

Actes Conférence IBPSA France 2016

3 - 24 mai 2016, Champs-sur-Marne

MESURE DE L'OCCUPATION POUR L'ÉVALUATION DE LA PERFORMANCE ÉNERGETIQUE DES BATIMENTS : PLAN DE MESURE ET INCERTITUDE

A. CAUCHETEUX*^{1,2}, M. AMAYRI³, S. PLOIX³

¹ Cerema, DLRCA, 23 avenue de l'Amiral Chauvin, BP 20069, 49136 Les Ponts de Cé cedex

² LARIS, EA7315 université d'Angers, 62 avenue notre dame du Lac, 49000 Angers

³ G-SCOP lab CNRS UMR5272, Grenoble Institute of Technology, 46 av Felix Viallet, 38031 Grenoble cedex 1

*antoine.caucheteux@cerema.fr

RESUME

Dans l'évaluation de la performance énergétique des bâtiments, la mesure de l'occupation est un paramètre clé. Dans cet article, plusieurs protocoles de mesure sont étudiés avec une granularité qui peut varier d'une pièce à une zone regroupant plusieurs bureaux. Pour chaque protocole et plan de mesures, on étudiera les incertitudes liées à la mesure de la présence de l'occupant et ses impacts sur l'incertitude concernant les apports internes globaux.

On obtient au final un comparatif des différentes méthodes au vu de l'incertitude résultante. Il est ainsi possible de donner des clés pour l'optimisation d'un plan de mesure en vue de l'évaluation de la performance énergétique des bâtiments.

Cette analyse est menée sur deux cas d'études situés à Angers et Grenoble.

INTRODUCTION

Dans le cadre de la mise en place de garantie de performance énergétique pour les bâtiments, l'évaluation de la performance est un verrou scientifique majeur. En effet, l'évaluation de celle-ci répond à un processus en plusieurs étapes liant mesures des caractéristiques réelles du bâtiment vis-à-vis de la performance énergétique (Caméra Infrarouge, perméabilité à l'air, qualité des réseaux aérauliques, etc.) et mesures dynamiques tout au long de la vie du bâtiment telles que consommations énergétiques, températures de consignes, etc. L'étape cruciale pour l'évaluation de la performance est la confrontation de ces mesures à des modèles de simulation. Son objectif est de pouvoir obtenir un modèle de simulation qui soit le plus représentatif possible de la réalité du bâti et de son occupation. C'est un problème mal défini (ou mal posé) puisque la quantité de mesures disponibles est le plus souvent

largement inférieure au nombre de variables du modèle.

Dans ce processus dit "de calage", il est reconnu que des analyses de sensibilité et d'incertitudes doivent être menées. Si les techniques employées sont désormais maîtrisées par la communauté scientifique [1-4], le problème étant plutôt d'optimiser les temps de calculs nécessaires, le verrou restant se situe au niveau de la connaissance et la caractérisation des incertitudes de mesures [5-7].

Dans le cadre de la mise en place de plans de mesure et vérification de la performance énergétique, pour sa garantie, il est préconisé par l'ASHRAE que le coût de ces mesures doit rester raisonnable. Il convient donc d'optimiser les plans de mesure en fonction d'incertitudes cibles.

Les analyses de sensibilité effectuées dans de nombreux projets montrent que les données d'occupation, sont des paramètres très influents sur les résultats de simulation.

L'occupation peut être définie comme [8] étant « la présence de personne dans le bâtiment et les actions (ou inactions) de ces occupants pour influencer l'environnement intérieur ». On dénombre donc un certain nombre de paramètres qui peuvent être liés à l'occupation comme la présence d'usagers, l'éclairage, l'ouverture des portes et fenêtres, la fermeture / ouverture de volets et rideaux, l'utilisation de divers appareils dégageant de la chaleur, etc...

Dans cet article, nous nous intéressons plus particulièrement à la présence de personnes dans le bâtiment. L'objectif est d'évaluer l'incertitude de la mesure de l'occupation d'une part, et de ses conséquences sur les apports internes récupérables d'autre part. Plusieurs protocoles de mesure et méthodes d'interprétation seront évalués. On donnera enfin des pistes pour l'optimisation des plans de mesure dans le cadre

de l'évaluation de la performance énergétique des bâtiments.

METHODE(S)

Introduction

D'après [9], une mesure (ou un mesurage) est un "processus consistant à obtenir expérimentalement une ou plusieurs valeurs que l'on peut raisonnablement attribuer à une grandeur".

Une mesure est une **estimation** de la valeur réelle de la grandeur que l'on veut mesurer. Une mesure contient donc une erreur. Une mesure est donc plus ou moins juste, et plus ou moins répétable.

On parle aussi d'erreur systématique (justesse) et d'erreur aléatoire (répétabilité). L'incertitude est la généralisation statistique de l'erreur.

La démarche générale pour estimer les incertitudes de mesure peut être décrite de la manière suivante :

- définir le paramètre d'intérêt et la grandeur physique mesurée correspondante
- définir comment on évalue la référence sur ces grandeurs physiques, c'est-à-dire la mesure permettant d'estimer cette grandeur de manière la moins incertaine possible
- définir l'ensemble de la méthodologie (mesure + calcul) permettant d'estimer la grandeur d'intérêt pour chaque dispositif
- en définir les sources d'incertitudes
- mettre en place une expérimentation permettant d'estimer les incertitudes
- réaliser l'analyse statistique.

Grandeurs physiques à évaluer

En terme d'évaluation de la performance énergétique, nous nous intéressons à l'énergie de chauffage. Pour cela, des modèles de simulation thermiques dynamique qui fonctionnent la plupart du temps au pas de temps horaire sont généralement utilisés.

Dans ce papier, les grandeurs physiques d'intérêt sont donc :

- le nombre d'occupant moyen présent dans un bâtiment (ou une partie du bâtiment) à chaque heure,
- les apports internes moyens dans un bâtiment ou une partie d'un bâtiment pour chaque heure.

Estimateur

Il existe un grand nombre d'estimateurs de la présence de l'occupant [10-12], reposant sur des protocoles de mesure variés :

- images,
- détections de mouvements,
- concentration en CO₂,
- bruit (sonomètre),
- consommations électriques...

ou la combinaison de plusieurs de ces mesures. Certains donnent directement la grandeur recherchée, d'autres s'appuient sur une modélisation du mesurage c'est-à-dire que la grandeur mesurée n'est pas directement la grandeur que l'on cherche à estimer.

Par la suite, le vocable "estimateur" regroupera le protocole de mesure et la modélisation du mesurage permettant d'obtenir une estimation de la grandeur physique recherchée.

Référence et échantillonnage

Une procédure de mesure de référence [9] est « une procédure de mesure considérée comme fournissant des résultats de mesure adaptés à leur usage prévu pour l'évaluation de la justesse de valeurs mesurées obtenues à partir d'autres procédures de mesure pour des grandeurs de la même nature, pour un étalonnage ou pour la caractérisation de matériaux de référence ».

En théorie la référence est la grandeur physique que l'on cherche à mesurer.

La méthode GUM donne deux type d'estimations de l'incertitude type (type A et type B) :

- type A : estimation basée sur la répétition des observations,
- type B : estimation basée sur le jugement scientifique basé sur toutes les informations disponibles.

Dans le premier cas, la référence devient la moyenne arithmétique de n observations disponibles. La théorie statistique de l'échantillonnage permet d'accéder aux incertitudes.

Dans le second cas, elle doit être définie en fonction de l'ensemble des informations disponibles.

La référence est donc à définir au cas par cas, en fonction des mesures disponibles (nombre et qualité).

Dans ce papier, la référence sera définie pour chaque expérimentation comme étant l'évaluation la plus précise, d'après l'analyse scientifique des données disponibles, de la grandeur physique à mesurer. La référence sera donc choisie parmi les estimateurs disponibles.

Incertitudes

L'incertitude de mesure [9] est « un paramètre non négatif qui caractérise la dispersion des valeurs attribuées à un mesurande, à partir des informations utilisées ».

Les sources d'incertitudes pour la mesure du nombre d'occupants peuvent être classées en plusieurs groupes :

- les incertitudes de métrologie (capteur et son positionnement),
- les incertitudes de modélisation physique : transformation de la donnée mesurée en la variable d'intérêt,
- les incertitudes environnementales : cas particulier du cas testé (type de bâtiment, type de population, etc.).

Il existe 2 sortes d'écarts :

- l'écart systématique (la mesure n'est pas juste),
- l'écart aléatoire (la mesure n'est pas répétable).

Définissons :

- $ref(t)$ la valeur de référence à chaque instant t
- $m(t)$ la valeur mesurée par le dispositif à tester à l'instant t

On dispose de n mesures.

Dans le cas des mesures temporelles (dont la cible / valeur vraie varie dans le temps), il faut tout d'abord recentrer les mesures pour pouvoir les comparer.

On calcule donc, à chaque instant, l'écart entre l'estimateur et la valeur prise comme référence :

$$e(t) = ref(t) - m(t)$$

On peut utiliser ces données pour caractériser la dispersion entre le mesurande et la valeur vraie (ou entre la référence et la mesure). Pour cela, on peut tracer les densités de probabilité de ces écarts.

Pour chaque estimateur, la moyenne de ces écarts donne l'erreur (ou l'incertitude) systématique (e_{sys}), l'écart type de ces écarts donne l'erreur type aléatoire ($e_{aléa}$).

Dans cet article, on s'intéresse à l'évaluation de la performance énergétique des bâtiment, c'est à dire aux consommations annuelles. Bien que l'on calculera les incertitudes aléatoires, c'est plus particulièrement les incertitudes systématiques qui seront étudiées. En effet, on suppose que les erreurs horaires aléatoires se compensent sur l'année.

CAS D'ETUDE

Plusieurs cas d'étude ont été considérés pour évaluer différents estimateurs.

description des protocoles expérimentaux

CAS 1

Dans un bâtiment tertiaire situé à Angers, on dispose de 6 bureaux dans lesquels un détecteur de mouvements de type infra rouge a été placé. La consommation électrique spécifique (reliée aux prises de courant) et la consommation électrique pour l'éclairage sont mesurées pour cette zone de 6 bureaux ainsi que pour les communs y afférents. Le pas de temps d'enregistrement des données est de 5 minutes.

La grandeur d'intérêt est le nombre d'occupants horaire. La référence est calculée ainsi : à chaque pas de temps, pour chaque bureau, si le détecteur de mouvements a détecté au moins un mouvement au cours des 5 minutes, le nombre d'occupants dans le bureau est de 1 pour toute la période de 5 minutes. On fait ensuite, pour chaque bureau, la moyenne des pas de temps pour chaque heure. On somme ensuite le nombre d'occupants de chaque bureau.

CAS 2

On dispose à Grenoble, d'un bureau occupé par un professeur et 3 doctorants. Il est équipé des capteurs suivants, délivrant une donnée moyennée toutes les 30 minutes :

- 2 caméras vidéos dont les images sont enregistrées sur 5s à chaque mouvement détecté,
- un capteur d'ambiance mesurant l'éclairage, la température et l'humidité relative,
- 4 compteurs de puissance électrique : à chaque pas de temps, pour chaque compteurs, si la puissance est supérieure à la puissance moyenne consommée par un ordinateur portable (15W), l'indicateur est 1, 0 sinon. La somme de tous les capteurs est effectuée à chaque pas de temps, puis la moyenne pour chaque demi-heure,
- un capteur de contact informant sur l'état de la porte : 0 si elle est ouverte, 1 si elle est fermée, l'indicateur est le pourcentage de la durée d'ouverture dans la demi-heure considéré,
- un détecteur de mouvements : l'indicateur retenu est le nombre de déclenchements du capteur pendant une demi-heure,
- un microphone enregistrant le niveau sonore (dB),
- un capteur de concentration en CO₂.

La grandeur d'intérêt est le nombre moyen d'occupants pour chaque demi-heure. La référence est calculée grâce à l'analyse des images fournies par les caméras : on calcule un nombre d'occupants moyen à chaque demi-heure, au prorata du nombre d'images sur lesquelles un occupant est identifié. Cette grandeur est ensuite classée en 6 niveaux d'occupation. Pour ce cas, la référence est le niveau d'occupation (valeur médiane de la classe) du bureau à chaque demi-heure.

Estimateurs

Pour chaque cas d'étude, plusieurs types de capteurs ont été installés. On peut donc estimer le nombre d'occupants de plusieurs manières.

Dans le CAS 1, les estimateurs du nombre d'occupants dans la zone suivant seront évalués :

- lien entre consommations électrique et nombre d'occupants,
- concentration en CO₂ dans le couloir

Dans le cas 2, des méthodes de mining sont utilisées, pour chaque combinaison de capteurs (de 1 à 5 capteurs = 31 combinaisons).

Estimateur d'occupation par la consommation électrique

On utilise le modèle suivant :

$$N_{occ} = a C_{elec} + b$$

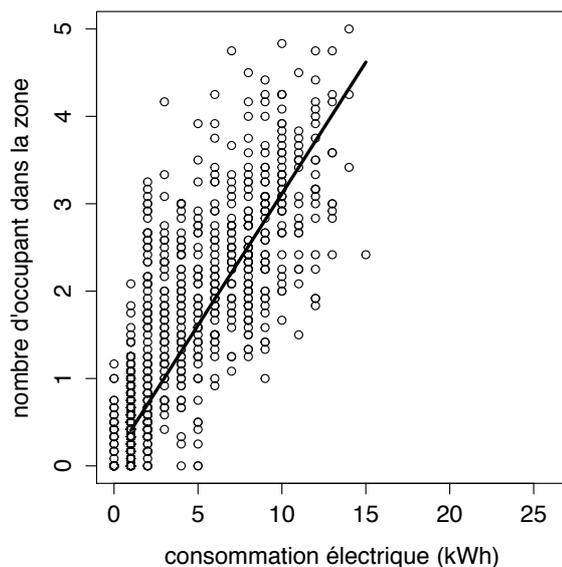


Figure 1 : relation entre consommation électrique (en hecto.Wh) et nombre de personnes présentes pour plusieurs pièces, droite de régression

Plusieurs méthodes peuvent être appliquées pour identifier les coefficients a et b . On peut tout d'abord utiliser une période courte d'apprentissage en appliquant une régression linéaire entre le nombre d'occupants (mesuré par une autre technique, ici il s'agit de la référence par détecteur de mouvement) et la consommation électrique spécifique sur une période de 1 mois (Figure 1).

Une autre technique peut être employée pour identifier les paramètres du modèle. On fait des hypothèses sur deux points de fonctionnement, comme par exemple, en inoccupation (correspondant à une consommation nocturne) et en occupation complète (correspondant à un maximum de consommation électrique). Le tableau 1 récapitule 3 séries d'hypothèses.

Tableau 1 : hypothèses de calcul d'estimateurs de l'occupation zone

	N _{OCC}	C _{ELEC}	N _{OCC}	C _{ELEC}
Modèle 2	0	100	6	1500
Modèle 3	0	0	6	1500
Modèle 4	0	100	5	1500

Tableau 2 : moyenne et écart type des erreurs des estimateurs (en nombre d'occupants de la zone)

zone	ERREUR MOYENNE ANNUELLE (EN NB)	ERREUR ALEATOIRE (ECART TYPE)
Apprentissage 1 mois	-0,13	0,52
Modèle 2	0,24	0,63
Modèle 3	-0,12	0,59
Modèle 4	0,32	0,54

Le tableau 2 présente les erreurs moyennes et aléatoires obtenues pour chaque estimateurs. A noter que la moyenne d'occupation (jour et nuit) sur la période d'analyse est de 0,75 personnes pour 6 bureaux.

On obtient des erreurs moyennes variant selon les hypothèses de calculs. A noter que les hypothèses du modèle 3 permettent d'atteindre des résultats proches de ceux obtenu par apprentissage.

Dans la suite de l'analyse, on prendra les valeurs moyennes (des variances) obtenues par ces différents estimateurs :

erreur systématique : 0,22

erreur aléatoire : 0,57

Estimateur occupant par CO₂

On écrit d'après Ansanay [13] :

$$[CO_2]_{n+1} - [CO_2]_n = A + A' [CO_2]_n + B n_{occ}$$

où :

- A est représentatif de la concentration extérieure et vaut $A' * [CO_2]^{ext}$,
- A' représente, le renouvellement d'air (en volume heure) multiplié par le pas de temps (ici 1h),
- B représente la quantité de CO₂ expirée en moyenne par les occupants
- et [CO₂] la concentration en CO₂ mesurée.

La littérature donne des indications pour identifier la quantité de CO₂ expirée par l'être humain. Cependant celle ci peut être très

variable en fonction de paramètres tels l'activité, l'âge, le sexe, etc. D'autres méthodes s'appuient sur des algorithmes d'identification sur une période « d'apprentissage », mais nécessite de connaître le nombre d'occupants réel, au moins pendant une période.

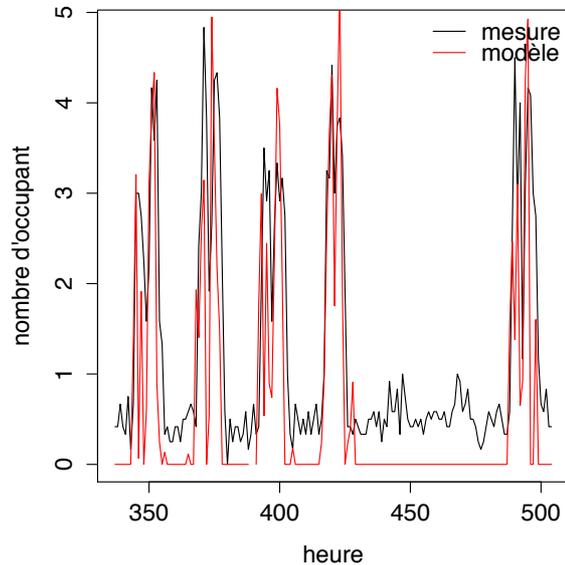


Figure 2 : nombre d'occupant dans la zone déterminé par la mesure de référence (PIR) et par le modèle se basant sur la concentration en CO₂.

