} \quad [\text{W/m}^2] \quad (16)$$

L'équation (16) tient compte de la résistance évaporative des couches d'air et de vêtue R_{e} . La résistance à l'évaporation est calculée grâce à la résistance thermique de l'air R_{air} et des vêtements R_{cl} :

$$R_{\text{e}} = \frac{R_{\text{air}} + R_{\text{cl}}}{LR \times i_m} \quad (17)$$

Où R_{air} est la combinaison entre résistance convective et résistance radiative linéarisée, i_m est l'index de perméabilité de Woodcock, généralement égal à 0.38, Havenith et al. (1999).

3 MODÈLE INITIAL DE LA PET

3.1 RÉOLUTION DES ÉQUATIONS DU MODÈLE

Lors de l'établissement du modèle, l'hypothèse d'indépendance des équations présentées en 2.1 a été posée, probablement pour ajuster la complexité du calcul aux outils numériques alors disponibles. Cette hypothèse réduit le problème à un polynôme du second degré : l'équation (2) est à résoudre avec pour inconnue T_c . La température de peau est alors recalculée et le processus se répète jusqu'à la convergence. La température de vêtue n'est pas imposée par les conditions ambiantes, ce qui constitue une simplification importante, dont l'influence sera abordée au point 4.1

Selon les différents cas de thermorégulation, plusieurs polynômes sont utilisés. On donne ici à titre d'exemple le cas de la vasodilatation où l'équation (2) se réduit à un polynôme du second degré :

$$aT_c^2 + bT_c + c = 0 \quad (18)$$

Dans l'équation (18), les coefficients a, b, c sont les suivants :

$$a = C_d \rho_b c_b \quad (19)$$

$$b = U_{sk} - T_c^{\text{set}} \times C_d \rho_b c_b - C_d \rho_b c_b T_{sk} \quad (20)$$

$$c = -(M + Q_r) + T_c^{\text{set}} \times C_d \rho_b c_b T_{sk} - U_{sk} \times T_{sk} \quad (21)$$

3.2 ERREURS RELEVÉES DANS LA NORME VDI

Plusieurs erreurs de frappe peuvent être corrigées dans la norme VDI (2008). Elles sont reproduites dans la routine de calcul de la PET de Sadeghipour Roudsari & Pak (2013). Trois erreurs majeures sont également faites dans ces codes :

- le niveau d'activité métabolique est conservé comme étant celui de l'environnement réel alors qu'il devrait être défini égal à 80 [W]. Le terme M des équations (2) et (3) est donc incorrect.
- Les pertes sensibles et latentes par respiration Q_r , définies en fonction du niveau d'activité M sont par conséquent incorrectes.
- Le transfert de vapeur maximum E_{max} est évalué avec le niveau de vêture de l'environnement réel alors qu'il devrait être calculé pour 1200 [Pa] et un une vêture de 0.9 [clo]. Les valeurs de w et E_{diff} s'en trouvent affectées.

La table 1 présente les écarts de -3.8 à +10% entre modèle original et modèle corrigé des trois erreurs citées ci-avant pour différentes conditions d'environnement (valeurs tirées de Höppe (1999)).

T_{air} [°C]	T_r [°C]	v_{air} [m/s]	p_v [hPa]	PET Höppe (1999)	PET corrigé	Différence [%]
21	21	0.1	12	21	21	0
-5	40	0.5	2	10	10.09	-0.9
-5	-5	5	2	-13	-11.69	10
30	60	1	21	43	42.70	0.2
30	30	1	21	29	28.95	-3.8

TABLE 1 – Valeurs du PET obtenues avec la résolution corrigée comparées à Höppe (1999) pour 80 [W] d'activité et 0.9 [clo]

4 COMPARAISON AVEC UN MODÈLE AMÉLIORÉ

Dans cette section, la résolution du système complet d'équations est présentée, ainsi que la mise à jour du modèle avec un calcul rigoureux du transfert de vapeur par diffusion.

4.1 RÉOLUTION DU MODÈLE NON-LINÉAIRE

Nous avons vu au point précédent que la méthode initiale pour résoudre la PET consistait à découpler les équations et à négliger l'influence de la température de vêture. Avec les outils numériques actuels, il est possible de résoudre le système complet suivant, qui représente les bilans thermiques sur le noyau (équation (22)), sur la peau nue (équation (23)) et à la surface de vêture (équation (24)) :

$$M + Q_r - (\rho_b q_b c_b + U_{sk}) \times (T_c - T_{sk}) = 0 \quad (22)$$

$$R_{\text{bare}} + C_{\text{bare}} + E + (\rho_b q_b c_b + U_{sk}) \times (T_c - T_{sk}) - h_{\text{cl}} \times (T_{sk} - T_{\text{cl}}) = 0 \quad (23)$$

$$C_{\text{clo}} + R_{\text{clo}} + h_{\text{cl}} \times (T_{sk} - T_{\text{cl}}) = 0 \quad (24)$$

Le modèle initial et le modèle non-linéaire ont été comparés pour des températures d'air allant de 0 à 30°C et 0 à 100% d'humidité relative. Trois types de conditions ont été étudiées :

- Conditions "opératives" : la température rayonnante vaut la température d'air, la vitesse d'air est faible et vaut 0.1 [m/s].
- Conditions de vent : conditions opératives avec une vitesse d'air valant 1 [m/s].
- Conditions de température rayonnante élevée : conditions opératives avec une vitesse d'air faible de 0.1 [m/s] et une température rayonnante supérieure de 30 [K] à celle de l'air.

L'écart obtenu en comparant les deux méthodes de résolution va de -0.4 à +2.3 [K] selon les conditions étudiées. Les écarts les plus grands ont été relevés pour les conditions de vent tandis que les conditions opératives présentent une différence de -0.5 à +0.75 [K]. Dans certaines conditions, la méthode de résolution linéaire donne donc une approximation correcte de la PET.

4.2 MISE À JOUR DU MODÈLE DE DIFFUSION DE VAPEUR

Il a été souligné dans la partie 2.3 que le modèle de diffusion de vapeur de la PET est indépendant du niveau de vêture, ce qui est incohérent avec la physique du phénomène. Le modèle de diffusion de vapeur présenté par Nishi & Gagge (1973) est donc mis en place, selon l'équation (16). La figure 2 montre l'écart entre le modèle original et le modèle modifié pour des conditions de température moyenne rayonnante élevée décrites au point 4.1. On constate également sur cette figure que le modèle original (en pointillés) est très peu sensible à l'humidité : les iso-PET sont quasi verticales. La PET avec un modèle de diffusion selon l'équation (16) montre une plus grande sensibilité à l'humidité qui traduit l'inhibition du mécanisme de diffusion et sudation par l'humidité ambiante : lorsque l'humidité de l'air est élevée, la régulation de température par évaporation est moins efficace.

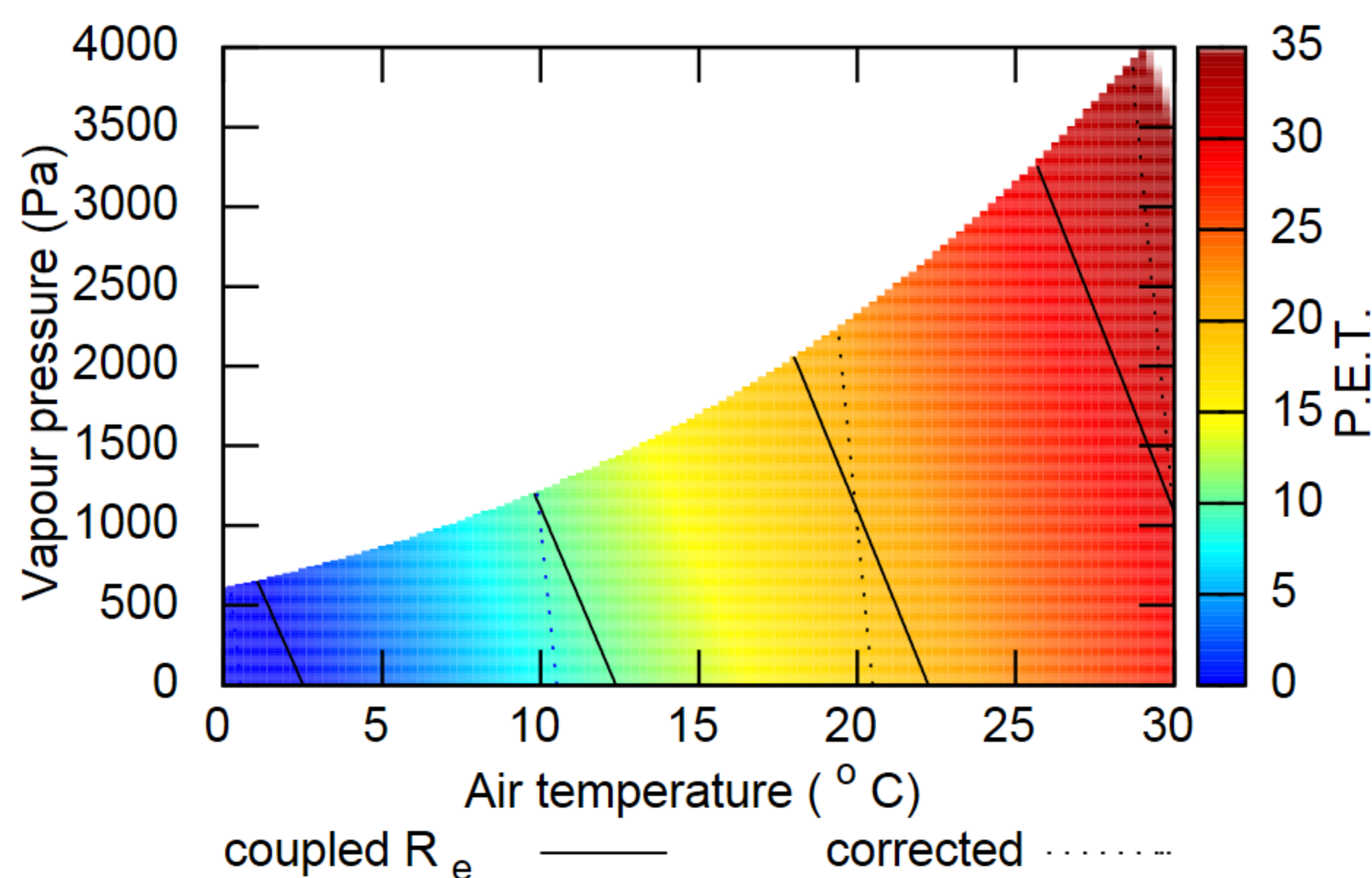


FIGURE 2. Température rayonnante élevée : comparaison entre la PET initiale corrigée et la PET couplée avec un modèle de diffusion à jour selon l'équation (16).

En conditions de température rayonnante élevée, la différence varie de -7 à +2.6 [K]. Pour les conditions opératives, la différence va de -4.8 à +2 [K]. Pour les conditions de vent la différence va de -3.6 à +2.2 [K]. Ces écarts entre les deux modèles sont considérables par rapport à la plage de PET confortable : celle-ci varie en effet entre 18 et 23°C Höpfe (1999), soit de 5 [K].

5 CONCLUSION & PERSPECTIVES

Dans ce travail, l'analyse du modèle de la PET a montré les incohérences de construction et les erreurs figurant dans la norme VDI (2008) ou les routines utilisées dans les logiciels courants Sadeghipour Roudsari & Pak (2013). Une correction de la version originale du code est proposée ([PET selon la norme VDI corrigée](#), résolution linéaire).

Considérant les outils numériques disponibles à l'époque de son élaboration, la méthode initiale de résolution de la PET est élégante au sens où elle permet la résolution approchée d'un système d'équations non-linéaires à partir de polynômes du second degré. La différence avec une résolution couplée varie de -0.5 à 2.4 [K] dans les conditions étudiées.

Le modèle initial de la PET montre une sensibilité très faible à l'humidité, ce qui s'explique par un choix surprenant pour l'équation de diffusion de vapeur, celle-ci étant indépendante du niveau de vêture. Une mise à jour suivant l'état de l'art est proposée et engendre des différences importantes, allant de -7 à +2.6 [K] par rapport au PET initial. Le modèle développé de résolution est plus compact, plus lisible et réduit le temps d'exécution d'un facteur deux (PET corrigé, résolution non-linéaire).

Le modèle est construit sur une représentation de la morphologie humaine, notamment la taille et la masse et le sexe de l'individu. Afin d'évaluer l'impact de la variabilité présente dans la nature sur l'indicateur de confort, des tirages de Monte-Carlo ont été effectués sur les paramètres suivants du modèle : la taille, la masse, le pourcentage de graisse, les constantes de sudation, de dilatation, de striction, le débit sanguin basal et les températures de consignes corporelles.

On a considéré que la taille, la masse et le pourcentage de graisse sont distribuées selon des lois normales en utilisant les moyennes et écarts-types nationaux français (source INSEE). Les températures corporelles sont supposées varier de ± 0.5 [K] autour des températures de consigne initiales Mackowiak et al. (1992). Pour les autres paramètres, un écart-type de 5% autour de la valeur initiale a été considéré. Comparativement aux écarts-types sur la masse et la taille ceci est une hypothèse conservatrice. L'écart-type σ résultant des deux mille tirages aléatoires par point pour des conditions opératives est présenté sur la figure 3. On constate que la variation est significative : les propriétés des lois normales impliquent que 95% d'une distribution sont comprises dans $\pm 2\sigma$, soit une plage de 8 [K] pour un écart type de 2 [K]. Ceci est cohérent avec les plages de températures confortables de l'ordre de 10 [K] recensées sur le terrain par Van Hoof (2008).