Nous avons choisi une autre méthode. En se basant sur la mesure de CO₂ uniquement et en isolant des périodes pendant lesquelles on observe une décroissance forte de la concentration en CO₂ correspondant à une occupation nulle (par exemple en fin de journée). On peut alors identifier A et A' puisque B * n_{occ} est alors nul. Sur 3 jours ouvrés au début de l'année, on trouve :

$$A = 247 \text{ ppm}$$

$$A' = -0,47 \text{ vol/h}$$

soit une $[CO_2]^{ext} = 525 \text{ ppm}$ ce qui est cohérent avec le niveau de CO₂ constaté hors occupation (le week-end par exemple), qu'on suppose en équilibre avec la concentration extérieure.

On calcule ensuite pour l'ensemble des points la valeur de B' (= B n_{occ}) :

$$[CO_2]_{n+1} - [CO_2]_n - A - A' [CO_2]_n$$

On fait l'hypothèse que le 99^{ème} centile des valeurs de B' (B'₉₉) correspond au nombre d'occupants maximum des bureaux (ici 5). On calcule ensuite le nombre d'occupant à chaque pas de temps :

$$n_{occ} = B' n_{occ-max} / B'_{99}$$

avec B'₉₉ = 316 ppm / occ

On obtient finalement une erreur systématique de 0,18 personnes, avec une erreur aléatoire de 0,8 personnes. La figure 2 présente les résultats de cet estimateur comparativement à la référence établie grâce aux détecteur de mouvements.

CAS 2 : Estimateur par techniques de mining et multi instrumentation

Une période d'apprentissage de 11 jours est utilisée ainsi qu'un algorithme de classification pour créer des arbres de décisions maximisant les gains d'information à chaque nœud. D'autres classificateurs ont été testés dans [11]. Le but est de déterminer les combinaisons de capteurs offrant les meilleurs compromis précision/coût. Les estimateurs résultants sont ensuite appliqués aux 4 jours suivants.

Une approche à base d'arbre de décision a été retenue pour sa facilité d'interprétation des résultats : il s'agit d'un apprentissage supervisé. L'algorithme C4.5 a été utilisé pour générer les règles de décision exploitant les mesures disponibles comme les détections de mouvement, les consommations électriques de chaque ordinateur, les concentrations en CO₂, les positions de la porte,... L'étiquetage de l'occupation pour l'apprentissage a été effectué grâce à 2 cameras vidéos de comptage disposées dans une zone de test.

A chaque nœud des arbres de décision obtenus, les données sont divisées en 2 pour la mesure correspondante au nœud. L'arbre de décision obtenu correspond donc à un ensemble de règle "if-then-else" imbriquées :

if $X_i \leq \text{seuil}$ **then**

 nœud inférieur gauche

else

 nœud inférieur droite

end if

Les arbres de décision obtenus permettent de décider les mesures les plus pertinentes pour estimer l'occupation en tenant compte :

- des coûts de capteurs
- de l'erreur systématique (error1) et de l'erreur aléatoire (error2)

La figure 3 présente les erreurs (incertitudes) systématiques et aléatoire pour l'ensemble des combinaisons de capteurs en fonction du coût d'instrumentation.

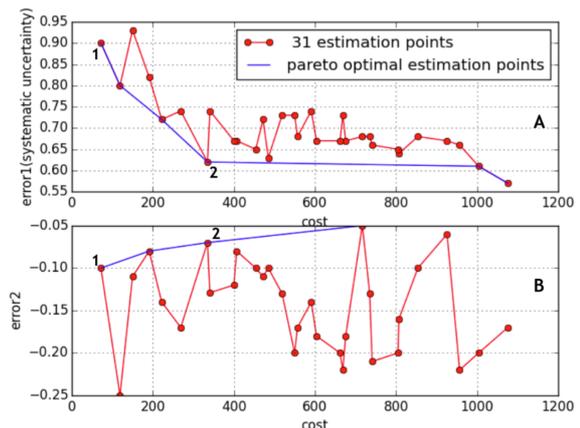


Figure 3 : erreur systématique (error2) et aléatoire (error1) pour l'ensemble des combinaisons de capteurs en fonction du coût d'instrumentation

Le tableau 3 montre les 4 meilleures combinaisons de mesures conduisant aux meilleurs compromis erreur/coût. "mining1" utilise uniquement un capteur de contact porte, "mining2" utilise un estimateur physique de l'occupation reposant sur un bilan physique du CO₂, "mining3" exploite les capteurs de consommation des ordinateurs et "mining4" de nombreuses mesures : pression acoustique, détection de mouvements, occupation déduite du CO₂, consommation des ordinateurs et ouverture des portes [11].

Estimateur d'apports internes

Pour les apports internes, nous nous en tiendrons à deux grandeurs :

- les apports dus à la présence,
- les apports dus à l'utilisation des appareils électriques.

La norme ISO 7730 [14] donne la chaleur dégagée par un adulte selon son activité :

- seated at rest = 100W,
- seated very light writing = 120W,
- seated light working, typing = 150W,
- seated eating = 170W.

Dans cette étude, on se base sur sur une activité de travail assis, soit 120 / 150 W. Si on prend en compte l'incertitude sur le type d'activité, en faisant l'hypothèse d'une loi normale où les cas adjacents (100W et 170W) arrivent pour un coefficient d'élargissement de 2 (95% des cas).

On obtient une valeur moyenne de 135W, avec une incertitude type de 32,5W.

Pour les apports internes dus à l'utilisation d'équipements électriques, on considère simplement que les consommations électriques sont représentatives. Toute l'énergie utilisée est restituée sous forme de chaleur à l'endroit où elle est utilisée. Cette hypothèse est simplificatrice puisque de plus en plus d'appareils portables peuvent être "chargés" à un endroit et utilisés dans un autre.

Nous ne traitons pas dans cet article des incertitudes de l'évaluation des apports internes par l'utilisation des appareils électriques, mais uniquement de l'incertitude sur l'évaluation des apports internes du fait de la présence des occupants.

RESULTATS ET DISCUSSION

Récapitulatif estimateur d'occupants

Le tableau 3 récapitule l'ensemble des résultats obtenus pour les estimateurs décrits dans les parties précédentes.

Tableau 3 : récapitulatif des incertitudes pour estimer l'occupation dans une zone de plusieurs postes de travail (en nombre d'occupant)

ESTIMATEUR	INCERTITUDE SYSTEMATIQUE	INCERTITUDE ALEATOIRE
Conso. élec. (6 occ)	0,22	0,57
CO ₂ 5 bureaux	0,18 -	0,8
Mining 1 (-cher 1 capteur de porte)	-0,1	0,92
Mining 2 (-cher 2) 4 capteurs Watt = best rapport Q/P	-0,07	0,62
Mining 3 (CO ₂ seul)	0,11	0,93
Mining 4 (+ cher = 5 capteurs)	-0,17	0,57

Les techniques de mining apportent un gain en précision mais elles nécessitent une instrumentation de référence pendant quelques jours.

Le choix des protocoles de mesure et des estimateurs associés à mettre en place peut être guidé par le type de salle : pour un bureau mono-poste de travail, on pourra opter pour des méthodes simples basées sur le détecteur de mouvement ou la consommation électrique.

Pour des pièces où le nombre de personnes peut être très variable et non lié à des activités uniques (salle de réunion, de pause), on préférera des méthodes basées sur le CO₂ qui permettent d'évaluer le nombre de personnes.

Enfin, selon la précision attendue et le budget disponible, on pourra s'appuyer sur des plans de mesure plus complets et complexes.

Incidence sur les apports internes

La consommation électrique horaire moyenne mesurée (cas 1) est de 210 Wh/h, pour une occupation moyenne de 0,75 personne. La chaleur dégagée en moyenne par chaque occupant est de 135W.

Les apports internes s'écrivent :

$$AI = C_{elec} + n_{occ} * P_{occ}$$

Dans cet article, on ne traite que des incertitudes liées au nombre d'occupant. la variance sur les apports internes s'écrit donc :

$$Var(AI) = Var(n_{occ}) * Var(P_{occ}) + Var(n_{occ}) * E(P_{occ})^2 + Var(P_{occ}) * E(n_{occ})^2$$

où E(X) est l'espérance (la moyenne) de X.

La figure 4 montre l'évolution de l'incertitude sur les apports internes en fonction de l'incertitude sur le nombre d'occupant. L'incertitude sur le dégagement de chaleur du à l'occupant étant constant.

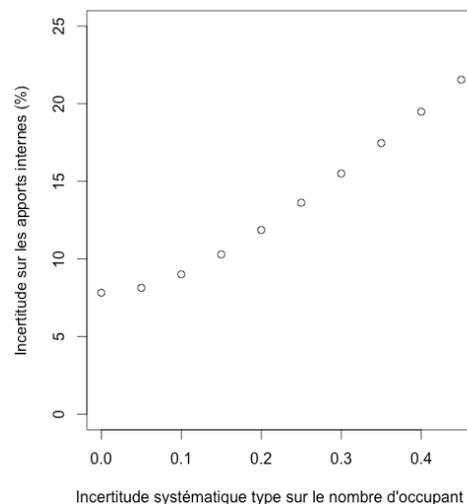


Figure 4 : incertitude sur les apports internes en fonction de l'incertitude sur le nombre d'occupants

On constate que même si le nombre d'occupants est certain, l'incertitude sur les apports internes est de 7,8%. Alors que pour une incertitude de 0,2 (résultat le plus défavorable du tableau 3) on obtient 11,9% d'incertitudes.

Ainsi une erreur systématique de 30% (0,2 pour 0,75 occupants en moyenne) apporte seulement un surplus d'erreur de 4,1% sur les apports internes globaux.

CONCLUSION

En fonction du plan de mesure choisi (et donc de son coût), l'incertitude sur l'évaluation du nombre d'occupant peut être variable.

Cette incertitude doit être mise au regard de l'objectif de cette évaluation. En effet, pour des usages d'évaluation des apports internes produits par la présence de l'occupant, pour l'évaluation de la performance d'un bâtiment (consommations annuelles), une erreur importante sur le nombre d'occupant n'est pas forcément synonyme d'incertitude forte sur la performance.

Cette étude est un préambule à l'optimisation des plans de mesures dans le cadre de la mise en place d'une garantie de performance énergétique.

Pour cela, les mêmes analyses sont conduites sur l'ensemble des variables dynamiques d'entrée des modèles de simulation thermique dynamique : température de consigne, météorologie, consommations de chauffage, de refroidissement, d'éclairage, etc. Il s'agit ensuite d'étudier la propagation des incertitudes à travers le modèle, et ainsi définir en fonction d'une incertitude cible sur l'évaluation de la consommation, le plan de mesures à mettre en place.

NOMENCLATURE

N_{occ}	= nombre d'occupants
C_{elec}	= consommation électrique
e_{sys}	= erreur systématique
$e_{aléa}$	= erreur aléatoire

ACKNOWLEDGEMENT

Cette étude est financée par l'Agence Nationale de la Recherche à travers le projet OMEGA (AAP 2013)

BIBLIOGRAPHIE

[1] ASHRAE, 2002. *ASHRAE guideline 14, Measurement of energy and demand savings*. publisher, Atlanta GA

[2] Bertagnolio, S., Andre, P., 2010. *Development of an evidence based calibration methodology dedicated to energy audit of office buildings. part 1 : methodology and modeling*. In: *Proceeding of the 10th REHVA world Congress CLIMA 2010*, Antalya Turkey.

[3] Coakley, D., Raftery, P., Mollo, P., White, G., 2011. *Calibration of detailed BES model to measured data using an evidence based analytical optimisation approach*. In: *Proceeding of building simulation 2011*, Sydney.

[4] Wang S., Yan C. Xiao F. *quantitative energy performance assessment methods for existing buildings*, *Energy and Buildings* 55 (2012) 873-888

[5] 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

[6] Coakley, 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.

[7] Y. Ding, Y. Shen, J. Wang, X. Shi, *Uncertainty sources and calculation approaches for building energy simulation models*, *energy procedia* 78 (2015), 2566-2571, *6th International Building Physics Conference, IBPC 2015*.

[8] P. Hoes, J.L.M. Hensen, M.G.L.C. Loomans, B. de Vries, D. Bougeois, *User behavior in whole building simulation*, *Energy Build.* 41, 295-302 (2009)

[9] JCGM/WG 2, "International vocabulary of metrology – basic and general concepts and associated terms (VIM)", JCGM 2008.

[10] Caucheteux A, A. Es Sabar, and V. Boucher "occupancy measurement in buildings : a literature review, application on an energy efficiency research demonstrated building", *International Journal of Metrology. Int. J. Metrol. Qual. Eng.* 4, 135-144 (2013)

[11] M. Amayri, S. Ploix, and S. Bandyopadhyay. *Estimating occupancy in an office setting*. In *Sustainable Human Building Ecosystems*, pages 72-80, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, USA, 2015

[12] K.Lam, M.Höyneck, B.Dong et al, *Occupancy detection through an extensive environmental sensor network in an open-plan office building*, *Proc. of Building Simulation 09*, an IBPSA Conference 2009

[13] G. Ansanay, *Estimating occupancy using indoor carbon dioxide concentrations only in an office building: a method and qualitative assessment*, CLIMA 2013, in *8th International Conference on IAQVEC*, 2013

[14] ISO 7730, *ergonomie des habitations thermiques – détermination analytique et interprétation du confort thermique par le calcul des indices PMV et PPD et par des critères de confort thermique local*, 2055

Etude expérimentale et numérique d'un composite à base de ciment-liège

Chadi Maalouf*¹, Tala Moussa¹, Hocine Boussetoua², Mohammed Lachi¹, Azzedine Belhamri²

¹Laboratoire de Thermomécanique, GRESPI, Faculté des Sciences, Moulin de la Housse, 51100 Reims

²Laboratoire d'Energie Climatique, Université de Constantine 1, Faculté des Sciences de la Technologie, Constantine, Algérie

*chadi.maalouf@univ-reims.fr

RESUME. Dans ce travail, on s'intéresse à étudier un matériau à base végétale, le ciment-liège, par une approche expérimentale et numérique. Pour ce faire, plusieurs échantillons sont préparés en mélangeant des granulats de liège, du sable, du ciment et de l'eau. Deux doses de volume de liège sont considérées, 50% et 75% (par rapport au sable). Les échantillons sont caractérisés expérimentalement pour déterminer leurs propriétés hygrothermiques (teneur en humidité, perméabilité à la vapeur, valeur tampon d'humidité MBV, conductivité thermique) qui sont ensuite utilisées afin d'évaluer par simulation numérique les performances énergétiques d'une enveloppe de bâtiment en ciment-liège pour les conditions climatiques de la ville de Constantine en Algérie. Les résultats révèlent que le fait d'augmenter le taux de liège revient à augmenter sa capacité à réguler l'humidité et à diminuer sa conductivité thermique, ce qui permet de réaliser une économie remarquable au niveau des consommations énergétiques environ 29% par rapport à une enveloppe classique avec de la brique creuse.

MOTS-CLÉS : Ciment de liège, simulation, mesure expérimentale.

ABSTRACT. In this work, we are interested to study a plant-based material, the cork-cement, by an experimental and numerical approach. For this, several samples are prepared by cork aggregates, sand, cement and water. Two volume dosages of cork are considered by 50% and 75% (relative to sand). Samples are experimentally characterized to determine their hygrothermal properties (moisture content, vapor permeability, moisture buffering value MBV, and thermal conductivity) which are used for simulations on room level for the Constantine city in Algeria. Results show that increasing the amount of the cork tends to increase the moisture buffering value and to decrease the thermal conductivity of the material, which results in the energy consumption economy that can reach 29% when compared to a classical solution using hollow brick.

KEYWORDS : cork-cement, simulation, experimental measurements.

1. INTRODUCTION

L'utilisation des matériaux bio-ressourcés est l'une des solutions intéressantes qui peut réduire la consommation énergétique et aboutir à une meilleure protection de l'environnement. Parmi ces matériaux, le liège, extrait de l'écorce du « chêne-liège », entre dans plusieurs applications industrielles (bouchons des bouteilles..) et la mise en œuvre des composites cimenteux. Le chêne-liège répandu dans le périmètre du Bassin méditerranéen occidental (plus de 60 millions d'ans), est reconnu par une faible densité, une capacité d'isolation thermique (faible conductivité thermique) et acoustique (Aziz, Murphy, and Ramaswamy 1979), (Moreira, António, and Tadeu 2014) C'est une ressource renouvelable, dont la récolte préserve les arbres et aide à améliorer leur santé et prolonger leurs vies. La combinaison du liège

avec un liant tel que le ciment donne des matériaux de construction avec des propriétés mécaniques et hygrothermiques qui diffèrent de celles de béton classique. Selon Moreira (Moreira, António, and Tadeu 2014) la contrainte de compression varie entre 0,2 MPA à 2,23 MPA avec une conductivité thermique allant de 0,194 à 0,318 $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ selon le pourcentage du liège incorporé.

Dans ce travail, les résultats préliminaires du développement d'un nouveau matériau à base de liège sont présentés. D'abord, les propriétés hygrothermiques sont mesurées et ensuite utilisées par une simulation numérique sous SPARK pour évaluer les performances hygrothermiques dans la ville de Constantine en Algérie. Les simulations sont réalisées sur une durée d'un an à l'échelle d'une pièce. Les résultats sont comparés à ceux obtenus avec les techniques de construction classiques.