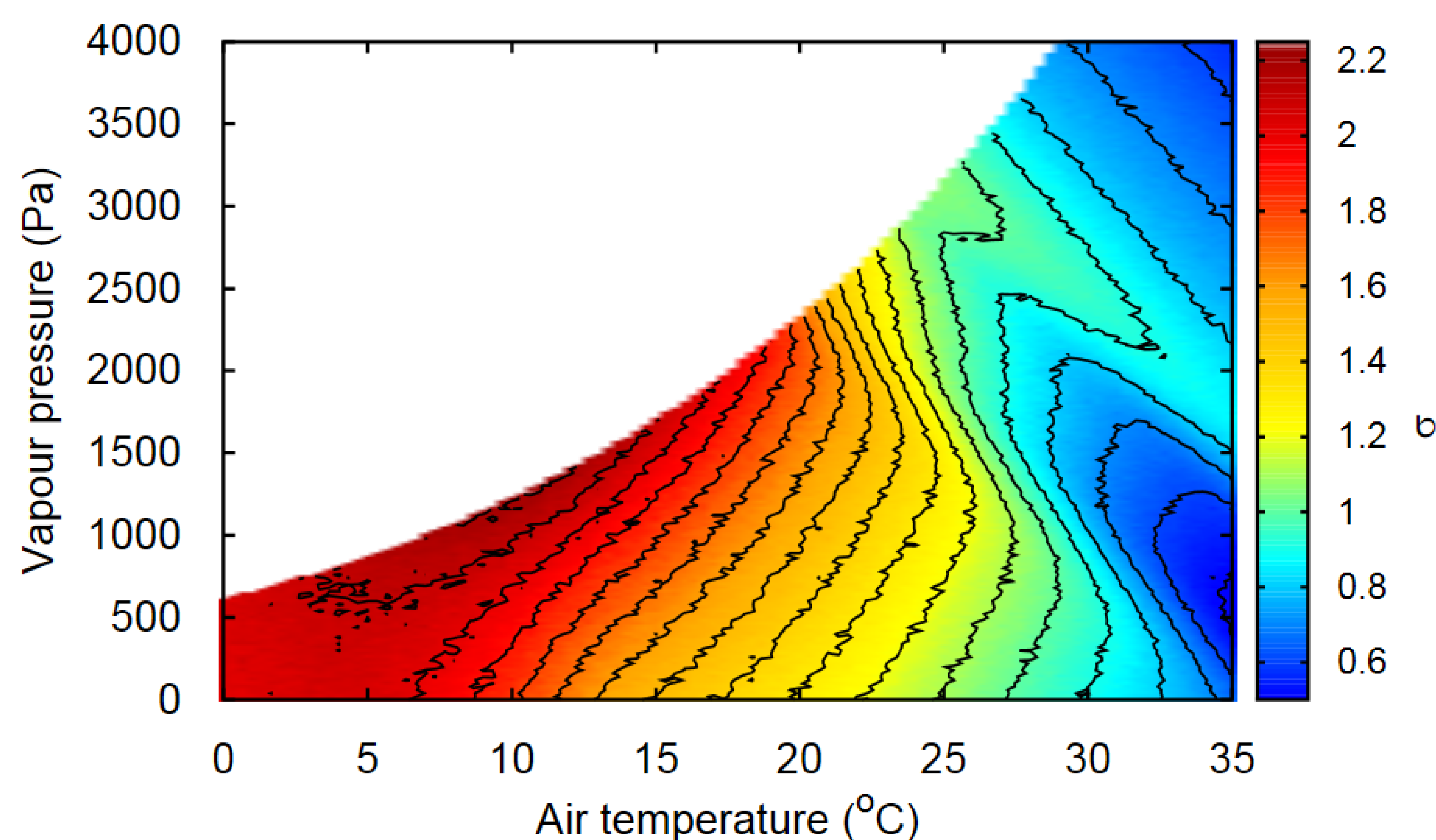


FIGURE 3. Influence de la variabilité physiologique sur la PET : écart-type σ en conditions opératives (2000 tirages par point).

RÉFÉRENCES

- ASHRAE (2013). Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. *ANSI/ASHRAE addendum b to ANSI/ASHRAE Standard 55-2013*.
- Department of Architecture CUHK (2008). *Urban Climatic Map and Standards for Wind Environment - Feasibility Study*. Technical report, http://www.pland.gov.hk/pland_en/p_study/prog_s/ucmapweb/ucmap_project/content/reports/Comfort_Level_Survey.pdf. [Online - accessed February 2017].

- Doherty, T. J. & Arens, E. (1988). Evaluation of the physiological bases of thermal comfort models. *ASHRAE Transactions*.
- Fobelets, A. P. R. & Gagge, A. P. (1988). Rationalization of the effective temperature ET^* , as a measure of the enthalpy of the human indoor environment. *ASHRAE Transactions*, 94.
- Gagge, A., Fobelets, A., & Berglund, L. (1986). A standard predictive index of human response to the thermal environment. *ASHRAE Transactions*, 14.
- Gagge, A., Stolwijk, J., & Nishi, Y. (1971). An effective temperature scale based on a simple model of human physiological regulatory response. *ASHRAE Transactions*, 77.
- Gomez, F., Cueva, A. P., Valcuende, M., & Matzarakis, A. (2013). Research on ecological design to enhance comfort in open spaces of a city (Valencia, Spain). Utility of the physiological equivalent temperature. *Ecological Engineering*, 57.
- Havenith, G., Holmér, I., Den Hartog, E. A., & Parsons, K. C. (1999). Clothing Evaporative Heat Resistance – Proposal for Improved Representation in Standards and Models. *Annals of Occupational Hygiene*, 43(5).
- Höppe, P. (1984). Die Energiebilanz des Menschen. Münchner Universitätsschriften, Meteorol. Inst. *Wiss. Mitt*, 49.
- Höppe, P. (1993). Heat Balance Modelling. *Experientia*.
- Höppe, P. (1999). The physiological equivalent temperature - a universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment. *International Journal of Biometeorology*, 43.
- Lin, T.-P. & Matzarakis, A. (2011). Tourism climate information based on human perception in Taiwan and Easter China. *Tourism Management*, 32.
- Mackowiak, P. A., Wasserman, S. S., & Levine, M. M. (1992). A critical appraisal of 98.6 f, the upper limit of the normal body temperature, and other legacies of carl reinhold august wunderlich. *Jama*, 268(12), 1578–1580.
- Mayer, H., Holst, J., Dostal, P., Imbery, F., & Schindler, D. (2008). Human thermal comfort in summer within an urban street canyon in Central Europe. *Meteorologische Zeitschrift*.
- Nishi, Y. & Gagge, A. (1973). Moisture permeation of clothing : A factor governing thermal equilibrium and comfort. *Memoirs of the Faculty of Engineering, Hokkaido University*, 13(Suppl2), 5–13.
- Sadeghipour Roudsari, M. & Pak, M. (2013). Ladybug : a parametric environmental plugin for Grasshopper to help designers create an environmentally-conscious design. In *13th International IBPSA Conference*.
- Setaih, K., Hamza, N., & Townshend, T. (2013). Assessment of Outdoor thermal comfort in urban microclimate in hot and arid areas. *Proceedings of BS2013*.
- Van Hoof, J. (2008). Forty years of Fanger’s model of thermal comfort : comfort for all? *Indoor air*, 18(3), 182–201.
- 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.
- Walther, É. and Goestchel, Q. (2018). The PET comfort index : Questioning the model. *Building and Environment*, 137, 1–10.

Calcul trigonométrique du flux solaire reçu par un individu

Édouard Walther, El Mehdi Hamdani*

AREP

16 avenue d'Ivry, 75013 Paris

*elmehdi.hamdani@arep.fr

RÉSUMÉ. La prise en compte des flux solaires est un paramètre clé de l'estimation du confort dans les espaces ouverts et semi-ouverts. Dans ce travail, on présente les méthodes classiques de détermination du flux direct et diffus sur un individu puis une manière originale de calculer le flux diffus est exposée, basée sur des relations trigonométriques et un calcul intégral simple. Les deux méthodes sont comparées et donnent des résultats similaires. Le modèle proposé prend en compte le caractère anisotrope de la composante circumsolaire du flux diffus dans modèle de Perez. Le phénomène de "rechute zénithale" observé dans la littérature expérimentale et numérique est reproduit par le modèle proposé.

MOTS-CLÉS. température moyenne rayonnante, diffus, direct, Perez, intégration

ABSTRACT. Integrating solar fluxes in the body heat balance is a key parameter in the estimation of comfort in outdoor and semi-outdoor spaces. In the present work, classical methods for the calculation of beam and diffuse radiation on the individual are presented. An original method for the computation of the diffuse flux is then presented, based on trigonometric relations and a simple integral calculus. The proposed model accounts for the anisotropic feature of the circumsolar diffuse radiation of the Perez model. The daytime relapse phenomenon observed in the literature is also reproduced.

KEYWORDS. mean radiant temperature, diffuse, direct, Perez, integration

1 INTRODUCTION

La température moyenne rayonnante est un paramètre influent dans le calcul du confort, très influencée par le rayonnement solaire Höpfe (1999). La prise en compte du flux solaire horizontal ou vertical ne peut suffire à une estimation correcte de la température moyenne rayonnante sur un individu. En général, celle-ci est déterminée à partir d'une projection géométrique des flux reçus sur l'individu, issue de corrélations dont l'origine n'est pas toujours détaillée Helbig et al. (2013); Pickup et al. (2000).

La température moyenne rayonnante ayant un effet très sensible sur la perception du confort Höpfe (1999) il semble nécessaire de maîtriser la manière dont elle est calculée. On s'intéresse ici au calcul de la température moyenne rayonnante à partir du rayonnement direct et diffus. Ceux-ci sont modélisés d'après l'état de l'art, puis un calcul trigonométrique suivi d'une intégrale élémentaire permettent d'obtenir le flux arrivant sur un individu de forme cylindrique.

2 MÉTHODE USUELLE

Dans cette section, on présente la méthode classique de calcul des flux solaires reçus. En espace extérieur, l'individu est soumis au rayonnement solaire. Une façon simplifiée pour intégrer les flux solaires dans le bilan thermique de l'individu est de les convertir en élévation de la température moyenne rayonnante T_r . Le flux absorbé par le corps humain correspond alors à une température moyenne radiante modifiée T_r^* supérieure à T_r telle que Helbig et al. (2013) :

$$\alpha f_p \varphi^\perp = \sigma \varepsilon (T_r^{*4} - T_r^4) \quad (1)$$

$$T_r^* = \sqrt[4]{T_r^4 + \frac{\alpha f_p \varphi^\perp}{\sigma \varepsilon}} \quad (2)$$

Où φ^\perp est la densité de flux total sur une surface orthogonale au rayonnement, $\alpha \sim 0.7$ est le coefficient d'absorption du rayonnement solaire, f_p est un facteur de projection du rayonnement solaire qui dépend de la hauteur solaire h . Pickup et al. (2000) proposent l'expression suivante pour f_p :

$$f_p = 0.42 \times \cos(h) + 0.043 \times \sin(h) \quad (3)$$

Une régression d'après Helbig et al. (2013) aboutit à autre formule approchée de f_p , dans une plage $\sim 30\%$ plus basse :

$$f_p \simeq 0.233 \times \cos(h) + 0.067 \quad (4)$$

3 MÉTHODE DE L'INTÉGRALE CYLINDRIQUE

Certains modèles de confort pour l'intérieur ou l'extérieur représentent le corps humain comme un cylindre de rayon r et de hauteur H Höpfe (1993); Gagge et al. (1986). On s'intéresse ici à l'absorption du flux solaire par la surface d'un cylindre dans le but de calculer la température moyenne rayonnante. La face supérieure du cylindre n'est pas considérée dans les calculs.

3.1 FLUX DIRECT

Dans la suite on définit comme plan azimutal 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 1a. Le flux direct φ_b pour un azimut 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 :

$$\varphi_b = \varphi_b^h \times \frac{\cos(i)}{\sin(h)} \quad (5)$$

On sait également calculer le rayonnement incident sur un plan azimutal pour une hauteur solaire h . Soit θ l'orientation du plan azimutal. Dans le repère lié au cylindre, $\theta = 0$ et la face éclairée est dans $\theta \in [-\pi/2; +\pi/2]$.

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 1b :

$$\phi_b = \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \varphi_b \cos(\theta) r H . d\theta = 2\varphi_b r H \text{ [W]} \quad (6)$$

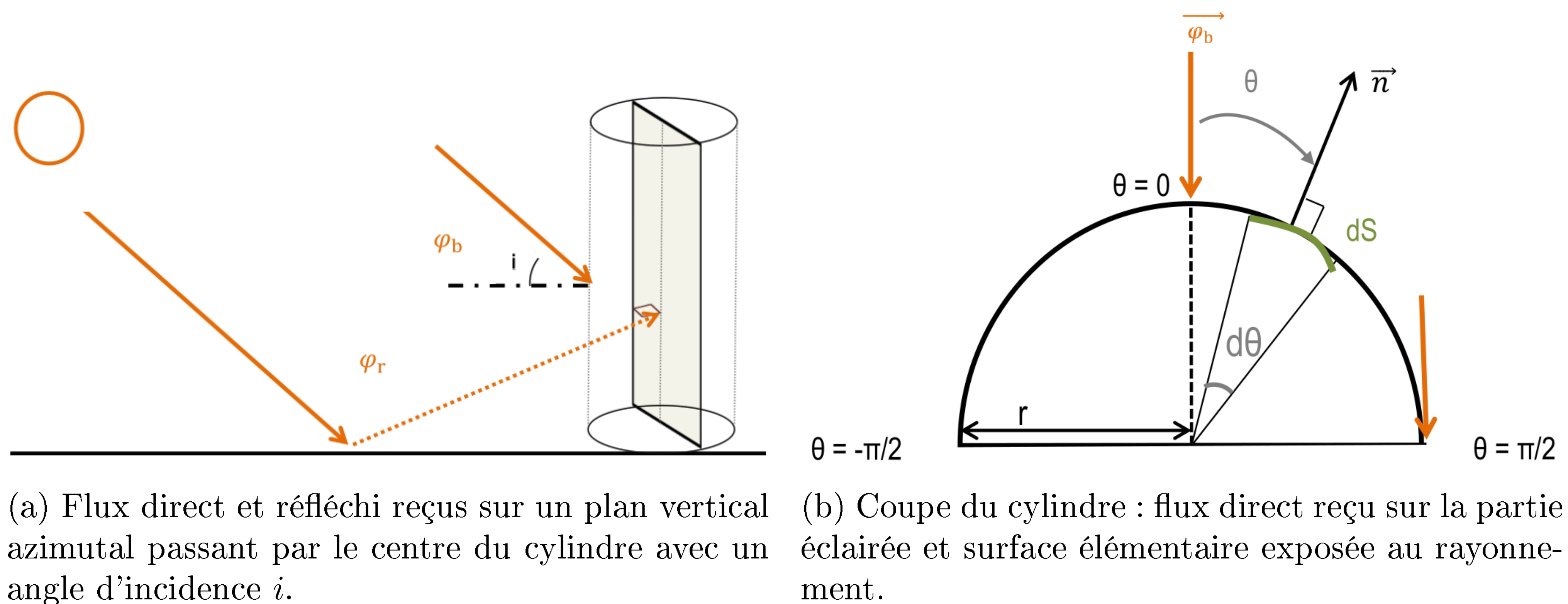
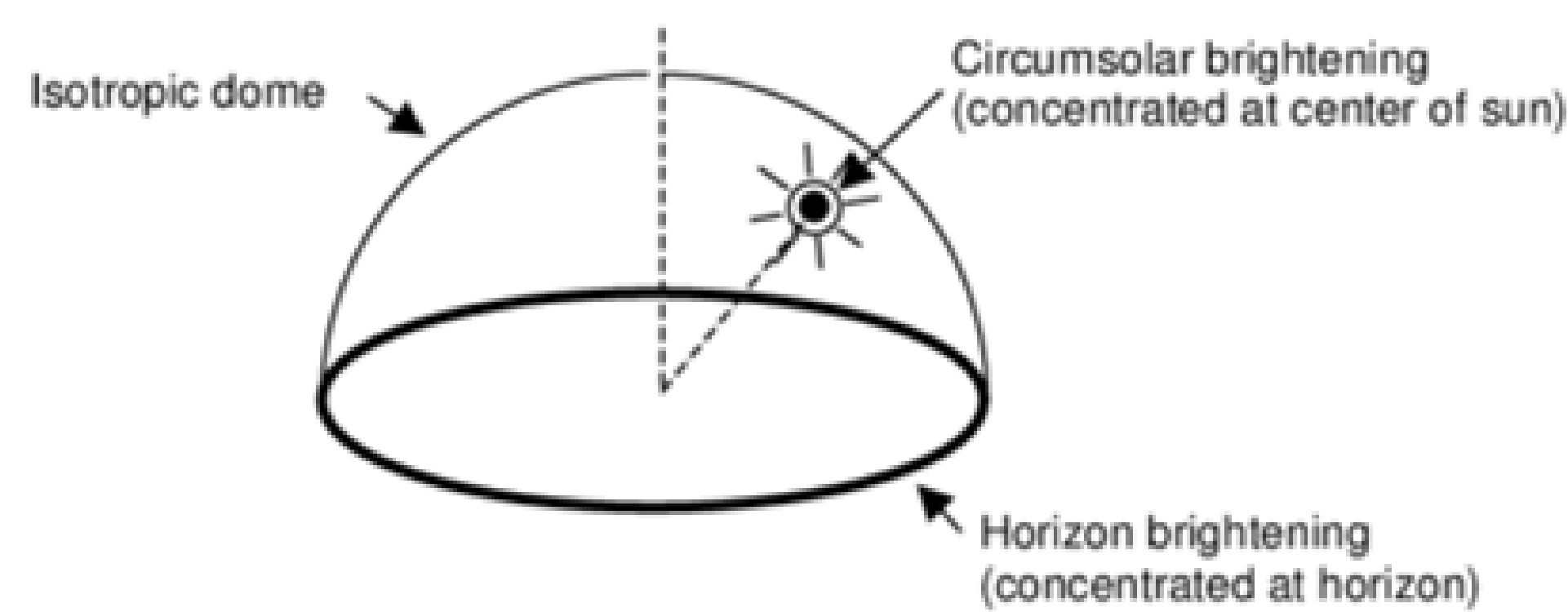


FIGURE 1. Schémas pour le modèle de l'intégrale cylindrique.

3.2 FLUX DIFFUS

Pour le flux diffus, le modèle anisotrope de Perez et al. (1987, 1990) est choisi comme étant le plus adapté à notre étude, d'après la revue bibliographique de Gros et al. (2011). Il intègre les contributions diffuses du dôme céleste, de l'horizon et du disque solaire, illustrées sur la Figure 2. Dans le modèle de Perez, la contribution du dôme céleste est considérée isotropique tandis que les autres contributions sont pondérées par des coefficients K_1, K_2 déterminés expérimentalement.


 FIGURE 2. Représentation géométrique du modèle diffus de Perez (source : [documentation DesignBuilder](#))

Le flux diffus φ_d sur un plan quelconque est donné à partir du flux diffus horizontal au sol φ_d^h de sorte que :

$$\varphi_d = \varphi_d^h \times \left((1 - K_1) \times \frac{1 + \cos(\beta)}{2} + K_1 \times \frac{a}{b} + K_2 \times \sin(\beta) \right) \quad (7)$$

où $\beta = \pi/2$ est l'inclinaison de la surface réceptrice, 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, 1990)). Les coefficients a et b sont respectivement les cosinus des angles d'incidence et solaire zénithal.

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 $\varphi_d^{K_2}$:

$$\varphi_d = \varphi_d^L + \varphi_d^{K_1} + \varphi_d^{K_2} \quad (8)$$

On considère alors que 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 (contribution K_2), tandis que la contribution circumsolaire (contribution K_1) ne s'applique qu'à une moitié éclairée du cylindre (la Figure 3 illustre ce propos). Pour cette dernière, le calcul intégral présenté dans l'équation (6) est réitéré. Le flux diffus reçu vaut ainsi :

$$\phi_d = 2rH\varphi_d^{K_1} + 2\pi rH \times (\varphi_d^L + \varphi_d^{K_2}) \quad (9)$$

Le flux total ϕ est alors la somme des flux direct et diffus $\phi = \phi_b + \phi_d$.

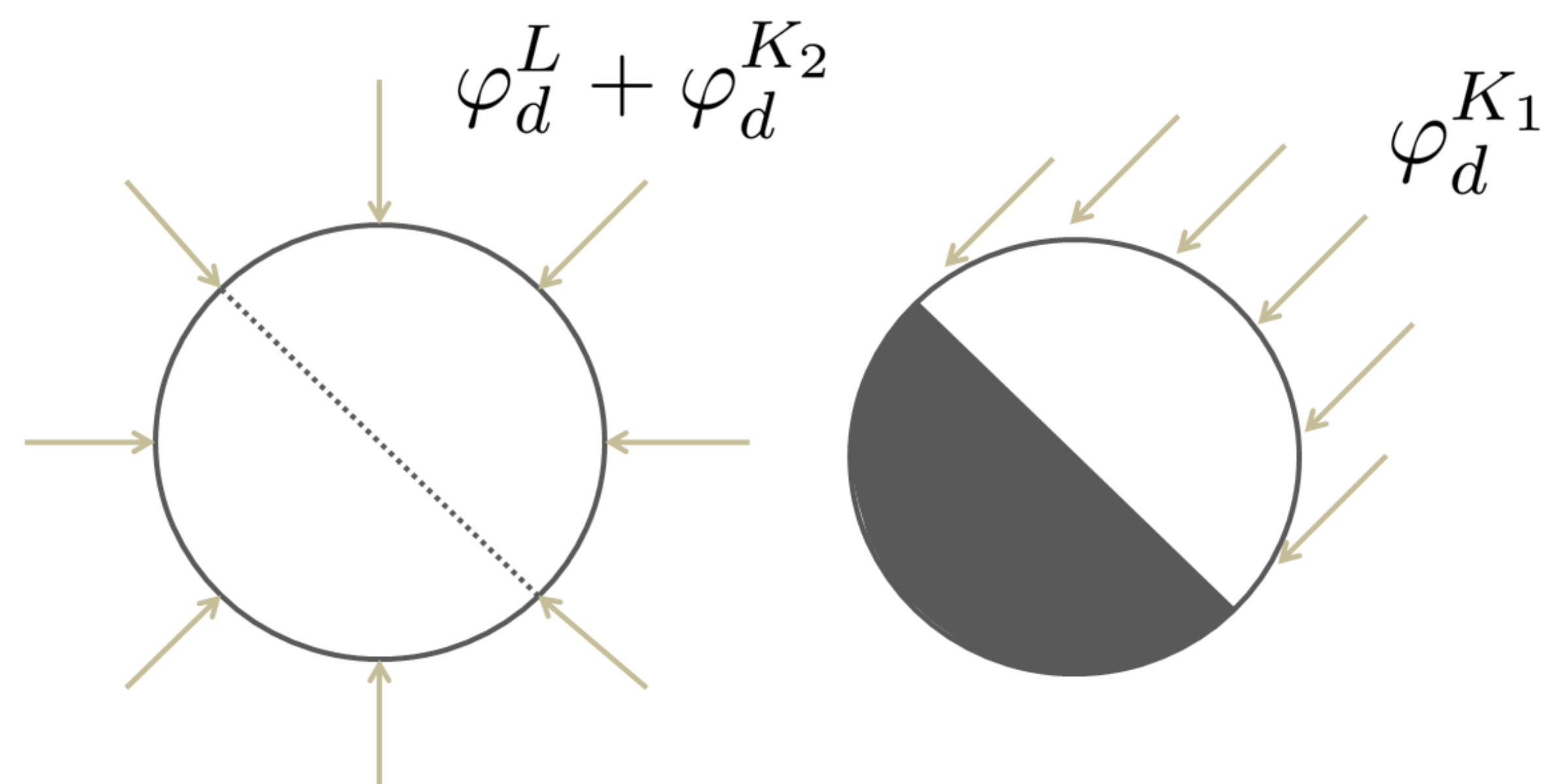


FIGURE 3. Différenciation des flux diffus : isotropie pour les contributions de la voûte céleste et de l'horizon (gauche), anisotropie pour la contribution circumsolaire (droite).

4 COMPARAISON DES MÉTHODES

Dans cette partie, on évalue la pertinence de l'intégrale cylindrique pour le calcul des flux reçus par un cylindre de rayon $r = 0.17$ [m] et de hauteur $H = 1.73$ [m]. La formule de Dubois ($S = 0.203 \times m^{0.425} \times H^{0.725}$) permet de déterminer la surface corporelle S puis le rayon du cylindre.

4.1 FLUX DIRECT

La méthode présentée pour le calcul du flux direct en section 3.1 est ici comparée avec la méthode du facteur de projection f_p dans la figure 4. On constate qu'un maximum est atteint en fin de journée lorsque la hauteur solaire est faible et que l'incidence des rayons directs est la plus proche de la normale à la surface du cylindre.

Le calcul intégral est en mesure de reproduire le flux direct reçu de manière similaire à la méthode du facteur de projection, ce qui conforte la démarche suivie. On constate une baisse du flux direct reçu en milieu de journée, car les rayons solaires deviennent tangents à la surface du cylindre, ce qui diminue le flux incident reçu du fait du cosinus de l'angle incident.

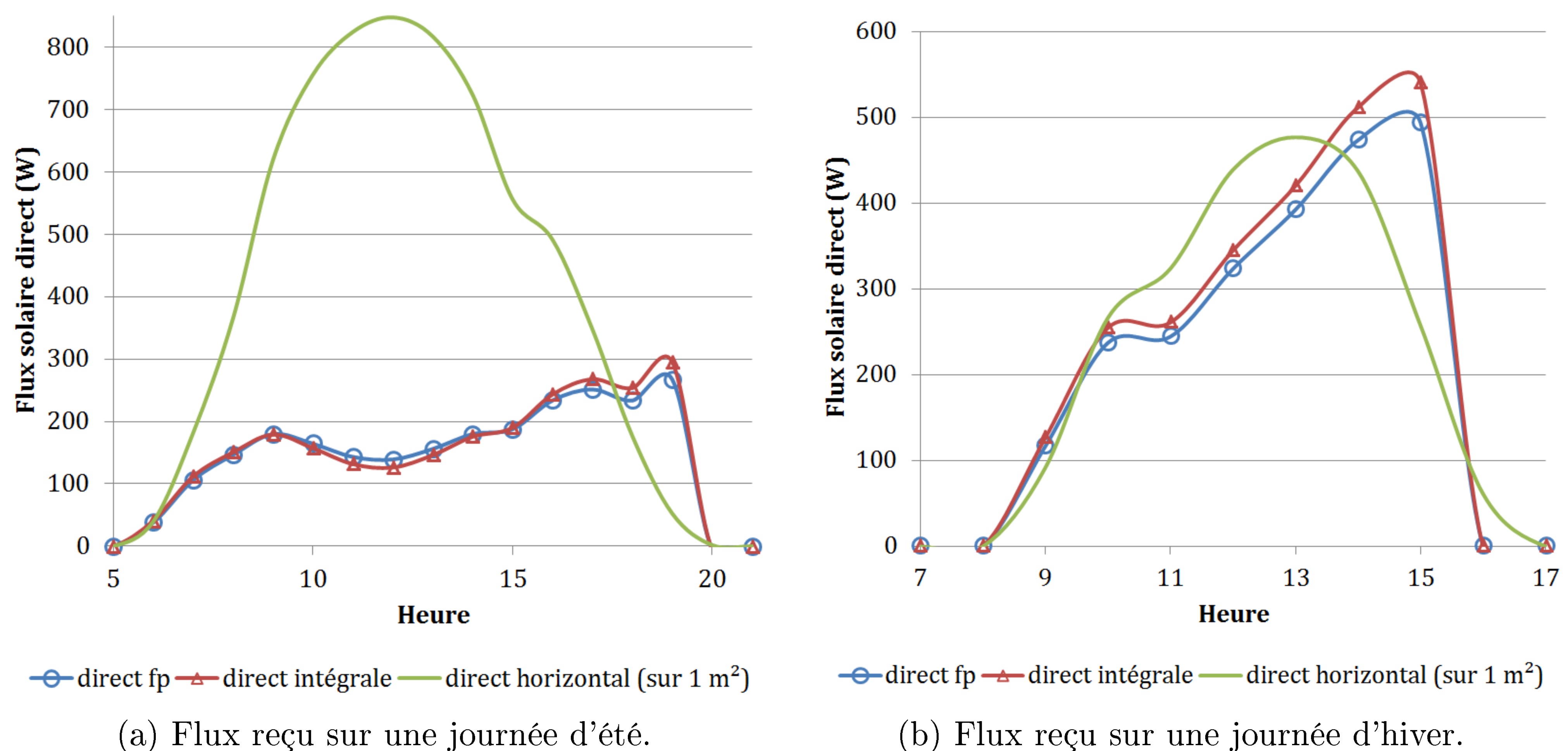


FIGURE 4. Comparaison des méthodes f_p (équation (3)) et de l'intégrale (équation (6)) pour le flux direct.