2. MATERIAUX

Les matériaux utilisés dans la préparation des échantillons sont : sable écrasé, granulats de liège, ciment Portland (CEM II / BL 32.5 N) et eau. Deux mélanges sont préparés en remplaçant une proportion de sable avec un autre de granulats de liège avec un pourcentage de 50 et 75 % de granulats de liège dans le volume (notés respectivement L50 et L75). Le contenu de ciment dépend de la quantité du sable (1/3 dans la masse) et l'eau (1/2 dans la masse). Les détails à l'état sec sont présentés dans le Tableau 1. Pour chaque mélange, les échantillons sont élaborés en mélangeant le sable, le liège et le ciment dans un mixeur alors que l'eau est ajoutée progressivement jusqu'à ce qu'un mélange homogène soit obtenu. Ce dernier est modelé et compacté dans des moules en bois, et laissé pour se stabiliser à 23°C et 50% d'humidité relative.

Echantillon	Sable (Kg / m^3)	Ganulats liège (Kg / m^3)	Ciment (Kg / m^3)	Eau (Kg / m^3)	Densité (Kg / m^3)
L50	557.9	36.8	186	93	1590
L75	323.3	64	107.8	54	900

Tableau 1: Composition et densité des échantillons ciment-liège à l'état sec.

3. PROPRIETES HYGROTHERMIQUES

3.1. CAPACITE TAMPON HYDRIQUE

La capacité hydrique tampon (Moisture Buffer Value MBV) est mesurée en suivant le protocole du projet NORDTEST (Rode, 2005). Elle est déterminée par la quantité d'eau adsorbée ou désorbée par une unité de surface et s'exprime en $\text{g m}^{-2} \%RH^{-1}$. Les échantillons ($10 \times 10 \times 5 \text{ cm}^3$) utilisés dans le test MBV sont présentés en Figure 1 (a). La variation de la masse de l'échantillon L75 pendant une semaine est illustrée en Figure 1(b). Les résultats montrent une valeur moyenne de $1,2 \text{ g m}^{-2} \%HR^{-1}$ pour la composition L75 et $0,42 \text{ g m}^{-2} \%HR^{-1}$ pour la composition L50. Il s'avère que le L75 présente une bonne capacité tampon hydrique (comprise entre 1 et 2) et peut être classifié comme un bon régulateur d'humidité. En comparant cette valeur avec d'autres matériaux utilisés en génie civil (Rode, 2005) il apparaît que cette valeur est plus importante que celle du plâtre mais reste inférieure à celle du chanvre-chaux et le chanvre-amidon. Ceci est dû à la nature du ciment qui est moins hydrophile que l'amidon et la chaux.

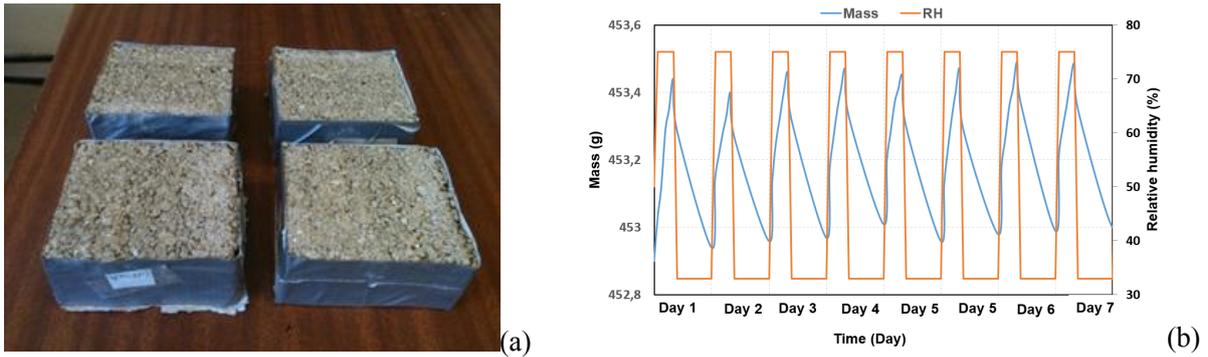


Figure 1: (a) Echantillons ciment-liège utilisés pour le test MBV, (b) variation de la masse de L75 pendant une semaine à 75% et 33% d'humidité relative.

3.2. ISOTHERMES DE SORPTION

Les isothermes de sorptions sont réalisées selon la norme européenne EN NF ISO12571 (AFNOR NF EN ISO 12572 2001) dans des dessiccateurs. Les échantillons font $10 \times 10 \times 3 \text{ cm}^3$ de dimensions. Les solutions salines MgCl_2 , $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$, NaCl , KCl et KNO_3 assurent une humidité de 33%, 53%, 75%, 84% et 94% respectivement. Les dessiccateurs sont placés dans une chambre climatique à $23 \text{ }^\circ\text{C}$ et 50% d'humidité relative. Les courbes d'adsorption du L75 et L50 sont présentées en Figure 2. La relation entre la teneur en eau et l'humidité relative de l'air est une fonction croissante non-linéaire elle augmente lorsque l'humidité relative croit. Les résultats montrent que le L75 présente une teneur en eau plus élevée que le L50, puisqu'il est plus poreux. Dans les deux cas, l'isotherme est de type 2 selon la classification d'IUPAC (IUPAC 1985). La courbe est ajustée avec la méthode des moindres carrés selon le modèle de Merakeb (Merakeb, Dubois, and Petit 2009) où les paramètres a , b et u_{sat} dans la Tableau 2 :

$$\ln\left(\frac{u}{u_{\text{sat}}}\right) = a \ln(\varphi) \ln(b * \varphi) \tag{1}$$

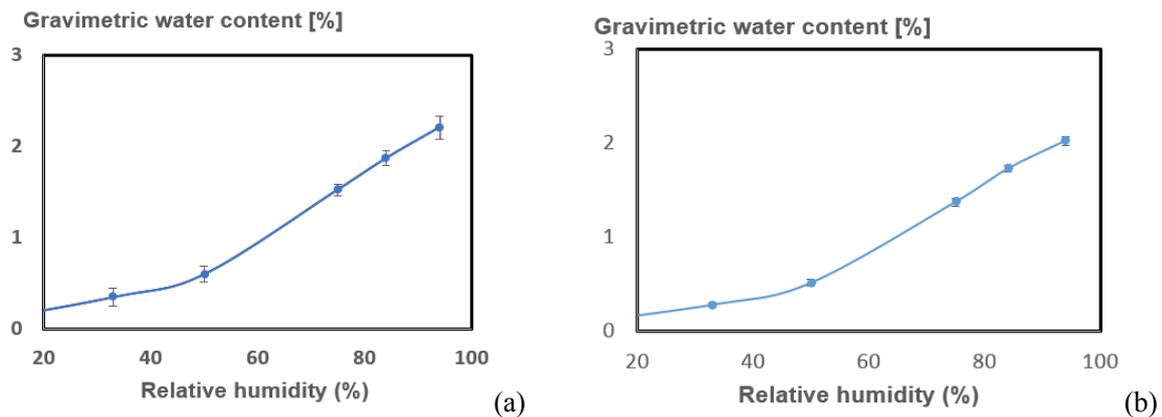


Figure 2: Courbes d'adsorption pour L75 (a) et L50 (b).

	u_{sat}	a	b
L75	3,213	1,39	1,018
L50	2,723	1,77	0,503

Tableau 1 : Coefficients du modèle de Merakeb pour le L75 et L50.

3.3. PERMEABILITE A LA VAPEUR D'EAU

La mesure de la perméabilité à la vapeur d'eau est effectuée selon la norme NF EN ISO 12572 (AFNOR NF EN ISO 12572 2001) par la méthode de la coupelle sèche. La procédure consiste à imposer un gradient de pression de vapeur constant et unidimensionnel à un échantillon d'épaisseur $d(m)$ dans les conditions isothermes. Avant l'essai, les échantillons sont stockés à 23°C et 50% d'humidité relative pour que leur masse se stabilise, jusqu'à ce que trois pesées quotidiennes et successives ne varient plus de 5%. La solution saline assure une humidité relative constante au-dessous de l'échantillon à une température constante. Le test est réalisé pour une humidité relative de 0% et 50%. La perméabilité est ensuite calculée selon la loi de Fick :

$$\delta = \frac{g * d}{\nabla p_v} \quad (2)$$

$$\mu = \frac{\delta_a}{\delta} \quad (3)$$

avec g ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$) est le flux de vapeur à travers l'échantillon d'épaisseur $d(m)$. μ est la résistance à la vapeur d'eau et δ_a ($\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1} \text{Pa}^{-1}$) est la perméabilité à la vapeur d'eau de l'air. Les mesures révèlent une résistance à la vapeur d'eau de 10 et 60 pour le L75 et L50 respectivement.

3.4. CONDUCTIVITE THERMIQUE

La conductivité thermique du chanvre-amidon est mesurée par la méthode fluxmétrique, en respectant la norme ISO 8301 (AFNOR Norme ISO 8301 1991) sur des échantillons de dimensions ($20 \times 20 \times 3 \text{ cm}^3$). L'écart de température est de 8°C entre les deux faces de l'échantillon avec une température moyenne de 23°C. Les valeurs obtenues sont données dans le Tableau 3.

Echantillon	Etat Sec	A 50% HR
L75	0,194	0,25
L50	0,349	0,45

Tableau 3: Conductivité thermique à l'état sec (50% d'humidité relative ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$)).

D'après les résultats, il s'avère que le L75 présente une conductivité thermique flux faible à l'état sec $0,194 \text{ W m}^{-1} \text{K}^{-1}$ due au pourcentage élevé des ganultats de liège. Par conséquent, la conductivité thermique décroît lorsque le pourcentage du liège augmente, et augmente avec l'augmentation de l'humidité relative.

4. ETUDE NUMERIQUE

4.1. MODELE MATHEMATIQUE

Les phénomènes de transport hygrothermiques dans les matériaux ont été largement étudiés par (Künzel 1995)(Pedersen 1992)(Mendes 1997). La plupart des modèles ont presque la même origine le modèle de Philip et de Vries (Philip et *al.*, 1957). Dans cette étude le modèle Umidus (Mendes 1997) est utilisé, qui considère que l'humidité traverse le matériau poreux sous forme liquide et vapeur. L'équation bilan en humidité est alors :

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_T \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(D_\theta \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) \quad (4)$$

Avec les conditions aux limites ($x = 0$ and $x = L$) :

$$-\rho_l \left(D_T \frac{\partial T}{\partial X} + D_\theta \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) \Big|_{x=0,e} = h_{M,e} (\rho_{v,a,e} - \rho_{v,s,e}) \quad (5)$$

$$-\rho_l \left(D_T \frac{\partial T}{\partial X} + D_\theta \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) \Big|_{x=L,i} = h_{M,i} (\rho_{v,s,i} - \rho_{v,a,i}) \quad (6)$$

L'équation du bilan d'énergie montrent que la variation d'énergie en fonction du temps est liée à la fois à la chaleur échangée par conduction ainsi qu'au changement de phase dans les pores :

$$\rho C_{p_m} \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda(T, \theta) \frac{\partial T}{\partial x} \right) + L_v \rho_l \left(\frac{\partial}{\partial x} \left(D_{T,v} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(D_{\theta,v} \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) \right) \quad (7)$$

$$C_{p_m} = C_{p_0} + C_{p_l} \frac{\rho_l}{\rho_\theta} \quad (8)$$

Avec C_{p_m} est la capacité calorifique moyenne qui tient en compte la capacité calorifique du matériau à l'état sec et la contribution de la capacité calorifique de la phase liquide. λ est la conductivité thermique qui dépend du taux d'humidité. En outre, les conditions aux limites tiennent compte de l'échange par rayonnement, convection et du changement de phase.

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0,e} - L_v \rho_l \left(D_{T,v} \frac{\partial T}{\partial x} + D_{\theta,v} \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) \Big|_{x=0,e} = h_{T,e} (T_{a,e} - T_{s,e}) + L_v h_{M,e} (\rho_{ve,a,e} - \rho_{ve,s,e}) + \Phi_{ray,e} \quad (9)$$

4.2. MODELE DE L'AIR

La variation de la température dans la pièce est calculée par la somme de chaleurs transférés par la conduction provenant des locaux adjacents ou de l'extérieur ou aux sources éventuelles de chaleur sensible. On définit I l'inertie thermique de la pièce. L'équation s'écrit sous la forme :

$$(\rho_i C_p V + I) \frac{\partial T}{\partial \tau} = \Phi_{West} - \Phi_{East} + \Phi_{South} - \Phi_{North} + \Phi_{Bottom} - \Phi_{Top} + \Phi_{source} \quad (10)$$

Par ailleurs, le bilan massique de la vapeur d'eau dans la pièce est :

$$V \frac{\partial \rho_i}{\partial \tau} = Q_{mWest} - Q_{mEast} + Q_{mSouth} - Q_{mNorth} + Q_{mBottom} - Q_{mTop} + Q_{msource} \quad (11)$$

4.3. MODELE DE TRANSFERT RADIATIF INTERIEUR

La méthode de la température radiante moyenne est utilisée pour calculer l'échange par rayonnement à grandes longueurs d'ondes entre les murs. L'équation linéaire exprimant le flux radiatif entre une paroi et toutes les autres parois de la pièce est :

$$\Phi_{rad,LW}^{int} = h_r S (T - T_m) \quad (12)$$

$$h_r = 4 \epsilon \sigma_0 T_m^3 \quad (13)$$

Avec T_m est la température radiante moyenne des parois:

$$T_m = \frac{\sum S_j T_{Sj}}{\sum S_j} \quad (14)$$

Pour les courtes longueurs d'onde on suppose que l'énergie radiante entre dans la pièce par la fenêtre est distribuée entre le plancher et les autres murs 0,6 et 0,1 respectivement.

5. RESULTATS

La simulation sous SPARK permet de résoudre les systèmes d'équations différentielles (Sowell and Haves 2001). Des détails sur la validation du modèle sont données par (Tran Le et al. 2009)(Maalouf et al. 2014). Dans notre étude deux cas sont présentés et comparés en termes de consommation d'énergie. Dans le premier cas, seulement le transfert thermique dans les parois est pris en compte alors que dans le deuxième cas les deux transferts de chaleur et d'humidité sont considérés. Pour les deux cas, la pièce fait 23,1 m² de surface et 65,8 m³ de volume. Le plan est présenté dans la Figure 5.

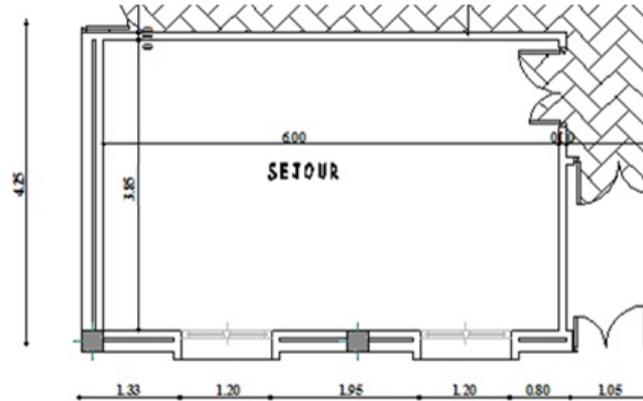


Figure 3: Plan de la pièce.

Paroi	Composition et épaisseur
Verticale externe	Plâtre de ciment (2cm), ciment-liège L75 (15 cm), Plâtre de ciment (2cm).
Partition interne	Plâtre de ciment (2cm), ciment-liège L75 (10 cm), Plâtre de ciment (2cm).
Plancher	Plâtre de ciment (2cm), ciment-liège L75 (16 cm), béton armé (7cm).
Sol	Carrelage (2cm), mortier (3cm), ciment-liège L50 (12cm).

Tableau 5: Composition des parois de la pièce.

La façade sud présente deux fenêtres en vitrage simple de 1,2 × 1,4 m² chacun. Le plafond, le plancher ainsi que les façades ouest et sud sont en contact avec l'extérieur alors que les autres parois sont internes. Les détails de la composition murale sont présentés dans le Tableau 5. La pièce est équipée d'un dissipateur de chaleur et un contrôleur PI qui garde la température entre 19 °C et 26 °C pendant les heures d'occupation et entre 18 et 26 °C la nuit. La pièce est occupée par deux personnes de 8h à 19 h. Le taux de ventilation est 0,5 Vol/hr. Les coefficients de transfert convectif sont $h_{T,e} = 16 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ pour les surfaces extérieures et $h_{T,e} = 3 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ pour surfaces intérieures. Les coefficients de transfert massique sont $h_{M,e} = 0,005 \text{ m/s}$ et $h_{M,i} = 0,0025 \text{ m/s}$. Le plancher est considéré imperméable à l'humidité. L'humidité relative initiale et la température dans les parois et la pièce sont pris 50 % et 20 °C respectivement. Les simulations sont réalisées pour une période de 14 mois, les résultats des deux premiers mois sont négligés mais utilisés pour initialiser la simulation et par la suite les résultats sont présentés pendant la période de douze derniers mois de janvier à décembre. Les données météorologiques sont ceux de Constantine en Algérie qui bénéficie d'un climat

méditerranéen, sec et chaud en été (25 et 35°C, excédant rarement 40°C) et doux et humide en hiver (-2 et 12°C). La couche du plâtre est discrétisée en 5 nœuds et les autres couches en 10. Le pas de temps est 360s.