Les résultats très proches laissent à penser que la formule (3) est déterminée de manière équivalente à l'équation (6), bien qu'aucune référence n'ait pu être trouvée à ce sujet. Les différences

entre les flux obtenus pourraient provenir du choix d'un couple (r, H) différent lors du calcul intégral.

4.2 FLUX DIFFUS

On compare ici le modèle de flux diffus de Perez et al. (1990) appliqué au cylindre selon le modèle anisotrope de l'équation (9) avec un modèle isotrope tel que celui de De Dear & Brager (2001). Les résultats présentés sur la figure 5 montrent qu'en été le flux diffus reçu, calculé de manière anisotrope, est plus faible que le flux obtenu avec l'hypothèse d'isotropie. En hiver, le phénomène inverse est observé : le flux diffus calculé avec l'hypothèse d'isotropie est inférieur au flux anisotrope. La position plus basse du soleil entraîne une contribution plus importante du flux circumsolaire $\varphi_d^{K_1}$ en hiver (l'inverse est également vrai pour l'été).

On notera que le calcul intégral pour la contribution circumsolaire développé d'après la méthode de Perez dans l'équation (9) occasionne une légère baisse du flux reçu en milieu de journée en été (Figure 5a). Ceci est lié au fait que seul un demi-cylindre est éclairé. Pour le cas hivernal étudié (Figure 5b), cette baisse n'est pas observable.

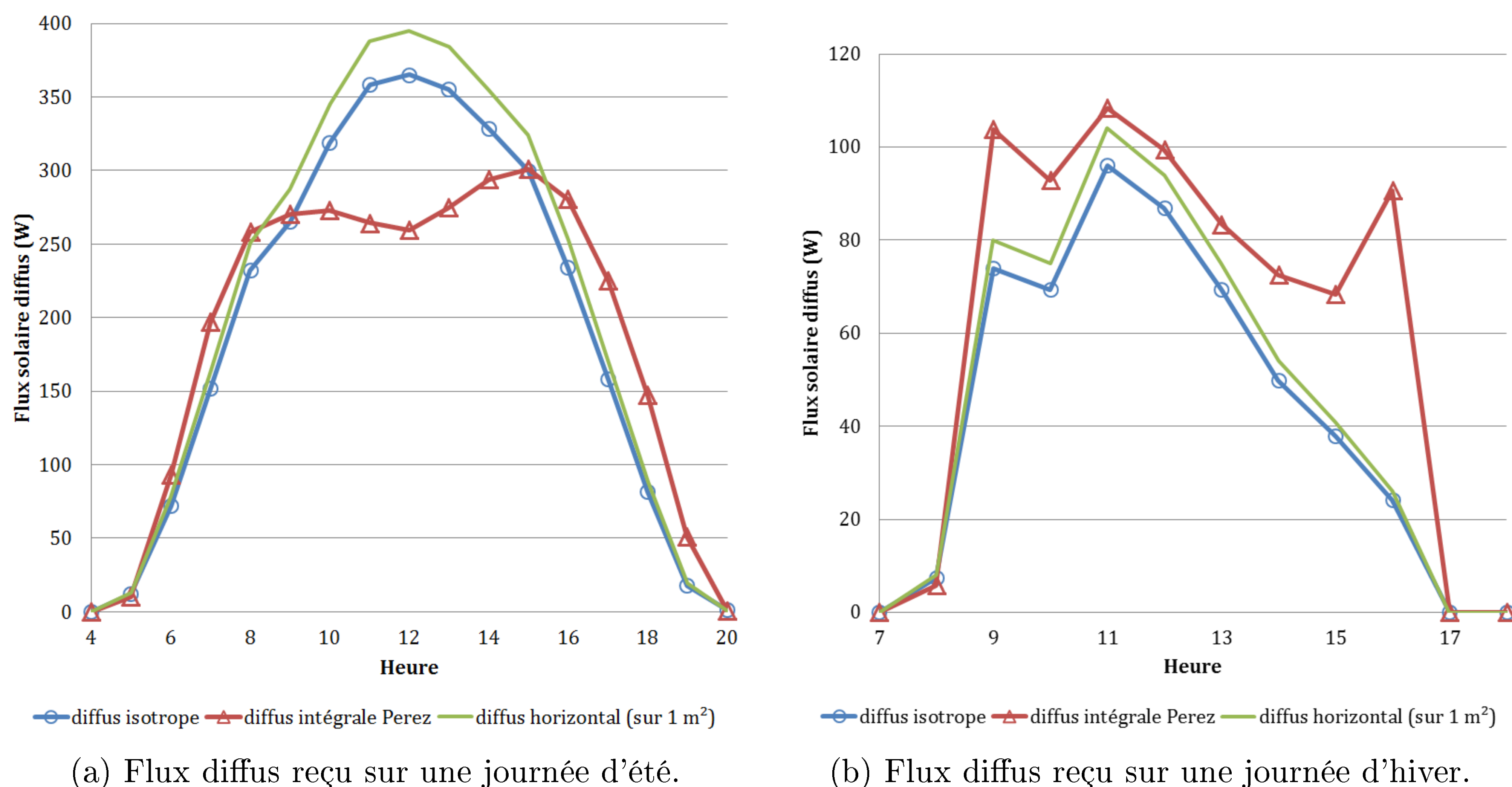


FIGURE 5. Comparaison du flux diffus sur le cylindre entre la méthode isotrope et l'équation (9).

4.3 FLUX TOTAL

Nous avons vu en section 4.1 que le flux direct reçu par un cylindre est sujet à une baisse en milieu de journée. Cette chute a des raisons géométriques : l'angle d'incidence des rayons sur la surface verticale est faible lorsque la hauteur solaire est importante. De même, la comparaison du point 4.2 a montré l'existence d'une chute zénithale liée à la contribution circumsolaire du modèle de Perez.

La Figure 6 montre la somme des flux direct et diffus sur le cylindre. On peut remarquer la baisse marquée du flux reçu vers 12h en été sur la figure 6a. Pour le cas hivernal, cette baisse n'est pas visible et le flux solaire reçu est globalement plus élevé : en effet les méthodes proposées pour le calcul des flux direct (section 3.1) et diffus (section 3.2) donnent des valeurs de flux légèrement plus importantes que les méthodes classiques.

Dans la littérature, le phénomène de rechute zénithale (aussi appelé "*daytime relapse*") a été observé de manière expérimentale Kántor et al. (2014) et numérique Lindberg et al. (2008)

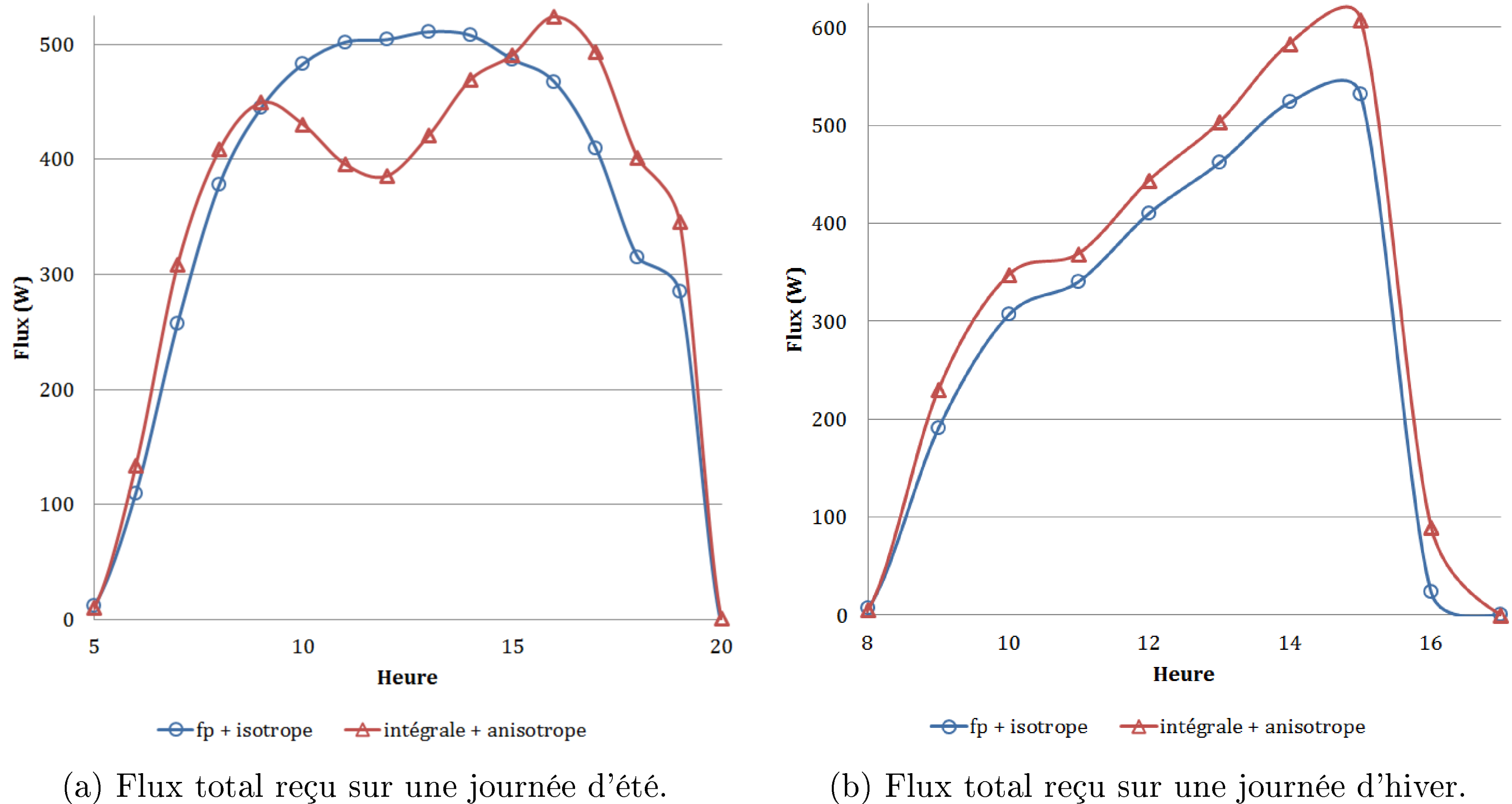


FIGURE 6. Flux totaux reçus sur le cylindre

en situations estivales. Il consiste en un affaiblissement du flux reçu autour du zénith tel que présenté sur la Figure 6a. Le modèle développé reproduit ce comportement.

5 CONCLUSION

La méthode de calcul des flux solaires sur un cylindre présentée dans ce travail montre un faible surcoût calculatoire par rapport aux méthodes classiques de détermination des flux directs et diffus, respectivement par la méthode du facteur de projection et l'hypothèse de l'isotropie.

Pour le flux direct, la méthode du calcul intégral reproduit fidèlement celle du facteur de projection. Il a ainsi été montré que la formule (3) est probablement issue d'un calcul intégral similaire.

Pour le calcul du flux diffus on propose une adaptation originale du modèle reconnu de Perez Perez et al. (1990), issu de l'état de l'art. Cette adaptation consiste à inclure l'anisotropie de la composante circumsolaire du flux diffus pour calculer la contribution diffuse au flux reçu sur le cylindre.

La méthode a de plus l'avantage d'être cohérente avec la représentation cylindrique du corps humain utilisée dans les indicateurs de confort Höppe (1993); Gagge et al. (1971). Elle reproduit des phénomènes observés de manière expérimentale et numérique Kántor et al. (2014); Lindberg et al. (2008).

Pour des raisons de concision, les flux direct et diffus réfléchis n'ont pas été traités. Ils peuvent cependant être pris en compte de la même manière. En effet la Figure 1a montre que l'angle d'incidence i sur la paroi est le même que celui du flux direct.

La routine de calcul du flux selon la méthode décrite ici pourra être téléchargée à l'adresse suivante https://github.com/eddes/AREP/blob/master/code_flux_integrale.py.

NOMENCLATURE

α	coefficient d'absorption courtes longueur d'ondes
β	inclinaison de la paroi réceptrice
ϕ	flux total [W]
ϕ_b	flux direct [W]
ϕ_d	flux diffus [W]
σ	constante de Boltzmann
ε	émissivité
φ^\perp	densité de flux total sur un plan orthogonal au rayonnement [W/m ²]
φ_b	densité de flux direct [W/m ²]
φ_b^h	densité de flux direct sur un plan horizontal [W/m ²]
φ_d	densité de flux diffus [W/m ²]
φ_d^h	densité de flux diffus sur un plan horizontal [W/m ²]
a	maximum entre 0 et $\cos(i)$
b	maximum entre le cosinus de 85 et le cosinus de l'angle solaire zénithal
f_p	facteur de projection solaire
H	hauteur du cylindre
h	hauteur solaire
h	hauteur solaire
i	angle d'incidence sur le plan considéré
K_1	coefficient de pondération de l'éclairement circumsolaire
K_2	coefficient de pondération de l'éclairement de l'horizon
r	rayon du cylindre
T_r	température radiante
T_r^*	température radiante modifiée incluant les flux solaires

RÉFÉRENCES

- De Dear, R. & Brager, G. S. (2001). The adaptive model of thermal comfort and energy conservation in the built environment. *International journal of biometeorology*, 45(2), 100–108.
- Gagge, A., Fobelets, A., & Berglund, L. (1986). A standard predictive index of human response to the thermal environment. *ASHRAE Transactions*, 14.
- Gagge, A., Stolwijk, J., & Nishi, Y. (1971). An effective temperature scale based on a simple model of human physiological regulatory response. *ASHRAE Transactions*, 77.
- Gros, A., Bozonnet, E., & Inard, C. (2011). Modelling the radiative exchanges in urban areas : A review. *Advances in Building Energy Research*, 5(1), 163–206.

- Helbig, A., Baumüller, J., & Kerschgens, M. J. (2013). *Stadtklima und Luftreinhaltung*. Springer-Verlag.
- Höppe, P. (1993). Heat Balance Modelling. *Experientia*.
- Höppe, P. (1999). The physiological equivalent temperature – a universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment. *International Journal of Biometeorology*, 43.
- Kántor, N., Lin, T.-P., & Matzarakis, A. (2014). Daytime relapse of the mean radiant temperature based on the six-directional method under unobstructed solar radiation. *International journal of biometeorology*, 58(7), 1615–1625.
- Lindberg, F., Holmer, B., & Thorsson, S. (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.
- Perez, R., Seals, R., Ineichen, P., Stewart, R., & 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., & 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 (pp. 279–283).

Vers une optimisation intégrée des bâtiments basée sur un environnement permettant l'interopérabilité des outils numériques

G. Fraisse¹, L. A. Serafim Guardini², Shyam^a, F. Wurtz², X. Brunotte³, P. Enciu³, B. Peuportier⁴, M. Robillart⁴, M. El-mankibi⁵, N. Stathopoulos⁵, S. Truchet⁶

¹LOCIE-USMB, Savoie Technolac, 73376 Le Bourget-du-Lac,

²Université Alpes-G2ELAB, 21 Avenue des Martyrs, 38000 Grenoble, France

³Vesta-System, 22, avenue Doyen Louis Weil, 38 000 Grenoble

⁴Mines ParisTech, PSL Research University, CES – Centre d'efficacité énergétique des systèmes Paris, France

⁵LGCB-ENTPE, 3 rue Maurice Audin, 69518 Vaulx-en-Velin, France

⁶Albedo Energie, 17 Avenue du Lac Léman, 73370 Le Bourget-du-Lac, France

RESUME. L'optimisation des performances est devenue une démarche classique pour la conception et le contrôle des systèmes énergétiques, y compris le secteur du bâtiment. Contrairement à l'approche séquentielle habituelle, une conception de bâtiment intégré est plus efficace puisque l'optimum d'un système peut être différent de celui obtenu en séparant ses composants. Il est donc nécessaire d'optimiser le design en considérant le bâtiment dans son ensemble, attentif à sa dynamique (enveloppe, système et occupants), à son environnement, et à sa durée de vie, notamment dans la perspective du changement climatique. Ceci entraîne des difficultés importantes liées au temps de calcul du fait de l'explosion combinatoire, liée aux variables de décision et aux incertitudes des paramètres, lors de l'optimisation. Dans cet article, nous présentons une méthodologie nécessaire pour résoudre un tel problème d'optimisation multi-objectif en utilisant des modèles de substitution ou calcul parallèle pour obtenir l'optimum global dans un temps de calcul raisonnable. L'objectif est également d'évaluer les fonctions de performance avec différents outils qui doivent être interopérables. Deux études de cas sont également présentées.

MOTS-CLÉS : Optimisation multicritère, interopérabilité, aide à la décision

ABSTRACT. Performance optimization has become a standard approach for the design and control of energy systems, including the building sector. Contrary to the usual sequential approach, a holistic building design is more efficient since the optimum of a system can be different from the one obtained by separating its components. It is thus necessary to optimize the design by considering the building as a whole, attentive to its dynamics (envelope, system and occupants), environment, and its lifetime, particularly in the perspective of the climate change. This brings significant difficulties related to calculation time because of the combinatorial explosion, related to the decision variables and parameters uncertainties, during the optimization. In this paper we present a methodology seen necessary to solve such multi-objective optimization problem by using surrogate models or parallel computing to obtain the overall optimum in a reasonable computing time. The goal is also evaluating the performance functions with different tool that must be interoperable. Two case studies are also presented.

KEYWORDS: multi-objective optimization, interoperability, decision-making.

1. INTRODUCTION

Les avancées solides dans les techniques de calcul et les méthodes d'optimisation conduisent à des applications de simulation pour l'étude des systèmes d'ingénierie complexes. L'optimisation des

performances du bâtiment est un phénomène dynamique et complexe dans lequel le chercheur utilise généralement un modèle de simulation dynamique pour les objectifs souhaités, par exemple, réduction de la consommation d'énergie, réduction de l'impact environnemental, optimisation des coûts, confort thermique, etc. (Garber, 2009). Les paramètres de décision ayant la plus grande influence sur la performance correspondent généralement aux phases de début de conception, par exemple le croquis architectural incluant les choix géométriques et structuraux. Mais d'autres paramètres définis dans la conception détaillée peuvent également être optimisés. La performance environnementale est évaluée à l'aide de l'analyse du cycle de vie (ACV) (Polster et al, 1996), qui intègre plusieurs indicateurs : la consommation d'énergie primaire et les émissions de CO₂, mais aussi d'autres critères liés, comme la santé humaine et biodiversité. La prise en compte d'un ensemble de critères aussi large n'est pas courante. L'ACV dynamique (Roux et al, 1996) semble plus appropriée que l'approche statique standard pour évaluer les impacts en s'appuyant sur les résultats de la simulation d'énergie dynamique.

Les principales phases des études d'optimisation des bâtiments sont le pré-traitement (formulation du problème d'optimisation), déroulement de l'optimisation (surveillance, contrôle et détection des erreurs) et le post-traitement (interprétation des résultats) (Nguyen et al, 2014). La plupart des recherches sur l'optimisation des bâtiments utilisaient l'approche à objectif unique (Elvins, 2013), mais les problèmes d'optimisation de la conception du bâtiment dans le monde réel ont simultanément des critères opposés, par exemple : la consommation d'énergie minimale par rapport au confort thermique maximal; investissement et coût opérationnel, etc. (Hamdy et al, 2011). Par conséquent, les auteurs optimisent les systèmes énergétiques et l'enveloppe du bâtiment grâce à l'optimisation multi-objectif. La meilleure solution alternative a été identifiée pour le moindre impact environnemental du bâtiment en utilisant le principe d'analyse du cycle de vie en tenant compte des nombreux critères économiques et environnementaux (Andipova et al, 2014). Le modèle d'optimisation multi-objectif a été utilisé par (Carreras et al, 2015) qui minimise à la fois le coût et l'impact environnemental liés à la consommation d'énergie en phase opérationnelle et de construction. En utilisant le modèle d'optimisation multi-objectif (Wu et al, 2017) minimisent les coûts du cycle de vie et les émissions de gaz à effet de serre grâce à l'optimisation simultanée du système énergétique du bâtiment et son réaménagement avec des pompes à chaleur et des systèmes d'énergie renouvelable. Avec plus de deux fonctions objectives, Penna (Penna et al, 2015) considère les économies d'énergie, le coût et le confort thermique comme trois fonctions objectives pour estimer l'énergie totale optimale sur un bâtiment incluant les systèmes énergétiques et l'enveloppe.

Dans l'optimisation de conception efficace en énergie des bâtiments, les algorithmes couramment utilisés peuvent être divisés en trois catégories, à savoir: algorithmes de recherche à base de gradient, algorithmes évolutifs et algorithmes hybrides (Terzidis, 2006). Les méthodes d'optimisation de calcul appliquées à la conception de bâtiments durables ont été passées en revue dans (Evins, 2013). Machairas (Machairas et al, 2014) a présenté une revue sur les algorithmes utilisés dans l'optimisation de la conception de bâtiment basée sur la performance. Cependant, Attia (Attia et al, 2013) aborde les lacunes et les besoins d'intégration des outils d'optimisation de la performance des bâtiments dans la conception des bâtiments à énergie quasi-nulle. Les variables dynamiques telles que le prix de

l'énergie, le coût d'investissement et le changement climatique sur toute la durée de vie du bâtiment introduisent de l'incertitude. Cela conduit à une optimisation robuste qui augmente le nombre de simulations à effectuer et augmente le temps de calcul. Cependant, le but de la conception de bâtiments à énergie de nos jours est de réduire le temps de calcul en utilisant en particulier un modèle de substitution (ou « surrogate model »). Carreras (Carreras et al, 2016) minimise les coûts et l'impact sur l'environnement en utilisant un modèle de substitution basé sur une interpolation spline cubique. Ils ont montré que la mise en œuvre du modèle de substitution prenait environ 1 jour, soit environ 8 fois moins que le temps consommé par le modèle original dans Energy+ (plus de 7 jours).

Un modèle de substitution comprend principalement :

- un échantillonnage des entrées pour calculer une réponse d'un modèle de référence pour construire une base de données pour former le modèle de substitution,
- puis la construction d'un modèle de substitution utilisant une méthode appropriée, par exemple une fonction de base radiale (Bornatico et al, 2013), Krigeage (Eguía et al, 2016 ; Hopfe et al, 2012 ; Tresidder et al, 2012), machine à vecteurs de support (Support Vector Machine -SVM) (Eisenhower et al, 2012), réseau de neurones artificiels (Artificial Neural Network - ANN) (Manier et al, 2010)
- et enfin la validation du modèle de substitution.

Dans la littérature, une approche de type Kriging a été utilisée avec une technique d'optimisation globale efficace (EGO) dans des problèmes d'optimisation mono-objectif (Jones, 2010 ; Ladevie et al, 2012) ainsi que pour des problèmes multi-objectifs en générant un modèle de substitution pour chaque fonction objective (Koch et al, 1999 ; Wilson et al, 2001). Pañao (Pañao et al, 2008) a présenté une méthode basée sur un algorithme génétique pour optimiser les formes urbaines pour les climats à moyenne latitudes et a conclu que l'optimisation basée sur la latitude dépendait de l'optimisation des performances thermiques. Le réseau de neurones artificiels (ANN) avec l'algorithme génétique NSGA II multi-objectif est utilisé pour optimiser le confort thermique et la consommation d'énergie dans une maison d'habitation (Magnier et Haghghat, 2010). ANN réduit significativement le coût d'optimisation (3 semaines) par rapport au coût d'optimisation sans ANN (10 ans). Une optimisation multivariée utilisant un schéma d'optimisation non linéaire avec modélisation de bâtiment basée sur des interactions physiques, techniques et économiques a été présentée dans (Peippo et al, 1999) pour trouver l'optimum économique. Le modèle de krigeage est utilisé dans les problèmes d'optimisation multi-objectifs de nombreux domaines tels que le magnétisme (Berbecea et al, 2010), l'aérodynamique (Baudoui, 2012) et les chemins de fer (Berbecea, 2012). Dans les problèmes d'optimisation de la conception des bâtiments, l'approche de type Kriging a été largement utilisée dans la conception de bâtiments multi-objectifs. Un algorithme d'optimisation de l'essaim de particules basé sur le tri non dominé (Non-dominated Sorting-based Particle Swarm Optimization - NSPSO) associé à la méthode de krigeage avec procédure d'échantillonnage adaptatif a été utilisé pour réaliser l'optimisation multi-objectif d'une salle de bureau typique (Li et al, 2017). Dans cette étude, une réduction de 46,6% du temps de traitement a été rapportée. Une étude récente sur l'optimisation de la conception des bâtiments (Wood et Eames, 2017) a rapporté que le Krigeage améliore légèrement une approche de

type NSGA II ; cependant, les auteurs de cette étude recommandent que plus de recherches soient réalisées pour tester cette méthode pour des problèmes complexes d'optimisation concernant la conception des bâtiments. Aijazi (Aijazi, 2017) a comparé plusieurs techniques de modélisation de substitution courantes et a révélé que les fonctions de base radiales paramétriques et le krigeage sont des techniques de régression très précises pour prédire la consommation énergétique des bâtiments avec des temps de calcul de 5 ordres de grandeurs plus rapides que les simulations Energy+ détaillées. Les auteurs ont conclu que l'impact du changement climatique sur un bâtiment dépend de son emplacement et de son type.

Dans l'étude d'optimisation que nous proposons ici, nous avons utilisé un modèle de substitution par Krigeage pour deux cas à savoir : (i) une optimisation utilisant les fonctions de test de Camel et Rosenbrock et (ii) une étude de cas de simulation de bâtiment utilisant le logiciel Energy+. L'approche d'optimisation basée sur le métamodèle adaptatif a été considérée en effectuant une série de processus d'optimisation multiples en utilisant le modèle de Krigeage. Le processus d'échantillonnage est effectué après la conception d'un plan d'expérience, et l'algorithme NSGA-II a été utilisé pour le processus d'optimisation. Nous proposons de mettre en œuvre l'approche dans un framework logiciel existant, appelé CADES dédié à la conception et à l'optimisation (Delinchant et al, 2007). Ce système est basé sur une approche de composants logiciels, permettant la connexion de modèles avec des algorithmes d'optimisation et une solution de pré ou de post-traitement pour définir, résoudre et analyser des problèmes d'optimisation. La méthode est basée sur une approche de composant logiciel offrant une solution d'interopérabilité avec le logiciel de simulation principal du domaine (Gaaloul et al, 2011) et est conforme à la norme de composant logiciel émergent FMU1. L'originalité de cet environnement est d'offrir une proposition d'intégration, dans un même environnement, de l'interopérabilité, de l'optimisation multi-objective et de la connexion avec les modèles de substitution de Krigeage et le calcul parallèle. L'objectif est de simplifier l'utilisation de ces techniques, afin qu'elles puissent être utilisées par les utilisateurs finaux dans les bureaux d'études.