5.1. MODELE DE TRANSFERT DE CHALEUR (HTM)

Le Tableau 6 présente une comparaison entre la consommation énergétique annuelle d'une construction à ciment-liège L75-L50 et une construction classique. Dans la construction classique le ciment-liège est remplacé par une couche de brique creux de même épaisseur, de conductivité thermique $0.5 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ et de densité 1900 kg m^{-3} , alors que pour le toit des blocs en hourdi sont utilisés Il s'avère que l'utilisation du ciment-liège réduit la consommation d'énergie totale d'environ 29 %, ceci est dû à la faible conductivité thermique qui est aussi inférieure à celle la brique creuse et du hourdi.

	Consommation de chauffage (kWh)	Consommation de climatisation (kWh)	consommation d'énergie annuelle (kWh)
ciment-liège L75-L50 (HTM)	2748	544	3292
Classique (HTM)	3981	637	4618
ciment-liège L75-L50 (HHTM)	2778	523	3301

Table 6: Consommation énergétique annuelle (kWh) de la pièce.

5.2. MODELE DE TRANSFERT DE CHALEUR ET D'HUMIDITE (HHTM)

Dans ce cas la paroi en ciment-liège est étudiée Les résultats sont présentés dans le Tableau 6. En raison de la désorption endothermique pendant la nuit, une légère augmentation du besoin de chauffage et une baisse du besoin de climatisation sont remarquées (Figure 6 (a)).

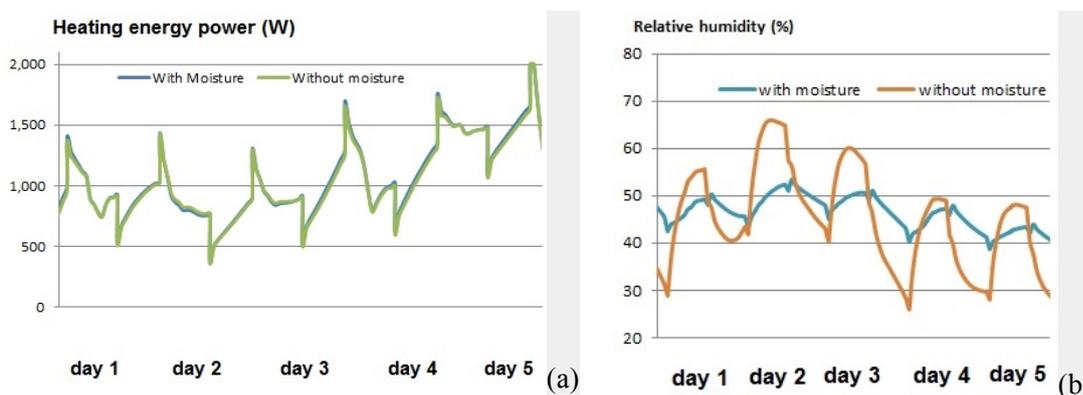


Figure 4 : (a) Consommation énergétique annuelle durant une semaine de Décembre; (b) Variation de l'humidité relative intérieure durant une semaine de Décembre pour les deux modèles (HTM et HHTM)

La Figure 6 (b) montre la variation de l'humidité relative intérieure durant une semaine de Décembre pour les deux modèles (HTM et HHTM). Il est à noter que le fait de tenir compte du transfert d'humidité amortit la variation d'humidité relative. Cette variation dépend non seulement du ciment-liège amortissant la valeur, mais principalement du plâtre et ses propriétés hygriques (résistance à la vapeur $\mu = 19$).

6. CONCLUSION.

Dans ce papier, deux préparations de ciment-liège sont présentés et leurs propriétés hygrothermiques ont été mesurées. La valeur de MBV est mesurée et il s'avère que la composition L75 est un bon régulateur d'humidité. Les propriétés hygrothermiques sont utilisées par la simulation sous SPARK pour deux types de paroi et deux modèles de transfert de chaleur. Pour la ville de Constantine, les résultats montrent que le ciment liège peut réduire la consommation énergétique de 29 % comparé à une construction classique utilisant la brique creuse. Par ailleurs, le fait de tenir en compte le transfert d'humidité augmente légèrement la consommation d'énergie en hiver à cause du phénomène de désorption endothermique la nuit et réduit le besoin de la climatisation durant l'été. Il sera intéressant d'étudier d'autres villes avec différents conditions climatiques avec une ventilation naturelle et d'autres compositions de parois.

7. BIBLIOGRAPHIE

- AFNOR NF EN ISO 12572. 2001. "Hygrothermal Performance of Building Materials and Products — Determination of Water Vapour Transmission Properties."
- AFNOR Norme ISO 8301. 1991. "Isolation Thermique. Détermination de La Résistance Thermique et Des Propriétés Connexes En Régime Stationnaire. Méthode Flux Métrique."
- Aziz, M.A., C.K. Murphy, and S.D. Ramaswamy. 1979. "Lightweight Concrete Using Cork Granules." *International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete* 1 (1): 29–33. doi:10.1016/0262-5075(79)90006-X.
- IUPAC. 1985. "Reporting Physisorption Data for Gas / Solid Systems with Special Reference to the Determination of Surface Area and Porosity Area International Union of Pure and Applied Chemistry," 603–19.
- Künzel, H. 1995. *Simultaneous Heat and Moisture Transport in Building Components. Physics*. Fraunhofer Institute of building physics, Allemagne,.
- Maalouf, C., A.D. Tran Le, S.B. Umurigirwa, M. Lachi, and O. Douzane. 2014. "Study of Hygrothermal Behaviour of a Hemp Concrete Building Envelope under Summer Conditions in France." *Energy and Buildings* 77 (July): 48–57. doi:10.1016/j.enbuild.2014.03.040.
- Mendes, N. 1997. "Models for Prediction of Heat and Moisture Transfer through Porous Building Element,," Federal University of Santa Catarina, Florianopolis, SC, Brésil.
- Merakeb, S., F. Dubois, and C. Petit. 2009. "Modélisation Des Hystérésis de Sorption Dans Les Matériaux Hygroscopiques." *Comptes Rendus - Mécanique* 337 (1). Elsevier Masson SAS: 34–39.
- Moreira, A., J. António, and A. Tadeu. 2014. "Lightweight Screed Containing Cork Granules: Mechanical and Hygrothermal Characterization." *Cement and Concrete Composites* 49 (May): 1–8. doi:10.1016/j.cemconcomp.2014.01.012.
- Pedersen, C R. 1992. "Prediction of Moisture Transfer in Building Constructions." *Building and Environment* 27 (3): 387–97. doi:10.1016/0360-1323(92)90038-Q.
- Rode, C. 2005. "Moisture Buffering of Building Materials Department of Civil Engineering Technical University of Denmark." Denmark.
- Sowell, Edward F, and Philip Haves. 2001. "Efficient Solution Strategies for Building Energy System Simulation." *Energy and Buildings* 33 (4): 309–17. doi:10.1016/S0378-7788(00)00113-4.
- Tran Le, A. D., C. Maalouf, K.C. Mendonça, T.H. Mai, and E. Wurtz. 2009. "Study of Moisture Transfer in a Double-Layered Wall with Imperfect Thermal and Hydraulic Contact Resistances." *Journal of Building Performance Simulation* 2 (4). Taylor & Francis: 251–66. doi:10.1080/19401490903082459.

Optimisation topologique d'une bouche de soufflage pour le contrôle de la ventilation dans une pièce en régime turbulent.

Garry Rivière^{*1}, Pierre-Henri Cocquet¹, Eric Fock¹, Alain Bastide¹

¹ Laboratoire de Physique et Ingénierie Mathématique appliquées à l'Energie et à l'environnement et le Bâtiment (PIMENT)

Université de La Réunion

*garry.riviere@univ-reunion.com

RESUME. La vitesse d'air est un des critères de confort thermique de l'utilisateur des bâtiments. Ainsi, une augmentation de la vitesse d'air sur l'utilisateur contribue à la réduction de la température ressentie. Par conséquent, l'augmentation des mouvements d'air dans les zones de présence des usagers contribue alors à l'amélioration du confort thermique. La dynamique des flux d'air dans une pièce peut être modifiée en altérant la forme des bouches de ventilations. Pour atteindre des vitesses d'air optimales le dimensionnement des orifices de soufflage est effectué par méthodes essais-erreurs expérimentales ou numériques. Par opposition, La théorie du contrôle optimal permet de déterminer des conditions de soufflage en fonction de critères à atteindre dans la zone de l'utilisateur. L'optimisation topologique est une méthode qui en découle, elle permet ainsi de trouver des géométries optimales en ajoutant de la matière dans le domaine. Nous proposons dans cette contribution une utilisation de l'optimisation topologique comme méthode de conception de bouches de ventilation dans l'objectif de contrôler la vitesse en sortie de l'orifice et en minimisant la puissance totale dissipée. Les résultats présentés montrent qu'il est possible de trouver des géométries optimales en visant ces deux objectifs. La géométrie finale de la bouche de la ventilation est alors conditionnée par le souhait du concepteur à favoriser l'un des deux aspects de la minimisation. Les résultats sont présentés pour un écoulement turbulent, isotherme, incompressible et en régime permanent, modélisé par les équations du modèle RANS k -epsilon

MOTS-CLÉS. Optimisation topologique, bouche de soufflage, ventilation mécanique

ABSTRACT. The air velocity is one of the thermal comfort criteria for building users. Thus, an increase of air velocity on building users contributes to reduce perceived temperature. Therefore, air movement in the areas of users improves thermal comfort. Airflow dynamics may be changed by altering the design aspect of the ventilation nozzles. To achieve suitable air velocity, the design methods of ventilation nozzles are based on experimental tests or numerical trial and error methods. In contrast, the optimal control theory is used in order to find suitable conditions of blowing according to objective criteria in the users area. The topology optimization is a method to find optimal geometries by adding material in a domain. We propose in this paper the use of topology optimization method for nozzles designing with the aim of controlling the outlet velocity and the minimizing of the total dissipated power. The results presented in this article shows the possibilities to find optimal geometries for both objectives. The final geometry of the ventilation orifice is then conditioned by the choice of the designer to increase the influence at one of the two aspects of the minimization. Results are presented for turbulent flow, isothermal, incompressible and steady-state, governed by RANS k -epsilon model.

KEYWORDS. Topological optimization, ventilation nozzles, mechanical ventilation

1 INTRODUCTION

Les humains passent environ 90% de leurs temps dans des espaces clos. Ils se retrouvent donc ainsi au quotidien dans les bâtiments pour y travailler ou pour se loger. Le sentiment de bien-être dans une pièce ou le niveau de confort dépend d'un ensemble de facteurs liés à la circulation de l'air pièce. Ainsi, d'après Finnegan et al. (1984) la satisfaction des usagers des bâtiments est dépendante de la nature et de la qualité de la ventilation du bâtiment. Selon El Hassan et al. (2011) la forme ou encore la disposition des orifices de soufflage influent sur la dynamique des flux d'air dans les bâtiments. La détermination de l'orifice ou de l'ouvrant optimal peut se faire par essai-erreur de manière expérimentale ou virtuelle par l'intermédiaire de la mécanique des fluides numérique. Cette approche est coûteuse financièrement dans le premier cas, en temps dans le deuxième cas, en supposant que la démarche aboutisse. Une autre approche consiste à travailler sur l'optimisation géométrique de l'ouvrant. Il en existe 3 types : optimisation de taille, de forme et topologique. L'optimisation topologique est la seule qui permette de changer la connectivité du domaine, d'ajouter de la matière ou d'en enlever.

La méthode d'optimisation topologique par distribution de matériaux a été appliquée pour la première fois en mécanique des fluides par Borrvall et Petersson (2003) et aux équations de Navier-Stokes par Gersborg-Hansen et al. (2005) pour des écoulements laminaires. Elle utilise le principe de densité de matériaux initié par Bendsoe et Sigmund (2003) dans le cadre de l'optimisation structurelle. Le principe est d'attribuer une valeur élevée d'imperméabilité aux cellules du domaine considérées comme solides et à l'inverse une valeur faible pour le fluide. Le principe étant de pénaliser la vitesse du fluide dans certaines zones du domaine pour atteindre l'objectif désiré. Là où la vitesse est pénalisée, la zone est alors considérée comme un solide. La distribution spatiale solide/fluide définit alors la géométrie optimale. L'optimisation topologique est une technique qui se répand dans l'industrie pour l'optimisation d'écoulements dans des conduits. Les études sont appliquées aux écoulements turbulents depuis les travaux d'Othmer (2008) et plus récemment aux modèles RANS à une équation de fermeture par Kontoleontos et al. (2012).

L'objectif de ce travail est de trouver la géométrie optimale d'une bouche de ventilation par une méthode d'optimisation topologique pour un écoulement turbulent modélisé par les équations du modèle RANS $k - \epsilon$ à deux équations de fermeture. L'article s'organise de la façon suivante : dans la première partie nous décrivons le cas d'études ainsi que les équations associées. Dans un second temps nous présentons la construction du problème d'optimisation et la méthode de résolution. Dans la troisième partie les méthodes numériques utilisées et les résultats sont présentés. Enfin en dernière partie nous concluons et proposons des perspectives à ce travail.

2 PRÉSENTATION DU PROBLÈME

Cette première partie présente la géométrie de la bouche de soufflage étudiée dans cet article ainsi que le modèle utilisé. Nous donnons ensuite le critère à minimiser permettant, par ajout de porosité, de fixer un profil de vitesse en sortie de la bouche. Pour finir, nous calculons les conditions d'optimalité du premier ordre qui seront utiles lors des applications numériques.

2.1 PRÉSENTATION DU CAS D'ÉTUDE

Nous recherchons à améliorer le confort des usagers en augmentant les mouvements d'air dans la zone de contrôle. Nous considérons une pièce en deux dimensions schématisée sur la figure 1.

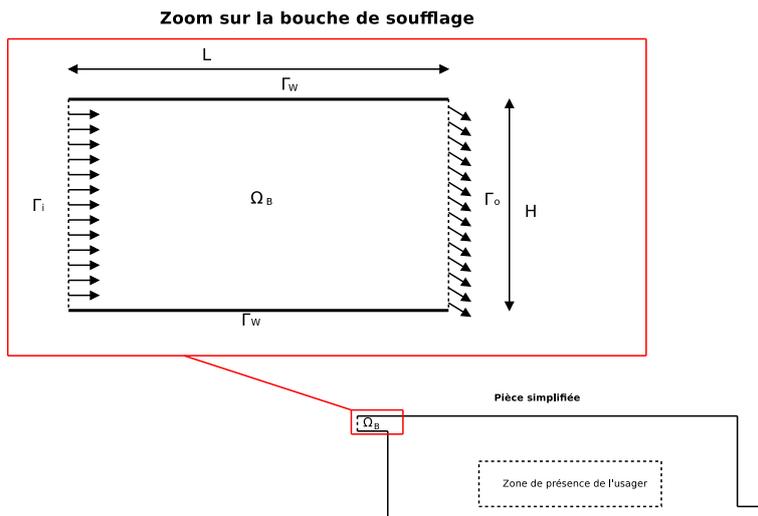


FIGURE 1. Description de la bouche de soufflage étudiée

L'air est injecté dans la pièce par un orifice de soufflage Γ_O . L'air est acheminé à la bouche de soufflage par une buse Ω_B de dimensions $H \times L$. L'objectif de notre étude est de trouver la géométrie optimale de la buse de soufflage Ω_B pour que le flux d'air en sortie d'orifice soit dans la direction d'une zone de présence de l'utilisateur du bâtiment. L'air est injecté de façon uniforme par l'entrée du domaine Γ_i .

2.2 MISE EN ÉQUATION DU PROBLÈME

L'écoulement considéré dans cette étude est un fluide newtonien, incompressible et en régime permanent gouverné par les équations primaires de conservation de la quantité de mouvement et de continuité suivantes.

$$\mathcal{R}^{\mathbf{u}} = \nabla \cdot (\mathbf{u} \otimes \mathbf{u}) + \nabla p - \nabla \cdot \left(\left(\frac{1}{Re} + \frac{1}{Re_T} \right) 2S(\mathbf{u}) \right) + \alpha^* \mathbf{u} \quad \text{dans } \Omega. \quad (1)$$

Avec $\alpha^* = \frac{1}{Da \cdot Re}$, où $Re = \frac{\mathbf{u}_0 H}{\nu}$ est le nombre de Reynolds, Da le nombre de Darcy et $Re_T = \frac{\mathbf{u}_0 H}{\nu_T}$.

$$\mathcal{R}^p = -\nabla \cdot \mathbf{u} \quad \text{dans } \Omega_B. \quad (2)$$

L'écoulement est considéré comme turbulent. La turbulence est modélisée par les équations du modèle RANS $k - \epsilon$.

$$\mathcal{R}^k = \nabla \cdot (\mathbf{u}k) - \nabla \cdot \left(\left(\frac{1}{Re} + \frac{1}{Re_T \sigma_k} \right) \nabla k \right) - G + \epsilon \quad \text{dans } \Omega_B. \quad (3)$$

$$\mathcal{R}^\epsilon = \nabla \cdot (\mathbf{u}\epsilon) - \nabla \cdot \left(\left(\frac{1}{Re} + \frac{1}{Re_T \sigma_\epsilon} \right) \nabla \epsilon \right) - C_1 \frac{\epsilon}{k} G + C_2 \frac{\epsilon^2}{k} \quad \text{dans } \Omega_B. \quad (4)$$

Où $\nu_T = C_\mu \frac{k^2}{\epsilon}$ est la viscosité turbulente. G le terme de production de turbulence $G = 2C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} S(\mathbf{u}) : S(\mathbf{u})$ avec $S(\mathbf{u}) = \frac{1}{2} \left(\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T \right)$ et C_μ , C_1 , et C_2 , σ_k et σ_ϵ sont des constantes

propres au modèle $k - \varepsilon$. Les relations suivantes sont utilisées pour rendre sans dimension les équations $x = XH, z = ZH, \mathbf{u}_i = \mathbf{u}\mathbf{u}_0, p_i = p\rho\mathbf{u}_0^2, k_i = k\mathbf{u}_0^2, \varepsilon_i = \varepsilon\frac{\mathbf{u}_0^3}{D\varepsilon}$.