2. METHODOLOGIE

2.1. MODELE DE KRIGEAGE

La méthode de Krigeage est définie comme une interpolation optimale basée sur la régression par rapport aux valeurs observées des points de données alentours, pondérée en fonction des valeurs de covariance spatiale. Le champ aléatoire de Krigeage est composé de composantes résiduelles et de tendance. La composante résiduelle a une moyenne stationnaire nulle et a une covariance constante (Krige, 1951). Il y a trois types de krigeage, à savoir : le krigeage simple (la composante de tendance est constante sur tout le domaine et la moyenne est connue) ; le krigeage ordinaire (la composante de tendance est constante dans le voisinage local de chaque point d'estimation et la moyenne est inconnue) ; Krigeage universel (composé d'une fonction de tendance non aléatoire et d'une fonction résiduelle à valeur réelle).

¹ Voir également la référence suivante pour la description de l'approche des composants logiciels utilisée pour l'interopérabilité <http://muse-component.org/>

L'outil d'optimisation a été développé et intégré dans CADES en faisant appel à l'outil Openturns. L'ensemble des données d'entrée (un échantillon initial d'individus avec une distribution uniforme entre les seuils minimale et maximale) est généré en utilisant un plan d'expérience pondérée aléatoirement avec la technique Latin Hypercube Sampling (LHS). Le modèle de Krigeage se rapproche du modèle de référence en utilisant le tableau des individus d'entrée (apprentissage), et donc produit le tableau des performances d'apprentissage (sortie) correspondant aux individus apprenants. Nous calculons le méta-modèle sur un tableau d'individus apprenants et calculons les erreurs relatives sur les points d'apprentissage. La covariance entre deux échantillons $(s, t) \in R^n$ est définie comme suit :

$$Cov(s, t) = E[(X_s - m(s))(X_t - m(t))^t] \quad (1)$$

Pour obtenir la matrice de covariance, nous discrétisons la fonction de covariance stationnaire avec des mailles de 50x50. En optimisant avec NSGA II, nous minimisons la covariance pour la prédiction précise du méta-modèle de Krigeage.

La sortie du méta-modèle de Krigeage est un vecteur aléatoire gaussien avec fonction de covariance stationnaire définie comme suit :

$$Y(x) = f(x)^T \cdot \beta + Z(x) \quad (2)$$

Où $f(x)^T \cdot \beta$ est un modèle linéaire généralisé et est $Z(x)$ un processus gaussien de moyenne nulle avec fonction d'autocorrélation stationnaire C^{stat} :

$$E[Z(x)_s Z(\tilde{x})] = \sigma^2 \cdot C_{\theta}^{stat}(x - \tilde{x}) \quad (3)$$

Cette sortie est donnée comme argument d'entrée pour le calcul du vecteur aléatoire gaussien au nouveau point.

2.2. LE PLAN D'EXPÉRIENCES ADAPTATIF (DESIGN OF EXPERIMENTS – DOE)

Le plan d'expérience adaptatif permet à la fois d'ajuster le modèle de Krigeage dans l'espace global et à proximité des individus optimaux (frontière de Pareto). Le schéma de la méthodologie est donné sur la Figure 1.

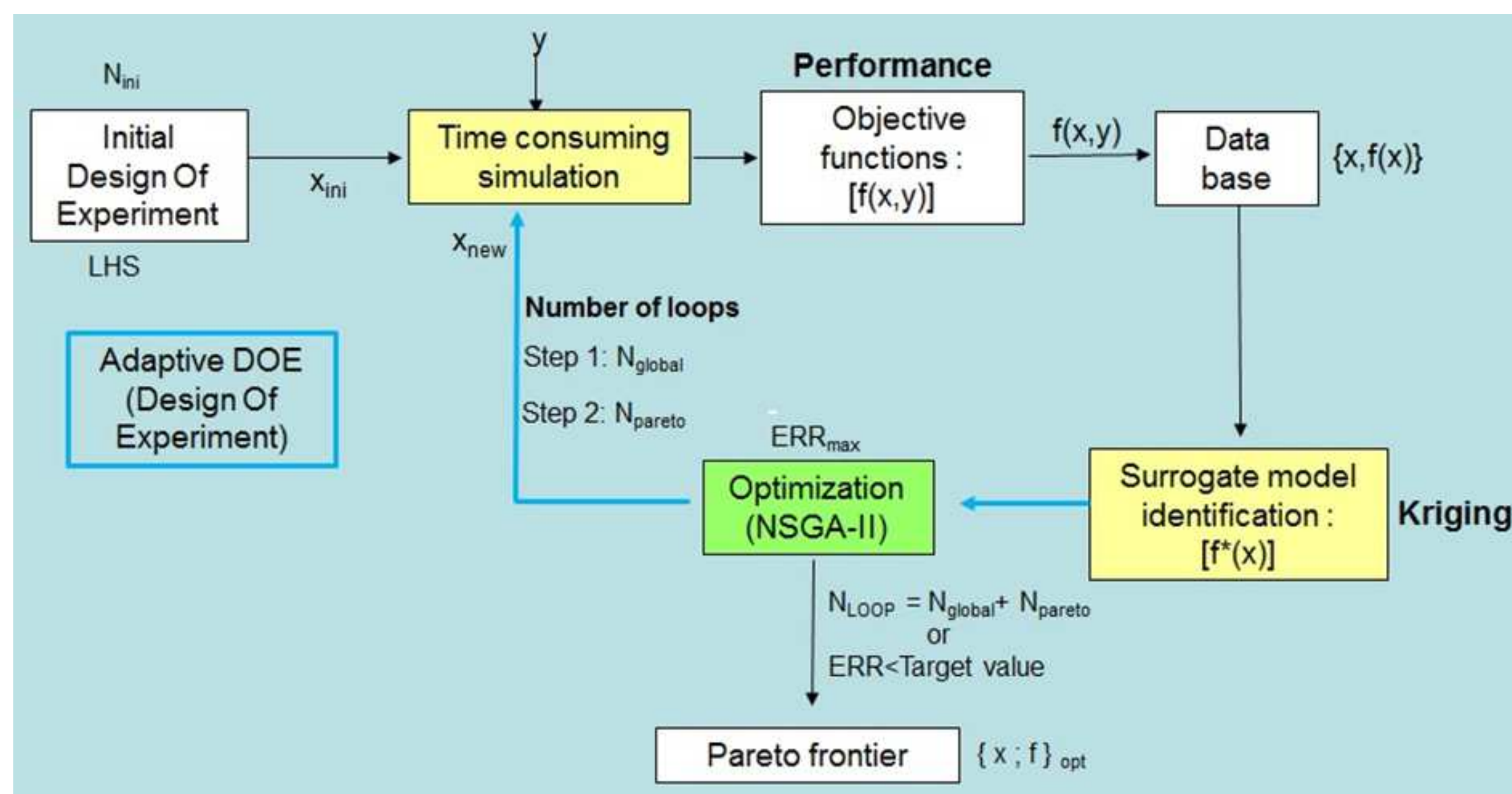


Figure 1 - Méthodologie adoptée pour l'optimisation à l'aide du méta-modèle Krigage

L'algorithme commence par échantillonner les points de données initiaux en utilisant la technique Latin Hypercube Sampling (LHS). L'ensemble de points est ensuite évalué en utilisant le modèle chronophage (time consuming model). Le modèle de substitution de Krigage est identifié pour toutes les fonctions objectifs. À l'étape I, l'individu ayant la covariance maximale est sélectionné en utilisant l'algorithme NSGAII et ajouté à la base de données. Le but de la première étape est d'explorer l'ensemble de l'espace de conception (global). À l'étape II, le modèle de Krigage qui vient d'être identifié est ensuite utilisé pour exécuter le processus d'optimisation multicritères en utilisant également l'algorithme NSGA-II pour trouver les solutions optimales (frontière de Pareto). Le nouvel individu ayant la covariance maximale dans la frontière de Pareto est ajouté à la base de données pour une nouvelle itération dans l'identification du modèle de Krigage. Le processus d'optimisation se termine par le nombre maximal de boucles non supérieur à la somme du nombre d'individus dans chaque étape ($N=N_{LHS} + N_{global} + N_{pareto}$) ou si la cible d'erreur minimale est atteinte.

2.3. MISE EN ŒUVRE DU PLAN D'EXPERIENCE DANS UN ENVIRONNEMENT ERGONOMIQUE

La méthodologie du DoE (plan d'expérience) décrite précédemment a été mise en œuvre et intégrée dans le framework CADES (Delinchant et al, 2007). La Figure 2 montre comment une connexion peut être facilement réalisée avec des modèles Energy+ et TRNSYS, démontrant les possibilités d'interopérabilité implémentées qui doivent être aussi simples que possible pour le concepteur final dans le bureau d'études (vers une approche «plug and play»).

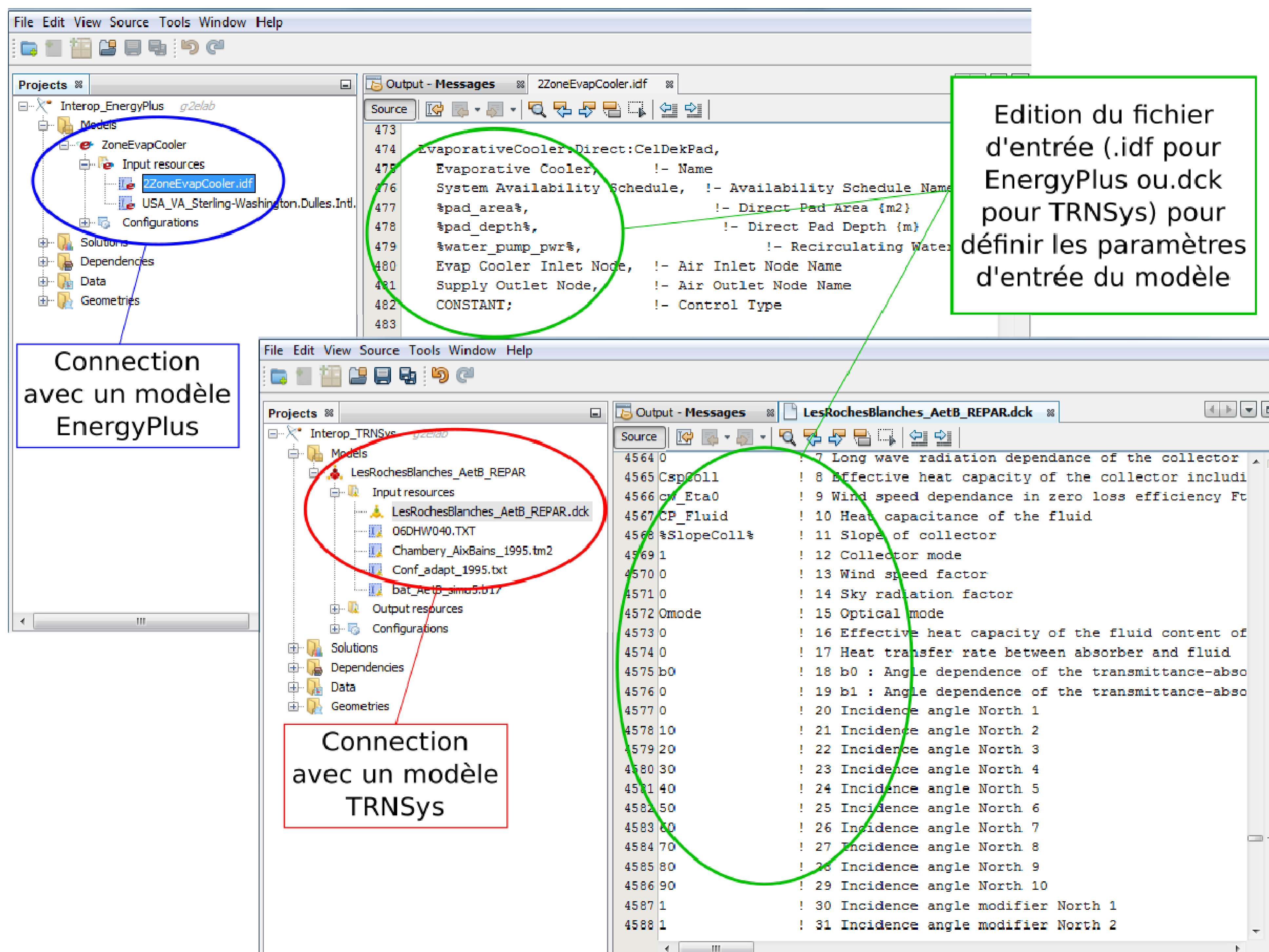


Figure 2 - Connexion avec un modèle Energy+ et un modèle TRNSYS Black-Box (modèles chronophages) - Interopérabilité dans l'outil proposé

Dans l'approche DoE tel que implémentée dans le framework CADES, on introduit simplement les paramètres de configuration suivants : N_{LHS} , N_{global} , et N_{pareto} . Les individus initiaux correspondent à un nombre d'individus (N_{LHS}) qui peuvent être évalués dans le premier échantillonnage LHS de l'espace de conception. Le nombre de points pour l'amélioration de la surface (N_{global}) correspond au nombre maximum d'individus pouvant être testés sur le modèle chronophage dans la première boucle d'amélioration de la méthodologie, lorsque de nouveaux échantillons sont ajoutés pour minimiser la covariance maximale de la surface de Krigeage (étape I de la méthodologie). Le nombre de points pour l'amélioration de Pareto (N_{pareto}) correspond au nombre d'individus qui peuvent être testés sur le modèle chronophage dans la deuxième boucle d'amélioration de la méthodologie, lorsque de nouveaux échantillons sont ajoutés pour améliorer le front de Pareto du problème d'optimisation défini (étape II de la méthodologie). Ceci permet de contrôler le nombre maximum d'appels pour le modèle chronophage, qui ne peut pas être supérieur à la somme des 3 paramètres précédents $N = N_{LHS} + N_{global} + N_{pareto}$. L'utilisateur doit également définir deux paramètres supplémentaires: l'Erreur relative acceptable de surface (Surface acceptable relative error) correspond à l'erreur requise à l'étape I : si l'erreur est inférieure à cette valeur pour le point ayant la covariance maximale, l'échantillonnage sur les modèles chronophages s'arrête à l'étape I. Le second paramètre est l'Erreur relative acceptable Pareto (Pareto acceptable relative error) qui correspond à l'erreur requise à l'étape II : si l'erreur est inférieure à cette valeur, pour le point ayant la covariance maximale, l'échantillonnage sur les modèles chronophages s'arrête pour l'étape II. Pour y parvenir, une connexion a été établie avec la bibliothèque

de Krigeage implémentée dans Openturns². Une option permet également de paralléliser le calcul sur les modèles qui prennent du temps sur les ordinateurs multi-cœurs (non présentés dans ce document).

3. RESULTATS ET DISCUSSION

Dans cette section, nous présentons les résultats pour les fonctions de test et pour l'étude de cas d'un bâtiment.

3.1. ETUDE DE CAS N ° 1 : LES FONCTIONS DE TEST

Les fonctions Chameau et Rosenbrock sont sélectionnées comme fonction de test pour la présente étude d'optimisation multi-objectif. Nous connaissons la frontière de Pareto de ces fonctions de test dont l'évaluation est rapide. Les deux fonctions de test sont minimisées dans l'intervalle (-2, 2) pour x_1 et x_2 (paramètres de décision). Les erreurs relatives acceptables aux étapes I et II sont maintenues égales à 10^{-4} et 10^{-5} , respectivement.

3.1.1. Les fonctions Camel et Rosenbrock

La fonction Chameau (dite fonction « camel ») et Rosenbrock sont données par les équations (3) et (4) respectivement :

$$f_1(x_1, x_2) = \left(4 - 2.1x_1^2 + \frac{x_1^4}{3} \right) x_1^2 + x_1 x_2 + 4x_2^2(x_2^2 - 1) \quad (4)$$

$$f_2(x_1, x_2) = (1 - x_1)^2 + 100.0 * (x_2 - x_1^2)^2 \quad (5)$$

3.1.2. Surfaces de réponse à la fin du plan d'expérience

Les surfaces de réponse du modèle de référence et du modèle de Krigeage avec le nombre d'individus dans la phase LHS, après l'étape I (phase globale) et après l'étape II (phase de Pareto) pour les fonctions Chameau et Rosenbrock sont montrées sur la Figure 3.

² Voir : <http://www.openturns.org/>

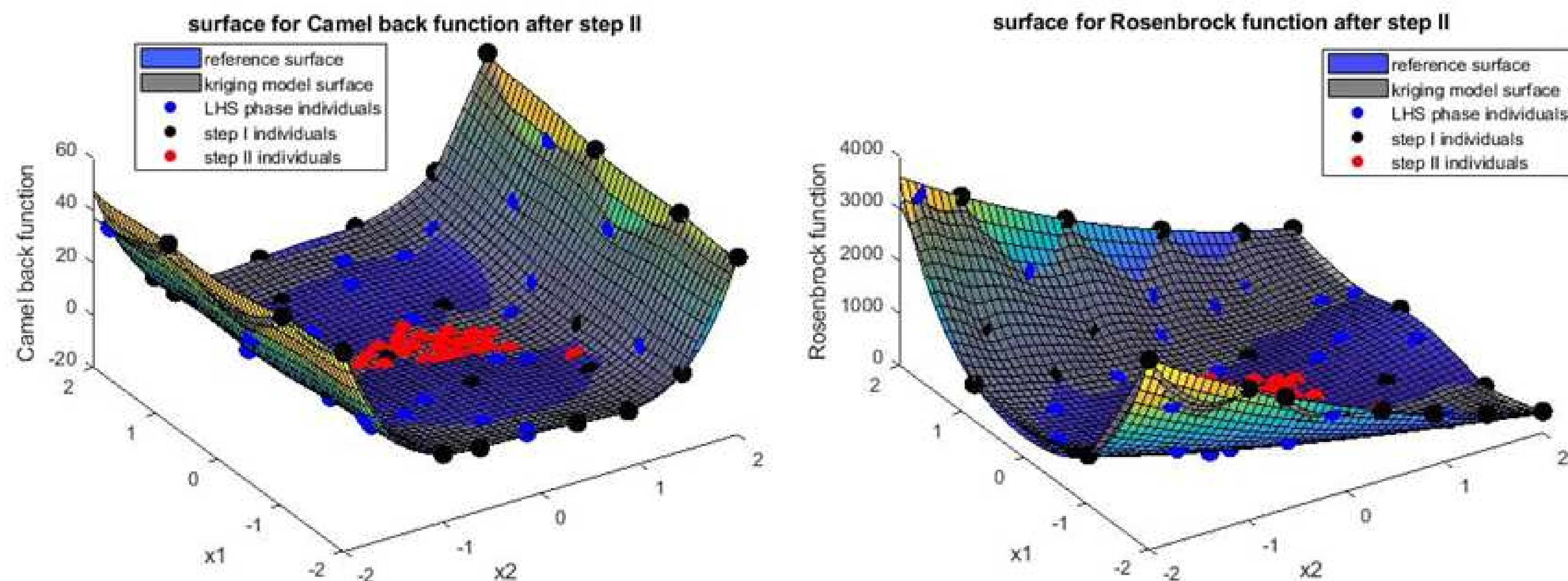


Figure 3 - Surfaces pour les fonctions de test et modèle de Krigage après l'étape II

Ces surfaces ont été obtenues pour $N = 75$ variables réparties en 25 individus dans chaque étape. On peut observer à partir de ces surfaces que les individus sont répartis sur tout l'espace en phase LHS et en étape I (avec de nombreux points sur les frontières de l'étape I) mais qu'au cours de l'étape II les individus sont proches de la frontière de Pareto.

3.2. ETUDE DE CAS N ° 2: BATIMENT

Le bâtiment étudié possède quatre niveaux (R+3). Il a une surface habitable d'environ 1200m². Le bâtiment est composé de 17 appartements, d'un palier, d'un garage/vidé sanitaire et grenier. Chacune de ces zones a été simulée comme une zone thermique. Le modèle a donc 20 zones thermiques au total. Il est situé à Chambéry (Savoie, France) à une altitude de 235m.

Les murs des bâtiments, le plancher intermédiaire, les cloisons et le plancher sont en béton. Les murs sont isolés par l'extérieur. Le plancher du vide sanitaire a une isolation en polystyrène; la toiture terrasse est isolée par du polyuréthane et le plancher des combles est isolé par de la laine de verre. Les fenêtres des chambres sont en double vitrage PVC avec un coefficient global de transfert de chaleur $U_w = 1.3 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$. Le nombre d'occupants dans un appartement est rattaché au nombre de pièce dans l'appartement. L'occupation pour différentes heures pendant la semaine et le week-end varie de 25% - 50% - 100%. Les gains de chaleur interne des logements (liés à la cuisine, aux appareils électriques etc.) sont pris en compte sur une base horaire et varient entre $1,5 \text{ W} / \text{m}^2$ et $7,68 \text{ W} / \text{m}^2$. Une ventilation naturelle et du refroidissement ont été pris en compte du 15 juillet au 15 août. Le débit d'infiltration est pris égal à $0,15 \text{ vol.h}^{-1}$. La ventilation mécanique varie en fonction de la taille de l'appartement.

Des simulations thermiques dynamiques ont été exécutées avec le logiciel Energy+ 8.5. Ce logiciel modélise le confort thermique, la ventilation, les infiltrations, les gains de chaleur internes et les charges de chauffage et de refroidissement du bâtiment. Le fichier météo (Meteonorm) utilisé est une météo typique de la ville de Chambéry (Savoie, France).

3.2.1. Paramètres de décision et fonctions objectives

Afin d'optimiser le bâtiment, des paramètres de décision et des fonctions objectives ont été définis. Les paramètres de décision utilisés pour tester l'outil et leur plage de variation sont présentés dans le tableau 1.

Tableau 1 - Paramètres de décision

Paramètres de décision	Plage de variation	Surface (m ²)
L'épaisseur de l'isolation des murs extérieurs	0.1 to 0.4m	906
L'épaisseur de la dalle du plancher intermédiaire	0.1 to 0.25m	869
L'épaisseur de l'isolation dans le plancher bas sur extérieur	0.1 to 0.4m	216
L'épaisseur de l'isolation dans de la toiture terrasse	0.1 to 0.4m	243
La valeur U_w des fenêtres	0.9 to 1.5 W/(m ² .K)	207
L'orientation du bâtiment	0 to 270 °	-

Les fonctions utilisées pour évaluer les paramètres de décision sont la somme des besoins de chauffage et de refroidissement fournies par le système au bâtiment et le coût lié aux changements. Les besoins de chauffage et de refroidissement sont directement calculés par Energy+. Ils représentent la demande d'énergie du bâtiment. Les équations de coût comprennent le prix du matériel et l'installation. Les coûts sont exprimés en €/m² HT:

- Coût de variation de l'épaisseur de l'isolation du mur = $520.1x + 73.602$
- Coût de variation de l'épaisseur du plancher bas sur extérieur = $53 + (50 \times (x - 0.1))$
- Coût de variation de l'épaisseur de l'isolation de la toiture terrasse = $40.585e^{4.4882x}$
- Coût de variation de l'épaisseur de la dalle du plancher intermédiaire = $663.25y + 57.49$
- Coût de variation de U_w pour la fenêtre = $110 \times \left(1 - \frac{1}{1 + e^{-30(z-1.15)}}\right) + 455$

Où, x est l'épaisseur d'isolation [m], y est l'épaisseur de la dalle de béton [m] et z est U_w [W/m²K].

L'objectif est de trouver l'optimum entre la somme des besoins de chauffage et de refroidissement qui doit être la plus faible possible, et le coût de l'opération qui doit également être minimisé.

3.2.2. Résultats

Nous avons lancé l'optimisation avec $N = 75$ individus comme dans le cas des fonctions de test mais la frontière de Pareto obtenue après l'étape II n'était pas plus proche de la frontière de référence de Pareto (obtenue directement avec NSGA II et Energy+). Cela peut être dû aux 4 paramètres de décision au lieu de 2 paramètres de décision pour les fonctions de test. Par conséquent, nous avons lancé l'optimisation pour 105 individus. Les frontières de Pareto pour le modèle de référence et après chaque étape sont données à la Figure 4. On peut observer que la frontière de Pareto n'est pas purement convexe comme dans le cas de la fonction de test, ce qui reflète la complexité du problème de l'étude de cas qui peut être attribuée à un nombre accru de paramètres de décision. Pour le modèle de référence avec NSGA II, des simulations 1321 sont nécessaires pour exécuter l'optimisation. Le temps nécessaire pour une simulation est d'environ 7,5 minutes. Par conséquent, le temps requis pour exécuter l'optimisation avec Energy+ est d'environ 7 jours. Avec le modèle de Krigeage, nous avons exécuté l'optimisation avec 105 individus, donc le temps requis pour exécuter l'optimisation avec le modèle de Krigeage est de 13 heures, ce qui est environ 13 fois plus rapide.

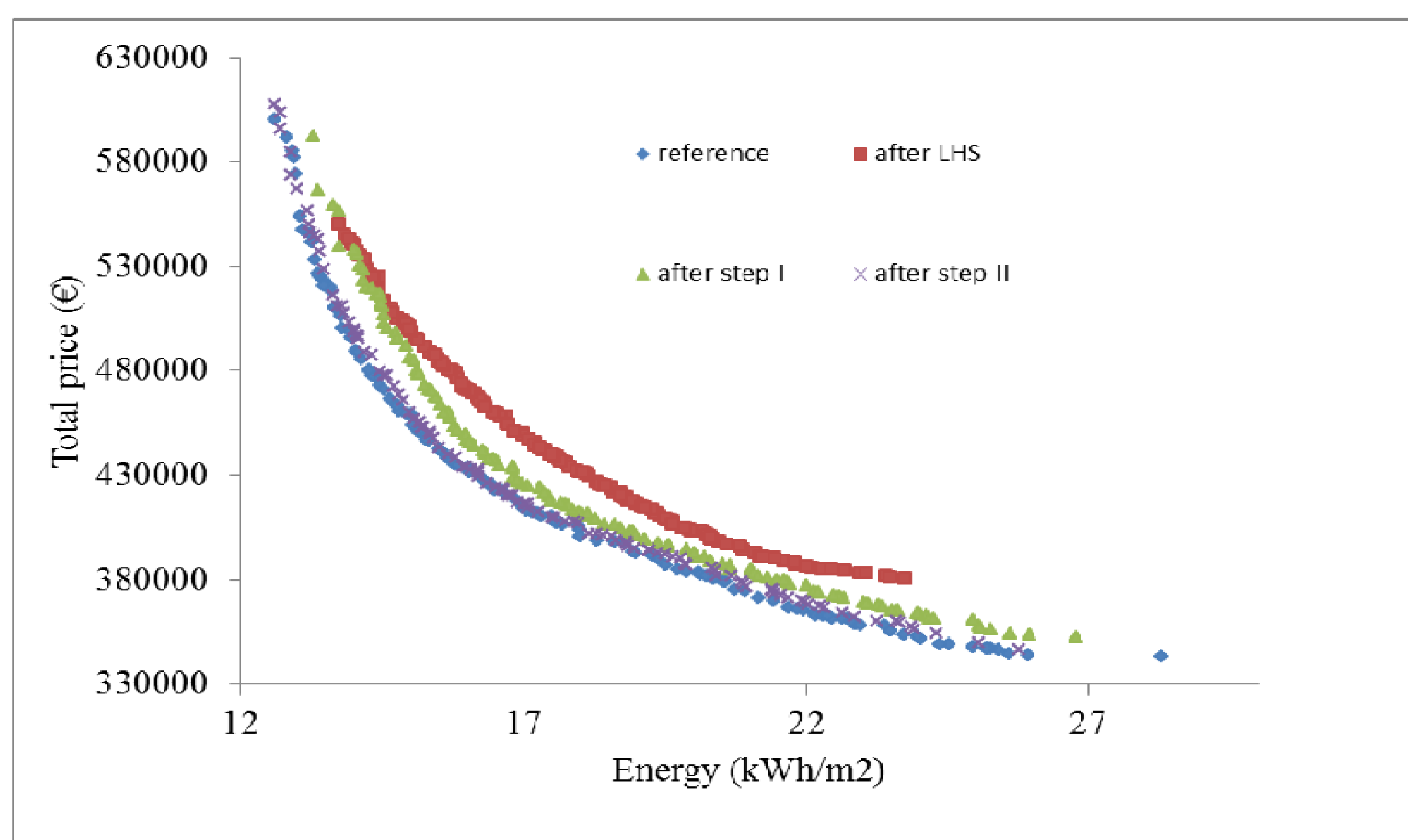


Figure 4 - Frontière de Pareto pour besoin d'énergie et prix total des modifications pour le bâtiment (étude de cas)

Dans ce travail, notre objectif principal était de valider l'approche développée dans CADES. Bien sûr, un travail supplémentaire est nécessaire pour analyser précisément la solution optimale comme dans (Fraisie et al, 2017).