La condition aux limites en vitesse primaire en entrée du domaine est fixée de tel sorte que le nombre de Reynolds soit égal à 30000.

$$\mathbf{u} = \mathbf{u}_0, \quad (\mathbf{n} \cdot \nabla) p = 0 \quad \text{sur } \Gamma_I. \quad (5)$$

En sortie de domaine Γ_O , les conditions aux limites sont de type Dirichlet sur la pression et Neumann pour la vitesse.

$$(\mathbf{n} \cdot \nabla) \mathbf{u} = 0, \quad p = 0 \quad \text{sur } \Gamma_O. \quad (6)$$

Sur les parois Γ_W on impose une condition de non-glissement et un gradient de pression normal à la paroi nul.

$$(\mathbf{n} \cdot \nabla) p = 0, \quad \mathbf{u} = 0 \quad \text{sur } \Gamma_W. \quad (7)$$

Pour les grandeurs turbulentes k et ε on impose une condition au limites de Dirichlet homogène sur Γ_I . Sur la sortie Γ_O une condition aux limites de type Neumann est utilisée. Sur les parois Γ_W une loi de paroi classique est utilisée.

2.3 PROBLÈME D'OPTIMISATION

L'objectif de notre étude qui est de contrôler la vitesse en sortie d'orifice de soufflage peut se définir par la fonctionnelle objectif suivante $\mathcal{J}(\mathbf{u}, p)$ (8). La première partie de la fonctionnelle objectif vise un profil de vitesse cible \mathbf{u}_{cible} en sortie et la seconde partie tend à minimiser la puissance totale dissipée entre l'entrée de la buse Γ_i et la sortie Γ_O . γ et β sont des paramètres de pondérations et contribuent aussi à la pénalisation de la fonctionnelle objectif.

$$\mathcal{J}(\mathbf{u}, p) := \frac{\gamma}{2} \int_{\Gamma_o} (\mathbf{u} - \mathbf{u}_{cible})^2 d\Gamma_o - \beta \int_{\Gamma_i} \left(p + \frac{1}{2} u^2 \right) \mathbf{u} \cdot \mathbf{n} d\Gamma \quad (8)$$

L'objectif est de trouver α^* tel que $\mathcal{J}(\mathbf{u}, p)$ sous contraintes de \mathcal{R} :

$$\mathcal{R}(\mathbf{u}, p, k, \varepsilon, \alpha^*) = \mathbf{0}. \quad (9)$$

Nous introduisons maintenant une formulation lagrangienne du problème pour transformer ce problème d'optimisation avec contraintes en un problème sans contrainte.

Le vecteur $\boldsymbol{\psi}$ avec pour composantes les variables de Lagrange $\mathbf{u}^*, p^*, k^*, \varepsilon^*$ est alors introduit. La fonctionnelle de Lagrange s'écrit alors comme la somme de la fonctionnelle \mathcal{R} et du produit scalaire entre le vecteur $\boldsymbol{\psi}$ et le vecteur \mathcal{R} .

$$\mathcal{L} = \mathcal{J}(\mathbf{u}, p) + \int_{\Omega} \boldsymbol{\psi}^T \cdot \mathcal{R} d\Omega_B. \quad (10)$$

La fonctionnelle de Lagrange s'écrit alors :

$$\begin{aligned} \mathcal{L}(\mathbf{u}, p, k, \varepsilon, \mathbf{u}^*, p^*, \alpha^*) &= \mathcal{J}(\mathbf{u}, p) + \int_{\Omega} \mathbf{u}^* \left(\nabla \cdot (\mathbf{u} \otimes \mathbf{u}) + \nabla p - \nabla \cdot \left(\left(\frac{1}{Re} + \frac{1}{Re_T} \right) S(\mathbf{u}) \right) + \alpha^* \mathbf{u} \right) \\ &+ \int_{\Omega} p^* \nabla \cdot \mathbf{u} d\Omega_B + \int_{\Omega_B} k^* \left(\nabla \cdot (\mathbf{u}k) - \nabla \cdot \left(\left(\frac{1}{Re} + \frac{1}{Re_T \sigma_k} \right) \nabla k \right) - G + \varepsilon \right) d\Omega_B \\ &+ \int_{\Omega_B} \varepsilon^* \left(\nabla \cdot (\mathbf{u}\varepsilon) - \nabla \cdot \left(\left(\frac{1}{Re} + \frac{1}{Re_T \sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right) - C_1 \frac{\varepsilon}{k} G + C_2 \frac{\varepsilon^2}{k} \right) d\Omega_B. \quad (11) \end{aligned}$$

La dérivée par rapport aux variables de turbulence k et ε est considérée comme constante, on utilise l'hypothèse de turbulence gelée. L'utilisation de cette hypothèse n'influence pas de façon significative la distribution spatiale α^* (Othmer, 2008).

2.4 SYSTÈME D'OPTIMALITÉ

La dérivée de Fréchet de la fonctionnelle \mathcal{J} donne le système d'optimalité. La dérivée de Fréchet du lagrangien par rapport aux variables adjointes $\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \mathbf{u}^*} \delta \mathbf{u}^*$ et $\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial p^*} \delta p^*$ donnent directement le système d'équations primaires (1) et (2). Les dérivées de Fréchet par rapport aux variables primaires $\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \mathbf{u}} \delta \mathbf{u}$ et $\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial p} \delta p$ donnent les équations adjointes :

$$\mathcal{R}^{\mathbf{u}^*} = 2S(\mathbf{u}^*) \mathbf{u} + \nabla p^* + \nabla \cdot \left(\left(\frac{1}{Re} + \frac{1}{Re_T} \right) (\nabla \mathbf{u}^*) \right) + \alpha^* \mathbf{u} \quad \text{dans } \Omega_B. \quad (12)$$

$$\mathcal{R}^{p^*} = -\nabla \cdot \mathbf{u}^* \quad \text{dans } \Omega_B. \quad (13)$$

On introduit $u = \|\mathbf{u}\|$ et les indices t et n qui représentent respectivement les composantes tangentielles et normales des vecteurs vitesse primaires et adjoints. u_n est la projection de \mathbf{u} sur la normale \mathbf{n} et u_t est la projection de \mathbf{u} sur la tangente \mathbf{t} . La contribution des termes de frontières permettent de définir les conditions aux limites adjointes suivantes :

$$p^* = \mathbf{u} \cdot \mathbf{u}^* + u_n u_n^* + \left(\frac{1}{Re} + \frac{1}{Re_T} \right) (\mathbf{n} \cdot \nabla u_n^*) + \gamma(u_n - u_{cible,n}) - \beta \left(\frac{1}{2} u^2 + u_n^2 \right) \quad \text{in } \Gamma_I \quad (14)$$

$$\mathbf{0} = \mathbf{u}_t^* u_n + \gamma(\mathbf{u}_t - \mathbf{u}_{cible,t}) + \left(\frac{1}{Re} + \frac{1}{Re_T} \right) (\mathbf{n} \cdot \nabla \mathbf{u}_t^*) + \beta u_n \mathbf{u}_t \quad \text{in } \Gamma_O. \quad (15)$$

$$\mathbf{u}^* \cdot \mathbf{n} = -\beta \mathbf{u} \cdot \mathbf{n} \quad \text{sur } \Gamma_I. \quad (16)$$

Le problème d'optimisation est alors de trouver α^* pour $\mathcal{J}(\mathbf{u}, p)$ minimum tel que :

$$\mathcal{R}(\mathbf{u}, p, k, \epsilon, \alpha, \mathbf{u}^*, p^*) = \mathbf{0}. \quad (17)$$

3 MÉTHODES NUMÉRIQUES

Les équations sont implémentées et résolues sur la plate-forme OpenFOAM. Les équations sont discretisées par la méthode des volumes finis colocalisés. Le couplage pression et vitesse est réalisé à l'aide d'un algorithme SIMPLE. Les grandeurs primaires et adjointes (vitesses et pressions) sont résolues par une méthode de Gauss-Seidel. Le terme de convection est discrétisé par un schéma au second ordre de type *upwind*. Pour le terme de diffusion, on utilise un schéma du second ordre. L'algorithme d'optimisation choisi est un algorithme de descente classique basé sur le gradient de la fonctionnelle objectif. Nous fixerons le pas de descente à 1000. La vitesse cible \mathbf{u}_{cible} recherchée est celle présentée en figure 1. Les composantes de ce vecteur vitesse sont fixées de telle sorte que le flux d'air soit dirigé vers la zone de présence de l'utilisateur. Le vecteur \mathbf{u}_{cible} est alors fixé en sortie avec les composantes suivantes $(1 \ 0 \ -1)^T$.

Les équations sont résolues sur un maillage régulier composé de 18000 cellules hexaédriques. Un des inconvénients posé par l'optimisation topologique par distribution de matière est une sensibilité au maillage. Pour garantir la qualité et la précision des résultats un test d'indépendance maillage-résultats est réalisé en amont sur la résolutions des équations primaires. La valeur de Y^+ aux parois est de l'ordre de 30, cela permet l'utilisation d'une loi de paroi.

4 RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

Dans cette partie nous allons présenter les résultats des différentes configurations obtenues lors des simulations pour discuter de l'influence de différents paramètres sur la minimisation de la fonctionnelle objectif et leurs influences sur la forme finale.

4.1 INFLUENCE DES COEFFICIENTS DE PONDÉRATIONS γ ET β

Deux configurations sont proposées pour les simulations. Pour le cas 1, l'objectif est de trouver la géométrie optimale uniquement en atteignant la vitesse cible \mathbf{u}_{cible} . La valeur des paramètres de pondérations est alors $\gamma = 1$ et $\beta = 0$. Dans un second temps en fixant $\gamma = 1$ et $\beta = 1$, La question qui se pose alors est de vérifier la possibilité d'atteindre une vitesse cible en sortie de domaine tout minimisant la puissance totale dissipée. L'optimisation topologique par distribution de matière permet de trouver une géométrie optimale par une extraction du contour du paramètre de contrôle α^* . Cette valeur α^* conditionne donc la géométrie optimale. La figure 2 présente la distribution de α^* pour les deux cas lorsque $\beta = 0$ (a) et $\beta = 1$ (b). La zone où l'imperméabilité est plus forte est en rouge, c'est la zone qui définit le contour solide de la géométrie optimale. La vitesse de fluide dans cette zone tend vers zéro. En bleu le milieu est fortement perméable la vitesse du fluide n'y est pas pénalisée. Lorsque seule la minimisation de l'écart entre \mathbf{u} et \mathbf{u}_{cible} sur Γ_O est visée, la distribution de α^* donne une forme qui permet au vecteur vitesse \mathbf{u} d'être orienté dans la direction de \mathbf{u}_{cible} . Dans un second temps lorsque l'objectif de vitesse cible est combiné à la réduction de la puissance totale dissipée, la forme optimale donnée par la distribution de α^* (b) est différente de (a). Le vecteur vitesse \mathbf{u} en sortie de domaine est dans la direction de \mathbf{u}_{cible} sur Γ_O mais la valeur de \mathcal{J} (tableau 1) est plus grande que lorsque $\beta = 0$. La forme optimale présente alors moins de changement de direction pour atteindre l'objectif visé. La réduction de la puissance dissipée est alors de 98% par rapport à la distribution (a). Il est alors possible de trouver une forme pour contrôler la forme en sortie tout en réduisant la puissance totale dissipée.

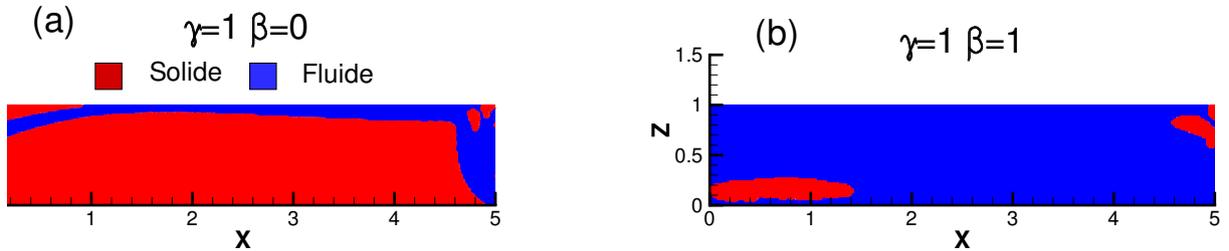


FIGURE 2. Distribution de α^* représentant la forme optimale pour $\gamma = 1$ et $\beta = 0$ (a) et $\gamma = 1$ et $\beta = 1$ (b)

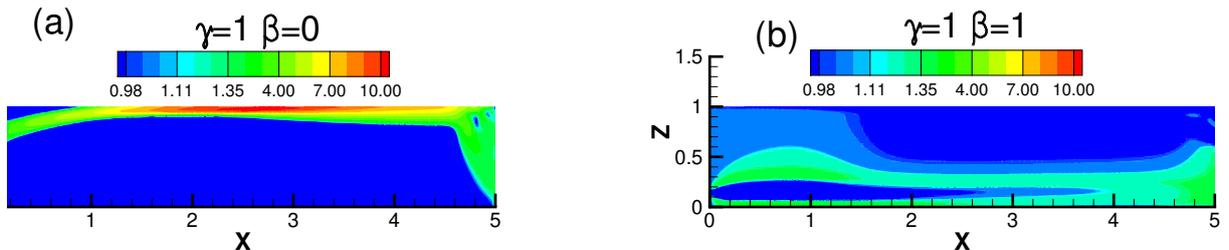


FIGURE 3. Comparaison de l'amplitude de vitesse primaire pour $\gamma = 1$ et $\beta = 0$ (gauche) et $\gamma = 1$ et $\beta = 1$ (droite)

La méthode d’optimisation topologique utilisée dans cet article permet de trouver une géométrie en ajoutant de la matière au domaine. Le paramètre de contrôle α^* est ajouté au milieu en pénalisant la vitesse primaire pour la faire tendre vers zéro. L’étude du champ de vitesse primaire (figure 3 identifie bien deux zones : une « fluide » où l’amplitude du champ de vitesse est différente de zéro, et l’autre « solide » où l’amplitude de vitesse est nulle, ou tend vers zéro. Ce paramètre influence donc la vitesse du fluide. On se propose d’étudier son influence sur l’optimisation.

4.2 INFLUENCE DE LA VALEUR MAXIMALE α_{max}^*

Lors de la mise en place numérique du problème d’optimisation, la valeur de α^* est bornée par une valeur maximale α_{max}^* , pour éviter la divergence des simulations. Nous avons pour cela effectué des simulations pour des valeurs de α_{max}^* égales à 1, 1000 et 10000. Le tableau 1 montre l’évolution de la valeur convergée de \mathcal{J} pour différentes valeurs de α_{max}^* . Lorsque la valeur de α_{max}^* est faible, la valeur de la fonctionnelle objectif convergée est de 0,55. L’objectif initial d’orientation du vecteur vitesse \mathbf{u} en sortie de domaine n’est pas atteint. Les vecteurs \mathbf{u} en sortie ne sont pas dans la direction de la zone de contrôle. Ces résultats sont liés à la distribution de α^* qui ne permet pas au flux d’air en sortie d’être dans la direction fixée par \mathbf{u}_{cible} . Ces résultats s’expliquent par une imperméabilité trop faible lorsque α^* est faible. La matière virtuelle ne pénalise pas suffisamment la vitesse d’écoulement pour atteindre l’objectif. Cette comportement est confirmée pour les valeurs de α_{max}^* de 1000 et 10000, où la minimisation de la fonctionnelle objectif tend vers zéro lorsque $\gamma = 1$ et $\beta = 0$. Lorsque l’on pose $\beta = 1$ \mathcal{J} tend plus difficilement vers zéro mais l’orientation du vecteur vitesse en sortie de domaine est respectée et la puissance totale dissipée est fortement minimisée. Ces résultats montrent que la minimisation de la puissance totale dissipée influence plus fortement la minimisation de \mathcal{J} . Les résultats ont montré que pour des valeurs de α_{max}^* supérieures à 10000 il n’y avait plus d’évolution significative dans la distribution de α^* .

α_{max}^*	$\mathcal{J}(\gamma = 1, \beta = 0)$	$\mathcal{J}(\gamma = 1, \beta = 1)$
1	0,55	0,47
1000	0,06	0,45
10000	0,02	0,55

TABLE 1: Influence de α_{max}^* sur la minimisation de la fonctionnelle objectif

4.3 INFLUENCE DU NOMBRE DE REYNOLDS

Nous allons dans cette partie évaluer l’influence du nombre de Reynolds sur la forme optimale obtenue. Les simulations ont été réalisées pour des nombre des Reynolds allant de 2000 à 30000. Lorsque $\gamma = 1$ et que $\beta = 0$ la forme obtenue est non dépendante au nombre de Reynolds. Pour tous les nombres de Reynolds évalués la forme obtenue est celle similaire à la forme présentée en figure 2 (a). De plus une valeur de $\mathcal{J} = 0.03$ pour l’ensemble des nombre de Reynolds étudiée confirme cette l’indépendance au nombre de Reynolds. Quelque soit la valeur du nombre de Reynolds la minimisation de \mathcal{J} est effective.

Lorsque $\gamma = 1$ et $\beta = 1$ la forme obtenue est alors dépendante du nombre de Reynolds. Pour des valeurs de Reynolds inférieures à 5000 le seule amas de « solide virtuel » se situe en sortie de domaine. Pour des valeurs plus grande un nouvel amas se trouve entre les coordonnées $X = 0$ et $X = 1,4$ (figure 4. La dominance de la minimisation de la puissance totale dissipée dans l’équation (8) est de nouveaux observable dans ces résultats. Il s’expliquent ainsi par la dépendance de la puissance totale dissipée au nombre de Reynolds. Cette évolution du contour de α^* avec le nombre de Reynolds influence aussi la minimisation de \mathcal{J} qui varie aussi avec le nombre de Reynolds.

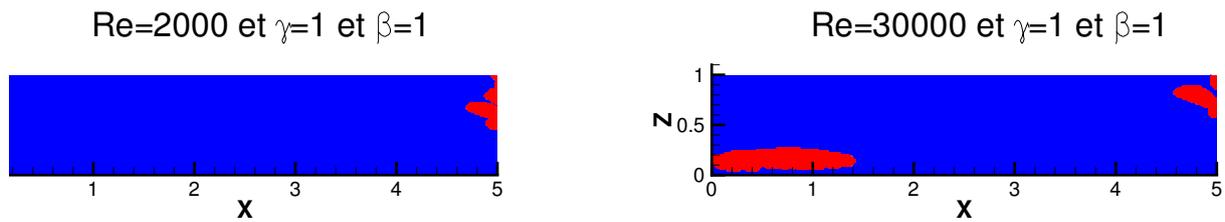


FIGURE 4. Comparaison des contours de α^* pour $Re = 2000$ et $Re = 30000$ avec $\gamma = 1$ et $\beta = 1$

5 CONCLUSION

Dans cet article nous avons proposé une méthode pour définir la géométrie optimale d'une bouche de ventilation. Nous avons pour cela utilisé une méthode d'optimisation topologique par distribution de matière. Pour bien poser le problème et comprendre l'influence des différents paramètres les résultats sont présentés pour un écoulement turbulent en deux dimensions. Les résultats présentés dans cet article montrent qu'il est possible de définir une géométrie optimale de bouche de ventilation avec pour objectif une vitesse cible ou encore avec la combinaison de la réduction de la puissance totale dissipée. Les perspectives à ce travail sont la connexion à un sous domaine pour vérifier l'influence sur les mouvement d'air dans la pièce. Une fois le problème bien posé en deux dimensions nous nous intéresserons à un domaine en trois dimensions pour représenter aux mieux les effets turbulents dans le bâtiment. A plus long terme nous proposerons l'essai par une expérimentation de ces formes à échelle réelle.

RÉFÉRENCES

- Bendsoe, M. P. et Sigmund, O. (2003). *Topology optimization : theory, methods, and applications*, volume 2nd Edition.
- Borrvall, T. et Petersson, J. (2003). Topology optimization of fluids in Stokes flow. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 107(August 2002) :77–107.
- El Hassan, M., Meslem, A., et Abed-Meraim, K. (2011). Experimental investigation of the flow in the near-field of a cross-shaped orifice jet. *Physics of Fluids*, 23(4) :045101.
- Finnegan, M. J., Pickering, C. a., et Burge, P. S. (1984). The sick building syndrome : prevalence studies. *British medical journal (Clinical research ed.)*, 289(6458) :1573–1575.
- Gersborg-Hansen, a., Sigmund, O., et Haber, R. (2005). Topology optimization of channel flow problems. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 30(3) :181–192.
- Kontoleonos, E. a., Papoutsis-Kiachagias, E. M., Zymaris, a. S., Papadimitriou, D. I., et Giannakoglou, K. C. (2012). Adjoint-based constrained topology optimization for viscous flows, including heat transfer. *Engineering Optimization*, (December) :1–21.
- Othmer, C. (2008). A continuous adjoint formulation for the computation of topological and surface sensitivities of ducted flows. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, (March) :861–877.

Optimisation des enveloppes de bâtiments commerciaux – cartographie des stratégies de conception passive en France

Emmanuel Bozonnet*¹, Remon Lapisa², Patrick Salagnac¹, Marc Abadie¹

¹ Université de la Rochelle, Laboratoire des Sciences de l'Ingénieur pour l'Environnement (LASIE), France

² Université de Padang, Indonésie

* emmanuel.bozonnet@univ-lr.fr

RESUME. Les bâtiments commerciaux de grande surface sont caractérisés par de grands volumes et des structures légères de faible hauteur. Dans ce contexte, le confort thermique et visuel est un enjeu commercial résolu par des systèmes énergivores de climatisation et d'éclairages artificiels. La conception passive de l'enveloppe du bâtiment n'est alors pas du tout envisagée. Les principales surfaces d'échanges de l'enveloppe sont la toiture et le sol. Afin d'optimiser le rendement énergétique et les stratégies de rafraîchissement passif plusieurs paramètres liés à l'enveloppes ont été sélectionnés : l'isolation thermique, la ventilation naturelle, et les caractéristiques radiatives de toiture. Le processus d'optimisation vise deux objectifs qui peuvent être contradictoires : l'efficacité énergétique pour le chauffage et le confort thermique d'été sans climatisation. De plus nous considérons ici tous les climats français avec rafraîchissement passif, et aussi les effets du changement climatique. Les résultats d'optimisation par algorithme génétique NSGA-II permet de mettre en évidence le lien fort des solutions passives aux caractéristiques climatiques. Pour les concepteurs, cette méthodologie donne de nombreuses solutions parmi lesquelles des solutions de meilleurs compromis sont proposées pour l'ensemble des climats en France. Une synthèse cartographique est proposée pour les principaux paramètres d'enveloppe pour un bâtiment passif, qui comprend un critère de choix final sur les coûts de construction. La méthodologie proposée et les premiers résultats numériques peuvent être utiles pour la conception des bâtiments commerciaux, mais aussi étendue à d'autres paramètres et bâtiments.

MOTS-CLÉS : optimisation multicritère, rafraîchissement passive, simulation thermique dynamique, ventilation naturelle, cool roofs.

ABSTRACT. Large indoor volumes and lightweight materials characterize low-rise commercial buildings. Thermal and visual comfort is a commercial issue usually solved with air conditioning and artificial lightings. This could be considered in the building envelope design itself, throughout a passive building design. These envelopes are characterized by high thermal interactions of ground floor and roof surface to environment. In order to optimize energy performance and passive thermal strategies, several parameters have been selected: thermal insulation of various walls, natural ventilation, roof radiative characteristics, windows and skylights surfaces. The proposed optimization process has been developed considering both mitigation objectives of energy consumption and summer thermal discomfort. Moreover, we consider here all French climates, with passive cooling only for summer, and climate change effects. Using NSGA-II optimization algorithm, this study points out that optimal solutions depend greatly on climate characteristics. For stakeholders, the optimal design can be chosen given the Pareto front results, and compromises are mapped for France considering both objectives and construction costs. This methodology and the numerical results can be helpful for design guidelines of new commercial building or refurbishments as the proposed study is based on a typical low-rise building for commercial.

KEYWORDS: multicriteria optimization, passive cooling, building simulation, natural ventilation, cool roofs.

1. INTRODUCTION

1.1. CONTEXTE ÉNERGÉTIQUE ET BÂTIMENTS COMMERCIAUX

Les bâtiments commerciaux représentent 7% de la consommation d'énergie dans le monde (Pérez-Lombard et al., 2008) et cette consommation d'énergie est fortement liée au conditionnement des ambiances de ces bâtiments, plus de 60% de leur consommation (Carvalho et al., 2010). Aussi, compte-tenu de la relative faible performance thermique dans la conception même de ces bâtiments commerciaux, un fort potentiel peut être identifié ici pour les économies d'énergie et les impacts environnementaux. De nombreux paramètres d'optimisation peuvent être étudiés dans la conception thermique, des systèmes de climatisation ou de chauffage performants peuvent être visés, mais c'est en premier lieu le processus de conception de l'enveloppe du bâtiment et qui doit être étudiée. La faible performance de cette typologie d'enveloppe a permis de mettre en évidence l'impact direct sur les consommations de climatisation de solutions de rafraîchissement passif tels que les cool roofs (Levinson, Akbari, 2010; Lapisa et al., 2013c). Cependant, pour des climats tempérés tels qu'en France, ses solutions de rafraîchissement passif peuvent souvent être une alternative complète à la climatisation en évitant les coûts d'installation et d'exploitation/maintenance ainsi que les impacts environnementaux. L'efficacité de ces stratégies de chauffage/refroidissement dépend des conditions climatiques, des scénarios d'occupation et d'usage, de la dynamique du bâtiment et son inertie, du mode de ventilation, etc. La conception de l'enveloppe bâtie est alors complexe et demande un mode de conception intégrée au-delà de la conception bioclimatique liée à la situation géographique. De plus les objectifs de confort d'été peuvent être contradictoires avec l'optimisation de la performance énergétique de chauffage. C'est cette optimisation multicritère qui est abordée ici.

1.2. DÉFINITION D'UN BÂTIMENT COMMERCIAL GÉNÉRIQUE – MORPHOLOGIE ET SCÉNARIOS TYPES

Dans cette étude nous considérons un bâtiment commercial type représentatif de la morphologie

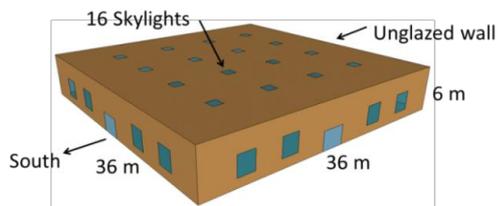


Figure 1 - géométrie de référence pour le bâtiment type commercial

d'un centre commercial de grand volume et pour lequel nous optimiserons les paramètres d'enveloppe et de rafraîchissement passif. C'est une structure légère en construction métallique de surface au sol 36x36m et de hauteur sous plafond de 6m (Figure 1). L'inertie thermique de l'enveloppe du bâtiment est liée uniquement au dalage en béton de 160mm. Les rayonnages apportent également de l'inertie interne (30% de la surface au sol) et sont modélisés de façon simplifiée par les différents matériaux constitutifs (cartons, liquides, métaux et plastiques).

La perméabilité à l'air du bâtiment est typique (2cm /m) d'un bâtiment de construction métallique (Persily, 1998). Un taux d'occupation moyen est défini par 11,6m /personne, typique dans ce cas (Deru et al., 2011) avec un scénario de présence de 7h à 22h chaque jour de la semaine excepté le dimanche. Le système de chauffage a pour consigne 19°C en occupation et 5°C en inoccupation, et la ventilation double flux avec récupérateur pour l'hiver a un débit de 0,5vol/h en occupation. Il n'y a aucun système de climatisation installé et aux gains internes des occupants s'ajoutent l'éclairage artificiel qui est automatique si l'éclairage naturel est inférieur à 300lux (NF EN 12464-1, 2011; Rea, 1993). Le rafraîchissement passif du bâtiment est en partie pris en charge par la ventilation naturelle nocturne prévue par l'ouverture pilotée des lan-

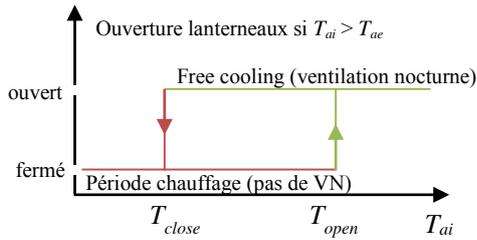


Figure 2 - périodes de chauffage et de ventilation nocturne déterminées par les limites de température intérieure T_{close} et T_{open}

terneaux de toiture de 23h à 6h le lendemain, donc en dehors des périodes d'occupation et sans ventilation mécanique supplémentaire. Les entrées d'air sont disposées en partie basse en façade du bâtiment. Le pilotage de l'ouverture pour la ventilation naturelle doit se faire en dehors des périodes de chauffage et donc déterminé par le diagramme de contrôle *Figure 2*. Durant les périodes de non-chauffage (principalement l'été) les lanterneaux sont pilotés en fonction des températures d'air extérieur et intérieur (T_{ae} et T_{ai}). Le choix des limites des périodes de chauffage et de ventilation naturelle T_{close} et T_{open} sont déterminants à la fois pour le potentiel

annuel de rafraîchissement passif et pour le besoin de chauffage. Pour ce bâtiment type nous avons alors défini des paramètres d'enveloppe par défaut qui sont optimisés dans l'étude : la toiture-terrasse est équipée de lanterneaux de toiture représentant 2,42% de la surface, soit 31,36m (*Figure 1a et b*) ; toutes les façades ont 30m² de vitrage à l'exception de la façade nord ; ces façades sont bien isolées (14cm de laine de verre et 15cm de laine de roche) ; la toiture est également bien isolée (24cm de laine de roche) ; le dallage sur terre-plein est non isolé (16cm de béton) et le sol considéré est sableux.

1.3. CONCEPTION OPTIMALE ET DÉFINITION DES FONCTIONS OBJECTIF DANS LE CONTEXTE CLIMATIQUE EN FRANCE

Le principal objectif est ici de définir des règles générales pour le dimensionnement des enveloppes selon la typologie définie précédemment de bâtiment commercial de faible hauteur. Les variables d'optimisation concernent l'enveloppe et les différentes techniques passives selon le tableau suivant *Table 1*.

Table 1 paramètres d'optimisation et leurs impacts sur la conception passive de chauffage, rafraîchissement, éclairage et ventilation.

Paramètres d'optimisation	chauffage	climatisation	éclairage	ventilation	valeurs	Unités
orientation	×	×	×		0 – 360	°
Réfectivité solaire de toiture	×	×			0,1 – 0,9	-
Surface de lanterneaux	×	×	×	×	2,5 – 15	%
Isolation thermique toiture	×	×			0,1 – 50	cm
Isolation thermique sol	×	×			0,1 – 50	cm
Isolation thermique façades	×	×			0,1 – 50	cm
T_{open}	×	×		×	15 – 26	°C
T_{close}	×	×		×	19 – 26	°C

La performance énergétique, y compris l'éclairage et la consommation de ventilation, et le confort thermique sont les 2 fonctions objectives du calcul d'optimisation. La technique des cool roofs est intéressante en climat chaud méditerranéen (Synnefa et al., 2007), mais peut également s'appliquer en climat modéré ou froid (Bozonnet et al., 2011; Hosseini, Akbari, 2015). De plus ces 2 techniques sont complémentaires et peuvent atteindre de bonnes performances combinée (Lapisa et al. 2013a). Les bons compromis entre les objectifs de rafraîchissement passif et de performance énergétique d'hiver sont étudiés ici pour la diversité des climats en France qui doivent permettre de dégager des tendances adaptées pour les paramètres d'enveloppe (variables d'optimisation). Considérant la variabilité climatique l'ensemble des calculs proposés est également menés avec les prédictions de réchauffement cli-

matique, ce qui permet d’aborder les possibles modifications à venir dans la conception optimale de bâtiments.

2. SIMULATION

2.1. CLIMATS EN FRANCE ET CHANGEMENT CLIMATIQUE

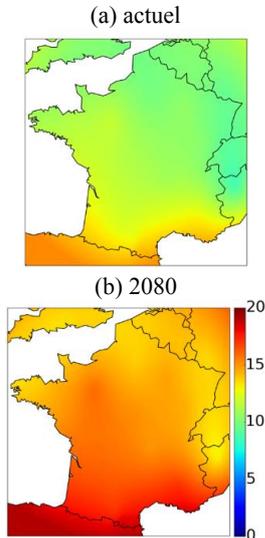


Figure 3 – températures moyennes annuelles en °C

24 villes ont été sélectionnées pour couvrir la variété des conditions climatiques en France à partir des données climatiques pour un climat normalisé actuel, source Meteonorm©. Ces mêmes régions ont été étudiées en prenant en compte le possible changement climatique à l’horizon 2080 sur la base de modèles spécifiques développés par l’Université de Southampton (Belcher et al., 2005; Jentsch et al., 2013). La Figure 3 présente la distribution sur le territoire des moyennes annuelles de température pour le climat actuel, Figure 3a, et en 2080, Figure 3b. Cette température, Figure 3, augmente d’environ 3,9°C en moyenne à l’échelle du territoire. Au-delà de cette cartographie, tous les paramètres météorologiques sont ici pris en compte au pas de temps horaire. Ce niveau de détail est ici plus détaillé que le cadre réglementaire habituel et permet d’envisager aussi des tendances utiles à analyser pour de futures réglementations.

2.2. MODÈLE THERMOAÉRAULIQUE COUPLÉ DU BÂTIMENT ET ALGORITHME D’OPTIMISATION

La simulation couplée a été réalisée avec TRNSYS couplé à CONTAM (infiltrations, poussées thermiques) et le modèle tridimensionnel de sol (10m de profondeur). Une année complète supplémentaire de mise en régime est utilisée pour l’initialisation de chaque calcul comme détaillé dans les précédentes études (Lapisa et al. 2013b; Lapisa et al. 2013). Les solutions optimales sont calculées avec les 8 variables présentées Table 1 pour minimiser à la fois la consommation d’énergie primaire du bâtiment pour l’éclairage et le chauffage (EP kWh/(m .an)) et les degrés-heures d’inconfort thermique d’été (DH °Ch). Ce critère d’inconfort thermique DH est calculé conformément à la norme (NF EN 15251, 2007) pour les bâtiments non climatisés et qui prend en compte le confort adaptatif. La méthode par algorithme génétique NSGA-II utilisée (Deb et al., 2002) est un type de méthode qui a été largement utilisé pour la conception des bâtiments (Magnier, Haghghat, 2010), la rénovation dans l’existant (Chantrelle et al., 2011), ou l’optimisation de la consommation de bâtiments à énergie zéro (Carlucci et al., 2015). Les paramètres de l’algorithme d’optimisation déterminés par une étude préalable sont conformes aux valeurs de la littérature (Nassif et al., 2005; Gosselin et al., 2009; Wright et al., 2002) : population initiale de 100 individus, 10 générations, coefficients de croisement de 90% et de mutation de 4%. Pour chaque climat ou localisation considéré, le temps de simulation est d’environ 28h pour 2000 simulations, période de 2 ans au pas de temps horaire, avec un calcul sur un PC de 8 processeurs et une parallélisation du calcul. Les solutions Pareto-optimales telles que représentées pour un des climats étudiés Figure 5, varient des solutions les plus performantes énergétiquement (EP_{min}) aux solutions les plus confortables en situation estivale (DH_{min}).