3.2.3. Réalisation d'une ACV en complément

Dans cette première étape, l'ACV a été réalisée dans une plate-forme informatique séparée incluant également la simulation et l'optimisation de l'énergie (Recht et al, 2016). Les paramètres de décision pris en compte étaient l'épaisseur d'isolation dans les murs, les toits et les planchers, le type de vitrage (double ou triple), le système de ventilation (avec ou sans récupération de chaleur). Selon les résultats d'optimisation présentés sur la Figure 5, un coût supplémentaire limité de 40 € par m² de surface de plancher permettrait de réduire de 23% les émissions de CO₂ tout au long du cycle de vie du bâtiment par rapport au scénario de base.

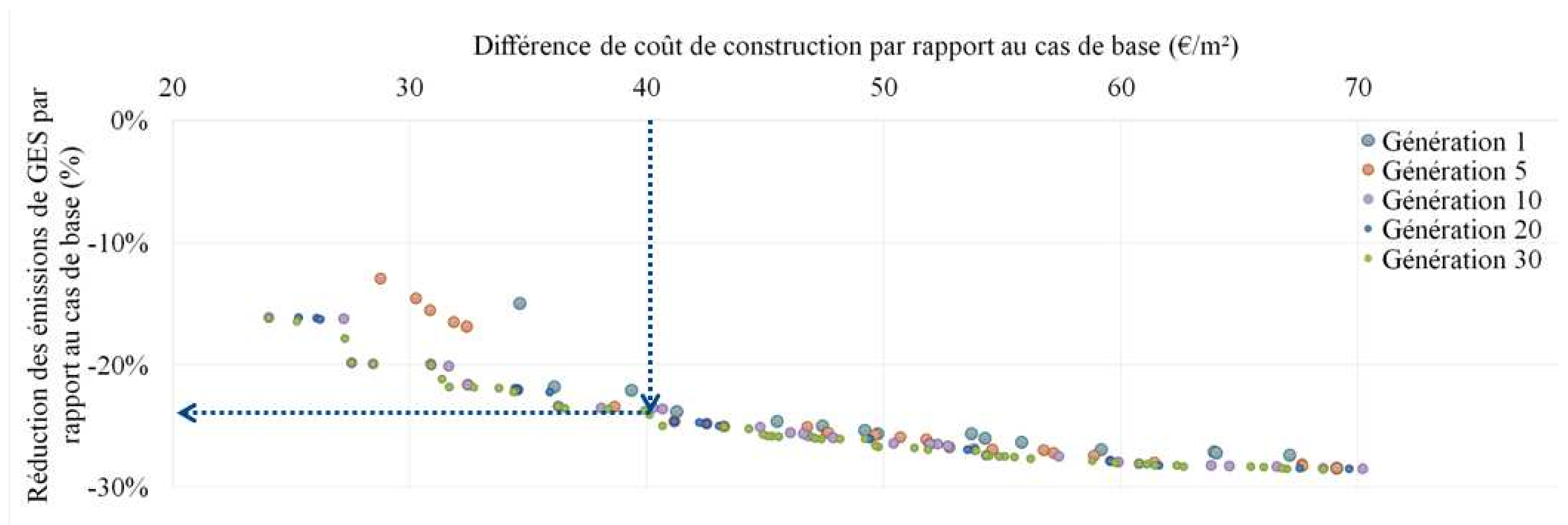


Figure 5 - Frontière de Pareto pour les émissions de CO2 et les coûts de construction (étude de cas)

Des solutions techniques correspondantes ont été identifiées, par exemple, 85% des solutions du frontière de Pareto incluent la récupération de chaleur sur l'air de ventilation, mais seulement 40% utilisent le triple vitrage. L'intégration de l'ACV dans l'outil présenté ci-dessus apporterait donc de nouvelles possibilités d'écoconception.

4. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Une stratégie globale pour faire un plan d'expérience sur des modèles chronophages a été proposée dans cet article. Le déploiement d'une telle approche peut être une tâche complexe pour les utilisateurs finaux dans les bureaux d'études. C'est pourquoi l'approche a été mise en œuvre dans un cadre dans lequel les aspects complexes de l'informatique, comme l'interopérabilité ou la connexion avec les bibliothèques de Krigeage, sont encapsulés. L'idée est d'offrir, pour l'utilisateur final, une approche aussi fermée que possible à partir d'une approche «plug & play». La perspective est maintenant, de travailler sur des tutoriels et des illustrations de l'utilisation de la méthodologie et du logiciel sur des exemples réels. De cette manière, nous espérons que les futurs utilisateurs pourront non seulement utiliser l'approche, mais aussi comprendre, comment ils doivent la configurer et l'utiliser pour aller vers un processus de conception efficace.

Pour les fonctions de test, nous observons que, avec un nombre croissant d'individus, les valeurs R^2 s'approchent de 1, ce qui justifie l'exactitude du modèle de Krigeage. Le nombre d'individus qui donne la valeur R^2 près de l'unité dépend de la complexité de la fonction de référence. Comme observé à partir de l'étude de cas n° 2, avec la croissance du nombre des paramètres de décision, le nombre d'individus N nécessaires pour prédire le modèle avec précision a augmenté (de $N = 75$ à 105). Par suite, une étude plus approfondie est nécessaire avec différentes fonctions de test et une complexité croissante pour trouver le nombre minimum d'individus pour prédire la référence avec précision, en particulier dans la région du Pareto.

5. REMERCIEMENTS

Cette étude a été soutenue et financée par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR), dans le cadre de la convention de subvention n ° ANR-13-VBDU-0003-01, Acronyme INTENSE. Partenaires: LOCIE, LGCB, ARMINES, G2ELAB, CEA-INES, ALBEDO, FAURE, SYSTÈME VESTA

6. REFERENCES

- Aijazi A. N., Machine Learning Paradigms for Building Energy Performance Simulations [M. Sc. Thesis], Massachusetts Institute of Technology 2017.
- Antipova E., Boer D., Guillén-Gosálbez G., Cabeza L.F., Jiménez L., Multi-objective optimization coupled with life cycle assessment for retrofitting buildings, *Energy and Building* 2014; 82:92–99.
- Attia S., Hamdy M., O'Brien W., Carlucci S., Assessing gaps and needs for integrating building performance optimization tools in net zero energy buildings design. *Energy and Buildings* 2013; 60:110-124.
- Baudoui V., Optimisation robuste multiobjectifs par modèles de substitution [Ph. D. Thesis]. University of Toulouse, France, 2012.
- Berbecea A., Multi-level approaches for optimal system design in railway applications [Ph.D. Thesis]. Ecole Centrale de Lille, PRES Université Lille Nord de France 2012.
- Berbecea A. C., Kreuawan S., Gillon F., Brochet P., A Parallel Multiobjective Efficient Global Optimization: The Finite Element Method in Optimal Design and Model Development. *IEEE Transactions on Magnetics* 2010; 46(8):2868-2871.
- Bornatico R., Hüseyin J., Witzig A., Guzzella L., Surrogate modeling for the fast optimization of energy systems. *Energy* 2013; 57:653-662.
- Carreras J., Boer D., Guillén-Gosálbez G., Cabeza L.F., Medrano M., Jiménez L., Multi-objective optimization of thermal modelled cubicles considering the total cost and life cycle environmental impact, *Energy and Building* 2015; 88:335–346.
- Carreras J., Pozo C., Boer D., Guillén-Gosálbez G., Caballero J. A., Ruiz-Femenia R., Jiménez L., Systematic approach for the life cycle multi-objective optimization of buildings combining objective reduction and surrogate modeling. *Energy and Buildings* 2016; 130:506–518.
- Delinchant B., Duret D., Estrabaut L., Gerbaud L., Nguyen H. H., Du Peloux B., Rakotoarison H.L., Verdiere F., Bergeon S., An Optimizer using the Software Component Paradigm for the Optimization of Engineering Systems", F. WURTZ, COMPEL: The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering 2007; 26(2):368-379. <http://dx.doi.org/10.1108/03321640710727728>, <http://www.emeraldinsight.com/doi/full/10.1108/03321640710727728>)
- Eguía P., Granada E., Alonso J. M., Arce E., Saavedra A. Weather datasets generated using kriging techniques to calibrate building thermal simulations with TRNSYS. *Journal of Building Engineering* 2016; 7:78-91.
- Eisenhower B., O'Neill Z., Narayanan S., Fonoberov V. A., Mezić I., A methodology for meta-model based optimization in building energy models. *Energy and Buildings* 2012; 47:292-301.
- Evins R., A review of computational optimisation methods applied to sustainable building design. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2013; 22:230-245.

- Fraisse Gilles, Souyri Bernard, Axaopoulos Ioannis, Rouchier Simon. Decision-making based on network visualization applied to building life cycle optimization. *Sustainable Cities and Society*, Volume 35, November 2017, Pages 565-573
- Gaaloul S., Delinchant B., Wurtz F., Verdiere F., Software Components For Dynamic Building Simulation. 12th Conference of International Building Performance Simulation Association IBPSA 2011, November, 14-16; Sydney Australia, https://www.ibpsa.org/proceedings/BS2011/P_1719.pdf
- Garber R., Optimization stories: The impact of building information modelling on contemporary design practice. *Architectural Design* 2009; 79(2):6-13.
- Hamdy M., Hasan A., and Siren K., Applying a multi-objective optimization approach for Design of low-emission cost-effective dwellings. *Building and Environment* 2011; 46:109-123.
- Hopfe C. J., Emmerich M. T. M., Marijt R., Hensen J., Robust multi-criteria design optimisation in building design, Proceedings of first international conference on building simulation and optimization (BSO12); 2012 September 10-11; Loughborough, UK: 19-26.
- Jones D. R., A taxonomy of global optimization methods based on response surfaces. *Journal of Global Optimization* 2001; 21:345–383.
- Koch P. N., Simpson T. W., Allen J. K., Mistree F., Statistical approximations for multidisciplinary design optimization: The problem of size. *Journal of Aircraft* 1999; 36(1):275–286.
- Krige D. G., A statistical approach to some basic mine valuation problems on the Witwatersrand. *Journal of the Chemical, Metallurgical and Mining Society of South Africa* 1951; 52:119–139.
- Ladevie B., Thiers S., Fudym O., Gengembre E., Thuillier A., Garnier C., Peuportier B., Bouache T., Ginestet S., Lindner G., Dahluin, A., Limam K., AMMIS, Analyses multicritères et méthode inverse en simulation énergétique du bâtiment. Project AMMIS 2012 April. Technical Report No.: ANR-08-HABISOL-001.
- Li N., Cheung S.C.P., Li X., Tu J., Multi-objective optimization of HVAC system using NSPSO and Kriging algorithms-a case study. *Building Simulation* 2017; 10(5):769-781.
- Machairas V., Tsangrassoulis A., Axarli K., Algorithms for optimization of building design: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2014; 31:101-112.
- Magnier L., Haghghat, F., Multiobjective optimization of building design using TRNSYS simulations, genetic algorithm, and Artificial Neural Network. *Building and Environment*, 45(3), 2010, p. 739-746.
- Nguyen A. T., Reiter S., Rigo P., A review on simulation-based optimization methods applied to building performance analysis. *Applied Energy* 2014; 113:1043–1058.
- Panão M. J. N. O., Gonçalves H. J. P., Ferrão P. M. C., Optimization of the urban building efficiency potential for mid-latitude climates using a genetic algorithm approach. *Renewable Energy* 2008; 33(5):887–896.
- Peippo K., Lund, P. D., Vartiainen, E., Multivariate optimization of design trade-offs for solar low energy buildings. *Energy and Buildings* 1999; 29(2):189-205.
- Penna P., Prada A., Cappelletti F., Gasparella A., Multi-objectives optimization of Energy Efficiency Measures in existing buildings. *Energy and Buildings* 2015; 95:57-69.
- Polster B., Peuportier B., Blanc Sommereux I., Diaz Pedregal P., Gobin C., Durand E., Evaluation of the environmental quality of buildings towards a more environmentally conscious design. *Solar Energy* 1996; 57(3):219-230.

- Recht T., Schalbart P., Peuportier B., Ecodesign of a 'plus-energy' house using stochastic occupancy model, life-cycle assessment and multi-objective optimisation. Hamza N AND Underwood C. (Ed) Building simulation and optimisation, Third international building performance simulation association IBPSA-England 2016; Sep 12-14, Newcastle, United Kingdom.
- Roux C., Schalbart P., Assoumou E., Peuportier B., Integrating climate change and energy mix scenarios in LCA of buildings and districts. Applied Energy 2016; 184:619-629.
- Terzidis K. Algorithmic architecture. New York : Routledge. 2006.
- Tresidder E., Zhang Y., Forrester A. I. J., Acceleration of building design optimisation through the use of Kriging surrogate models. Proceedings of first international conference on building simulation and optimization (BSO12); 2012 September 10-11; Loughborough, UK: 1-8.
- Wilson B., Cappelleri D., W. Simpson T., and Frecker M., Efficient Pareto frontier exploration using surrogate approximations. Optimization and Engineering 2001; 2:31–50.
- Wood M., Eames M., Using Kriging regression to improve the stability and diversity in NSGA-II, Proceedings of the 15th IBPSA Conference 2017; Aug. 7-9; San Francisco, CA, USA: 363-369.
- Wu R., Mavromatidis G., Orehounig K., Carmeliet J., Multi-objective optimisation of energy systems and building envelope retrofit in a residential community. Applied Energy 2017; 190:634-649.