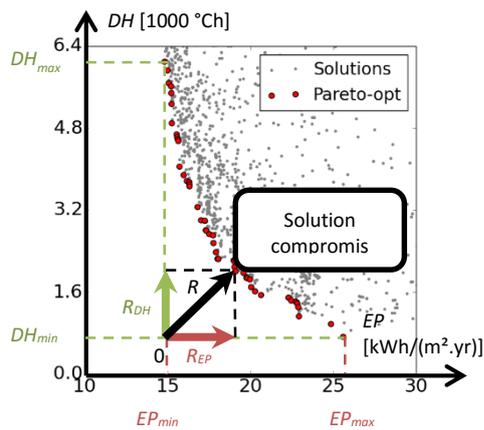


Figure 4 solutions Pareto-optimales choix d'un compromis R

tants relatifs à des gains faibles.

3. DISCUSSIONS

3.1. DEMANDE ÉNERGÉTIQUE ET INCONFORT D'ÉTÉ POUR LES SOLUTIONS OPTIMISÉES EN FRANCE

Les solutions de compromis obtenues pour les 24 localisations en France sont cartographiées, *Figure 5*, en termes d'énergie primaire EP en kWh/(m².an) et l'inconfort thermique d'été DH en °Ch.

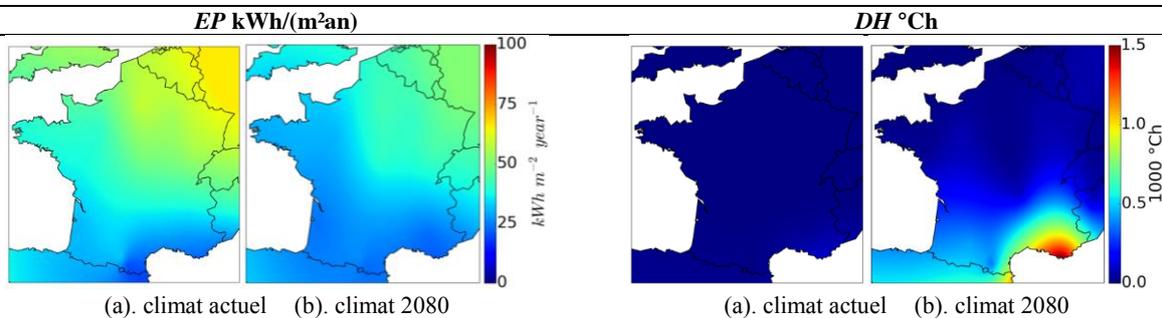


Figure 5 (a,b) demande énergétique (EP) et (c,d) degrés-heures d'inconfort (DH) en France pour les solutions optimales

Pour le climat actuel (*Figure 5a* et *c*), la demande énergétique des bâtiments optimisés varie de 18,9kWh/(m².an) pour Nice jusqu'à 65,7kWh/(m².an) pour Metz. L'inconfort chaud dans ces conditions actuelles reste très faible pour toutes les solutions optimisées, avec seulement un faible taux d'inconfort à Marseille au maximum de l'ordre de 117°Ch sans climatisation. Avec les modifications liées au réchauffement climatique à l'horizon 2080, les performances énergétiques, fortement liées aux consommations de chauffage, sont améliorées avec des valeurs d' EP de l'ordre de 21,2 à 50,9kWh/(m².an). Par contre, l'inconfort d'été augmente fortement, avec un maximum de 1662°Ch à Marseille. Ces performances obtenues mettent en évidence les optimums atteignables en fonction des climats, et les parties suivantes détaillent les combinaisons de paramètres d'enveloppes (variables d'optimisation) à utiliser pour les atteindre.

3.2. TOITURES COMMERCIALES – TAUX DE LANTERNEAUX POUR LA VENTILATION NATURELLE ET STRATÉGIE COOL ROOFS EN FRANCE

Les lanterneaux de toiture ont un effet potentiellement positif sur les performances énergétiques et sur le confort d'été de par l'éclairage naturel, les apports solaires d'hiver, et la ventilation naturelle d'été. Cependant, pour des bâtiments fortement isolés, ces ouvrants représentent un élément déperditif en hiver et les apports solaires d'été sont pénalisants en été. Les valeurs optimales trouvées ici varient entre 2,5% et 7,5%, pour le climat actuel. Le ratio optimal est inférieur à 4% dans les régions du nord, tandis que pour les régions du sud on atteint jusqu'à 7,5%, principalement du fait des gains d'éclairage naturel. Cependant, avec l'effet du réchauffement climatique les gains solaires d'été diurnes font redescendre ce taux autour de 4%. Les paramètres de contrôle optimum pour l'ouverture des lanterneaux, définis précédemment *Figure 2* par les limites de température intérieure T_{close} et T_{open} , varient selon les cartographies de la *Figure 6*.

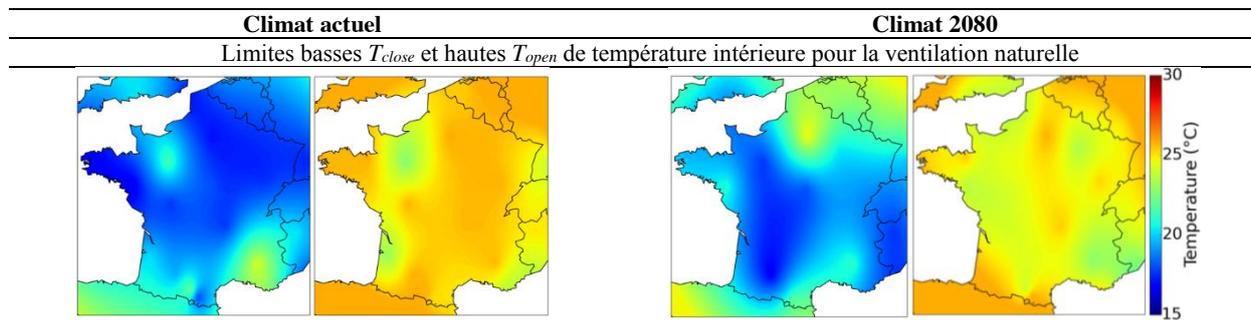
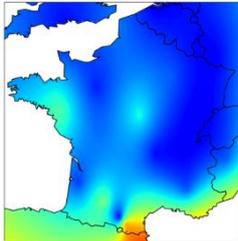


Figure 6 niveaux limites de température pour le pilotage des lanterneaux

(a) climat actuel



(b) climat 2080

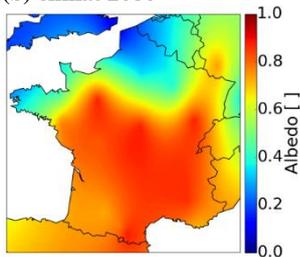


Figure 7 – valeurs optimales de l'albedo

Ces valeurs optimales varient entre 18 et 26°C. Sachant que la consigne de chauffage en occupation est de 19°C, on trouve logiquement des valeurs limites d'ouverture T_{close} autour de cette valeur excepté pour quelques villes (*Figure 6a* et *b*). La même tendance peut s'observer pour la limite de fermeture T_{open} qui se situe généralement autour de la limite de l'inconfort chaud à environ 26°C, *Figure 6c* et *d*. Pour 2080, les effets du réchauffement climatique ont tendances à faire décroître la limite de fermeture des lanterneaux T_{open} , pour la plupart des régions, ce qui signifie que la ventilation naturelle est possible plus tôt et plus souvent dans l'année du fait de la prédominance de l'inconfort d'été. Enfin, dans les 2 configurations, les limites hautes et basses sont parfois très proches, ce qui traduit la concurrence forte entre les limites sur les performances d'hiver et d'été. La stratégie de rafraîchissement passif par augmentation de l'albédo de toiture, dite cool roofs, est complémentaire de la ventilation par les lanterneaux. Les valeurs optimales cartographiées *Figure 7* montrent les compromis retenus pour obtenir simultanément pour les 2 objectifs de limitation énergétique et inconfort chaud.

3.3. ISOLATION THERMIQUE

L'isolation thermique doit être définie tout en veillant à maintenir une inertie adéquate car l'efficacité des solutions de rafraîchissement passif en dépendent fortement (Lapisa et al., 2013c) tout comme éventuellement le chauffage. Ainsi l'isolation sous dalle peut être contre-productive, tout

comme l'isolation sous toiture qui peut limiter le rafraîchissement nocturne de l'ambiance intérieure. Pourtant, une forte isolation de paroi est généralement préconisée pour des bâtiments passifs performants dans les climats modérés à froid pour limiter les besoins de chauffage. Pour la typologie de bâtiment étudiée ici, les résultats de l'optimisation montrent de fortes variations qui sont cartographiées *Figure 8* pour les seules toitures et sols ici.

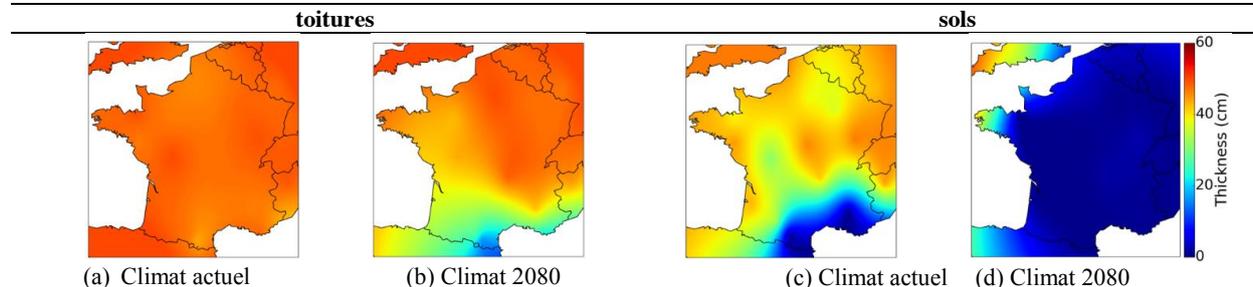


Figure 8 isolation thermique optimale de toiture (a et b), et sous dalle (c et d) en cm

4. CONCLUSIONS

Cette étude d'optimisation des bâtiments commerciaux en France peut servir de base dans l'aide à la conception passive intégrant le rafraîchissement, les besoins de chauffage et d'éclairage artificiel. Ces cartographies ont requis environ 1344h de calcul pour un total de 24 localisations simulées sur 2 années complètes au pas de temps horaire et pour des conditions actuelles et à 2080. Les résultats à exploiter, parmi les 48 ensembles de solutions Pareto-optimales, ont été en 1^{ère} approche synthétisés sous la forme de cartographies et d'un compromis énergétique, confort thermique et coût de mise en œuvre. Ces cartographies montrent l'intérêt du rafraîchissement passif pour l'ensemble du territoire sans système de climatisation. Cependant, le scénario de réchauffement climatique à l'horizon 2080 montre une augmentation du taux d'inconfort d'été de 265°C_h en moyenne et 1455°C_h au maximum à Marseille, pour des bâtiments pourtant adaptés. Le choix d'un compromis pourrait alors être adapté avec par exemple une valeur limite d'inconfort acceptable ou de consommation d'énergie, mais également en intégrant le surcoût (installation, maintenance et environnemental) d'un système de climatisation s'il devenait nécessaire. Cette étude montre aussi l'intérêt d'une conception intégrée, optimisant l'enveloppe en relation à l'usage du bâtiment et qui inclue le pilotage même des systèmes, ici la ventilation naturelle. Cette intégration des systèmes pourrait être plus poussée et de nouvelles stratégies de rafraîchissement pourraient mener à de nouveaux paramètres d'enveloppe optimale. Enfin, la méthodologie proposée peut être développée et actualisée pour d'autres typologies de bâtiments.

5. REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient le gouvernement Indonésien pour son soutien financier.

6. BIBLIOGRAPHIE

- Belcher, S. E.; Hacker, J. N.; Powell, D. S. (2005): „Constructing design weather data for future climates“. In: *Building Services Engineering Research and Technology*. 26 (1), p. 49–61.
- Bozonnet, E.; Doya, M.; Allard, F. (2011): „Cool roofs impact on building thermal response: A French case study“. In: *Energy and Buildings*. 43 (11), p. 3006-3012, doi: 10.1016/j.enbuild.2011.07.017.
- Carlucci, Salvatore; Cattarin, Giulio; Causone, Francesco; et al. (2015): „Multi-objective optimization of a nearly zero-energy building based on thermal and visual discomfort minimization using a non-dominated sorting genetic algorithm (NSGA-II)“. In: *Energy and Buildings*. doi: 10.1016/j.enbuild.2015.06.064.

- Carvalho, M.M.Q; La Rovere, E.L; Gonçalves, A.C.M (2010): „Analysis of variables that influence electric energy consumption in commercial buildings in Brazil“. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 14 , p. 3199-3205, doi: 10.1016/j.rser.2010.07.009.
- Chantrelle, Fanny Pernodet; Lahmidi, Hicham; Keilholz, Werner; et al. (2011): „Development of a multicriteria tool for optimizing the renovation of buildings“. In: *Applied Energy*. 88 (4), p. 1386-1394, doi: 10.1016/j.apenergy.2010.10.002.
- Chardon, Serge; Brangeon, Boris; Bozonnet, Emmanuel; et al. (2015): „A multi objective design tool for the french detached house market: cost and energy performance optimization“. In: *14th International Building Simulation Conference*. Hyderabad, India p. 2073-2079. — ISBN: 978-93-5230-118-8
- Deb, K.; Pratap, A.; Agarwal, S.; et al. (2002): „A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II“. In: *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*. 6 (2), p. 182-197, doi: 10.1109/4235.996017.
- Deru, Michael; Filed, Kristin; Studer, Daniel; et al. (2011): *U.S. Department of Energy Commercial Reference Building Models of the National Building Stock*. Colorado,US: National Renewable Energy Laboratory.
- Gosselin, Louis; Tye-Gingras, Maxime; Mathieu-Potvin, François (2009): „Review of utilization of genetic algorithms in heat transfer problems“. In: *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 52 (9–10), p. 2169-2188, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2008.11.015.
- Hosseini, Mirata; Akbari, Hashem (2015): „Effect of cool roofs on commercial buildings energy use in cold climates“. In: *Energy and Buildings*.
- Jentsch, Mark F.; James, Patrick A. B.; Bourikas, Leonidas; et al. (2013): „Transforming existing weather data for worldwide locations to enable energy and building performance simulation under future climates“. In: *Renewable Energy*. 55 , p. 514-524, doi: 10.1016/j.renene.2012.12.049.
- Lapisa, Remon; Bozonnet, Emmanuel; Abadie, Marc; et al. (2013a): „Design impacts of cool roof coating, ventilation and thermal inertia on commercial low-rise building energy demand and summer comfort“. In: *34th AIVC Conference*. Athens, Greece.
- Lapisa, Remon; Bozonnet, Emmanuel; Abadie, Marc; et al. (2013b): „Effect of ground thermal inertia on the energy balance of commercial low-rise buildings“. In: *Building Simulation 2013*. Chambéry, France.
- Lapisa, Remon; Bozonnet, Emmanuel; Abadie, Marc Olivier; et al. (2013c): „Cool roof and ventilation efficiency as passive cooling strategies for commercial low-rise buildings – ground thermal inertia impact“. In: *Advances in Building Energy Research*. 7 (2), p. 192-208, doi: 10.1080/17512549.2013.865559.
- Levinson, Ronnen; Akbari, Hashem (2010): „Potential benefits of cool roofs on commercial buildings: conserving energy, saving money, and reducing emission of greenhouse gases and air pollutants“. In: *Energy Efficiency*. 3 , p. 53-109.
- Magnier, Laurent; Haghghat, Fariborz (2010): „Multiobjective optimization of building design using TRNSYS simulations, genetic algorithm, and Artificial Neural Network“. In: *Building and Environment*. 45 (3), p. 739-746, doi: 10.1016/j.buildenv.2009.08.016.
- Nassif, Nabil; Kaji, Stanislaw; Sabourin, Robert (2005): „Optimization of HVAC control system strategy using two-objective genetic algorithm“. In: *HVAC & R Research*. 11 (3), p. 459–486.
- NF EN 12464-1 (2011): „Lighting of work places“. In: .
- NF EN 15251 (2007): „Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics“. In: .
- Pérez-Lombard, Luis; Ortiz, José; Pout, Christine (2008): „A review on buildings energy consumption information“. In: *Energy and Buildings*. 40 (3), p. 394-398, doi: 10.1016/j.enbuild.2007.03.007.
- Persily, Andrew K. (1998): *Airtightness of commercial and institutional buildings: blowing holes in the myth of tight buildings*. Building and Fire Research Laboratory, National Institute of Standards and Technology.
- Rea, Mark Stanley (1993): „Lighting handbook: reference & application“. In: *Illuminating Engineering Society of North America, New York*. 8th Edition , p. 355.
- Swami, M. V.; Chandra, S. (1988): „Correlations for pressure distribution on buildings and calculation of natural-ventilation airflow“. In: *ASHRAE transactions*. 94 (3112), p. 243–266.
- Synnafa, A.; Santamouris, M.; Akbari, H. (2007): „Estimating the effect of using cool coatings on energy loads and thermal comfort in residential buildings in various climatic conditions“. In: *Energy and Buildings*. 39 (11), p. 1167-1174, doi: 10.1016/j.enbuild.2007.01.004.
- Wright, Jonathan A.; Loosemore, Heather A.; Farmani, Raziye (2002): „Optimization of building thermal design and control by multi-criterion genetic algorithm“. In: *Energy and Buildings*. 34 (9), p. 959–972.

Comparison between the design phase and the real behavioral measurements of an Energy Efficient Building

Ana Maria Stefanoiu*^{1,2}, Léa Gondian¹, Monika Woloszyn¹, Etienne Wurtz², Arnaud Jay², Catherine Buhé¹, Patrice Schneuwly², Jocelyn Anger²

¹LOCIE, UMR 5271: Université Savoie Mont Blanc - CNRS, Polytech Annecy-Chambéry, 73376 Le Bourget-Du-Lac, France

²CEA/LITEN-INES, 50 Avenue du Lac Léman, 73375 Le Bourget-du-Lac

*anamaria.stefanoiu@yahoo.com

RESUME. Aujourd'hui il existe assez peu de retour d'expérience concernant les consommations réelles des bâtiments récents en lien avec les performances annoncées à la conception. 'Comment comparer la phase d'exploitation et la phase de conception de manière pertinente ?' est une des questions à laquelle il faut chercher des réponses. Dans cet article, nous nous intéressons à une maison basse consommation occupée par 6 personnes. La conception et le suivi de cette maison font partie du projet COMEPOS (Conception et construction Optimisées de Maisons à Energie POSitive).

Dans cet article les résultats des simulations en phase de conception sont mis en parallèle avec le suivi expérimental en site occupé. Des premières mesures continues d'ambiance intérieure (température, humidité relative) et de performance énergétique (consommation) sont exploitées.

MOTS-CLÉS : consommation réelle; phase de conception; phase d'exploitation; maison basse consommation occupée; ambiance intérieure.

ABSTRACT. Today there are quite limited feedbacks on actual consumption of new buildings and on the existing gap between their consumption and the forecasted energy consumption evaluated during the design phase. 'How to compare the operational phase and the design phase in a relevant way' is an important issue for which answers have to be provided. In this article, an energy efficient house occupied by six persons is studied. The design and the monitoring of this house are a part of a French energy research project, COMEPOS (Optimized Design and Construction of Near Zero Energy Buildings).

In this article, the results of the simulations for the design phase are compared to the collected data during the operational phase. Some continuous measurements of indoor environment as temperature and relative humidity are exploited. Energy efficiency is also analyzed through energy consumption measurements.

KEYWORDS: actual consumption; design phase; operational phase; energy efficient house; indoor environment.

1. INTRODUCTION

Building sector accounts for 45% of the energy consumption in the world which makes the building energy efficiency an important issue nowadays.

In this context, one of the most important goals in many environmental programs around the world is to improve the energy efficiency of new and existing buildings by different means: reducing energy demand, improving energy efficiency of systems and appliances and substituting fossil fuels with renewable energy.

However, there are only a few experience feedbacks on real consumption of new buildings and the gaps between the announced forecasts in the design phase and the actual performance are important. In Knight et al. (2007), two different building energy models with monitored data from a building and survey data from building's occupants were compared. The authors shown that the survey was not sufficient to predict the actual behaviour and the energy consumption of the building. In Derbez et al. (2011), seven energy efficient houses were monitored during three weeks, one week in winter, one in summer and one during an inoccupation period. This was done in order to determinate the real energy consumption of the buildings and the indoor air quality. The authors insist on the constraints and the difficulties associated with data collection. In Sharmin et al. (2014), the monitoring of the energy consumption, thermal performance and indoor air quality of twelve apartments in a cold climate region was realized. The authors outlined relationships between heat loss, thermal comfort, domestic appliances and energy consumption. Some factors of poor indoor air quality are also identified. In Stefanoiu et al. (2014), the comparison between dynamic simulation and real measurement is made for an experimental building. Investigations to determinate the main factors influencing the heating energy consumption were conducted.

In this paper, the results of the simulations for the design phase of an energy efficient building are compared to data collected during the operational phase.

First, a brief description of the building is given as well as the design modelling assumptions for the energy performance simulation. The occupants were questioned about their future effective presence and domestic equipment use. That allowed us to improve our model.

Second, we present the different sensors implemented in the building and the type of data available.

Then, a comparison between simulated and measured temperatures is made for a seven-week period.

Finally, the real energy demand of the building is presented through energy use for heating, ventilation, lightning, DHW and some domestic appliances. A comparison with the model is also made for one month during the heating period.

2. BUILDING SIMULATION

2.1. BRIEF DESCRIPTION OF THE BUILDING

The case study of this paper is a single-family house called PosA situated in the Mediterranean climate in the South of France. The design and the monitoring of this house are part of the COMEPOS project (Optimized Design and Construction of Near Zero Energy Buildings). This project proposes to develop the concept of near zero energy buildings by studying the design and evaluation of the real

energy performance of 25 family houses. The PosA house has a complex geometry as it is shown in Figure 1.



Figure 1: Outside view of the building, EnergyPlus model.

Highly insulating materials were chosen to achieve better performance than the French standard RT2012 (2014). This is made in order to minimize energy demands both in the heating and cooling season. More information can be found in Stefanoiu et al. 2015.

Electric heaters with a total power of 8000 W meet the heating power demand. In addition a wood burner is installed in the living room located on the first floor. On-site energy production is ensured by the integration of photovoltaic panels and a 12 meters high wind turbine. The systems were sized to cover annual energy demand of the house, including: space heating, domestic hot water, ventilation, lighting, auxiliaries (pumps, fans, etc.) as well as appliances.

2.2. ENERGY PERFORMANCE SIMULATIONS IN THE DESIGN PHASE

The simulations were performed using EnergyPlus 8.1. This is an energy analysis and thermal load simulation program widespread in building simulation community around the world ([apps/eere.energy/buildings/energyplus](https://apps.eere.energy/buildings/energyplus)). It calculates heating and cooling loads necessary to maintain thermal control set points, conditions throughout a secondary HVAC system and coil loads, and the energy consumption of primary plant equipment.

As modelling assumption, this building was divided in 9 thermal zones, to coincide with the building's room partition (see Fig. 1).

For this research the occupants of the dwelling have provided a detailed description of the expected presence and use of electrical equipment and this was used as the occupancy scenario as described in Stefanoiu et al (2015). French standard RT2012 was used as well.

3. MONITORING SYSTEM

During the design phase, a monitoring system was conceived. It was then implemented during the construction phase. Different types of sensors allow to follow different components of building's performance. On one hand we focused on the occupants' aspect in order to ensure their health and thermal comfort. On the other hand the focus was on the building itself, regarding its energy consumption and the efficiency of its envelope. The following list summarizes the sensors used to measure different elements:

- Ambiance : indoor air temperature, indoor relative humidity, presence sensors (CO₂), natural lighting and COV
- Movements detectors : opening / closing windows and blinds sensors
- HVAC systems : air flow and temperature sensors, DHW : temperature sensors
- Energy consumption smart meters : HVAC, appliances, DHW, lighting
- Energy power smart meters : HVAC, appliances, DHW, lighting
- Weather measurements: external temperature, wind direction etc.

The house is monitored since October 2015, 24 hours a day, 7 days a week. A website service allows us to gather the data until the eve of the request day. Measurements as temperature or energy consumption are continuously recorded and each variation of value is registered as a new data with its time of appearance.

As an example Figure 2 shows a representative sensors distribution for a ground floor bedroom.

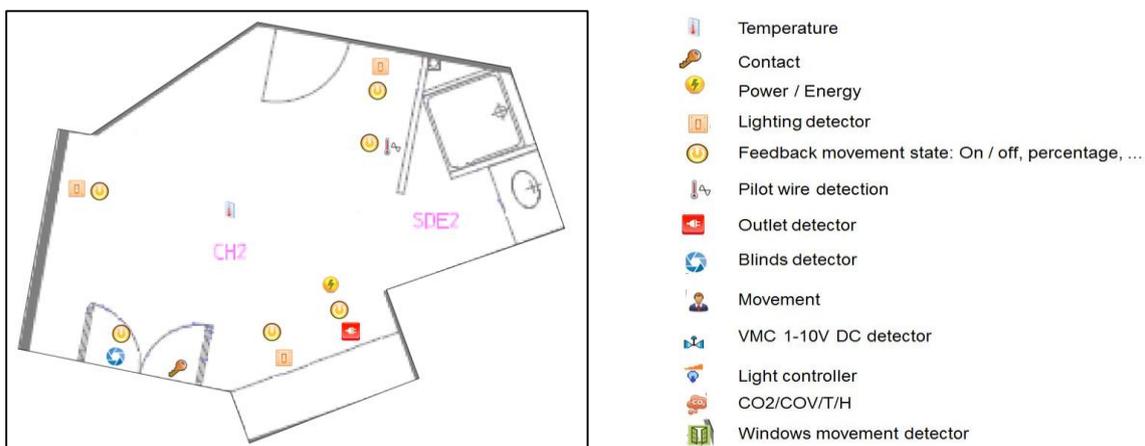


Figure 2: Sensor distribution for a ground floor room

4. INDOOR CONDITIONS

As the quality of the indoor environment is very important when one wants to study the energy performance, this part focuses on thermal comfort estimated by measurements of air temperature in the rooms. One air temperature sensor is situated in each room. The number of sensors was reduced for reasons of cost and acceptability. The validity of the results was based on a study made in Stefanioiu et al (2015). In Figure 3, experimental data for external and internal temperature for each floor are presented. A period of five consecutive days in December 2015 was selected to be representative of the thermal comfort in the house during heating season. As it is shown here, the ground floor air temperature is almost constant at 19°C contrary to the first floor air temperature (living room) that varies between 19 and 25°C. The rapid increase in temperature in the living room in the end of a day is due to the use of a wood burner manually filled in by the owner.

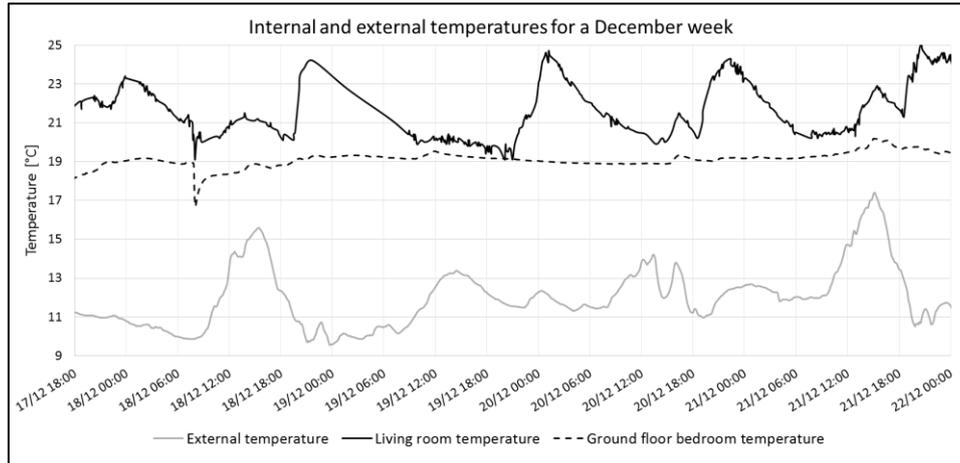


Figure 3: External and internal and temperature for the living room and the ground floor bedroom

After investigations of a week in December, the next step is to analyze the real behavior of these measurements for a longer period. The period from 2nd of November until 20th of December is studied here (7 weeks during the heating period). The minimum and maximum values for the temperature as well as the standard deviation are given in Table 1. It should be noted that rooms 1 to 3 are located on the ground floor.

Here we observed that the mean air temperatures obtained by the simulation are close to the ones measured. However the measured values are about 1°C higher than the values used in the design simulation. Set point temperatures are fixed à 19°C during occupancy and 16°C the rest of the time in the French standard RT2012 which explains lower temperatures in this case.

The maximum air temperatures in the house were reached for an afternoon when the external conditions were favorable, around 20 degrees for the outside air temperature. The important increase of the internal temperatures can be explained by the presence of southwest-facing large windows in all rooms.

Values of standard deviations are higher at the first floor than on the ground floor. Measured values show that temperatures are rather stable at the ground floor in the building.

Temperature variation [°C]	Ground Floor		First Floor			Simulation		RT
	Room1	Room2	Room3	Room4	Living	Ground floor	Living	Global
Mean	20,0	20,0	19,9	20,6	21,3	19,2	20,2	18,3
Standard deviation	1,1	0,9	0,9	1,8	2,0	1,6	1,8	1,3
Maximum	23,8	23,6	23,4	24,9	30,3	25,0	26,5	19
Minimum	17,2	16,7	18,0	15,2	16,6	16,2	16,4	16

Table1: Minimum and maximum values for the temperature as well as the standard deviation

5. ENERGY CONSUMPTION

5.1. APPLIANCES ENERGY CONSUMPTION

The standard RT2012 (2014) imposes high-energy performance on new buildings in terms of envelope and HVAC system. Consequently, the remaining source of energy consumption that is still not regulated is the consumption of domestic appliances.

To outline their consumption, several energy and power smart meters were installed in the house. Figure 4 shows all the available energy consumption measurements for the devices in the house over a one-month period (November). Moreover, to determinate the gas consumption related to the use of the hot plates an assessment based on owner estimation was made. These consumptions are compared in Table 2 to the ones implemented in design phase simulation and the ones that were given by the owner through weekly use scenarios.

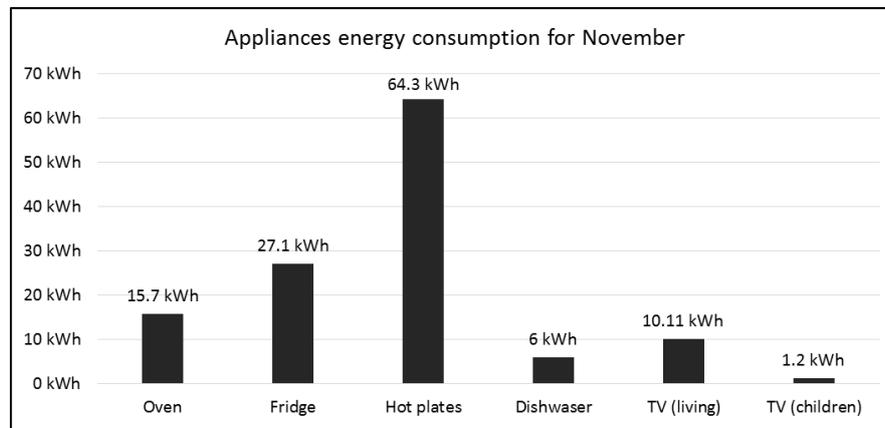


Figure 4: Real energy consumption for appliances

Appliances	Type of schedule	Weekly use frequency	Weekly use time [h]	Average power in use [W]	Weekly consumption [kWh]	Annual consumption [kWhEP/m SHONRT]
Oven	Measurements	2.4	3.4	1299	4.4	2.4
	Owner's view	3.0	3.0	2850	8.6	4.7
	Implemented schedule	3	3	1040	3.1	1.7
Dishwasher	Measurements	2.1	1.1	1581	1.8	1.0
	Owner's view	3	/	1,05 kWh per cycle	3.2	1.7
	Implemented schedule	3	7.5	1222	9.2	5.0
Living room TV	Measurements	7.0	28.0	36.8	2.4	1.3
	Owner's view	7.0	14	64	0.9	0.5
	Implemented schedule	7.0	14	64	0.9	0.5

Table 2: Comparison between the predicted and the real uses of some appliances

The owner of the house has provided us with the nominal power of each device. It appears that this tends to overestimate the effective power of the appliances. The power of the electric equipment were amended around an average value in design phase in order to take into account that devices do not work at their full nominal power most of the time. The weekly consumption value for the television takes into account an additional electric consumption in standby mode. An attempt to estimate the annual primary energy consumption over the net floor area according to the French standard RT2012 is made based on a 49 weeks a year occupancy scenario.

5.2. TOTAL ENERGY CONSUMPTION

Regarding energy performance, a significant indicator is the total energy consumption. As previously mentioned for the RT2012 legislation, the total energy consumption is divided into five items: heating, air conditioning, DHW, lighting and auxiliary. Figure 5 shows the total measured energy consumption over a one-month period (November) for all the items mentioned in the RT legislation. Also the total energy consumption for six devices in the house: oven, fridge, plates, dishwasher and two televisions are presented. Heating is divided into two: electric and wood. The wood consumption for heating was determined using information given by the owner about the amount of wood used during that period.

Appliances energy consumption is the second energy consumer after heating. Moreover, the value shows below do not cover all the appliances in the house as washing machine, computers. These are also considered to be energy consuming devices.

Whereas heating consumption was well estimated, results of the simulation for lightning are significantly underestimated and ventilation overestimated. The DHW consumption covering four bathrooms and six sinks was underestimated. It must be noted that here the simulated results were obtained using only design phase data, and namely the occupancy scenarios and the weather data. Therefore the overall agreement can be qualified as very good.

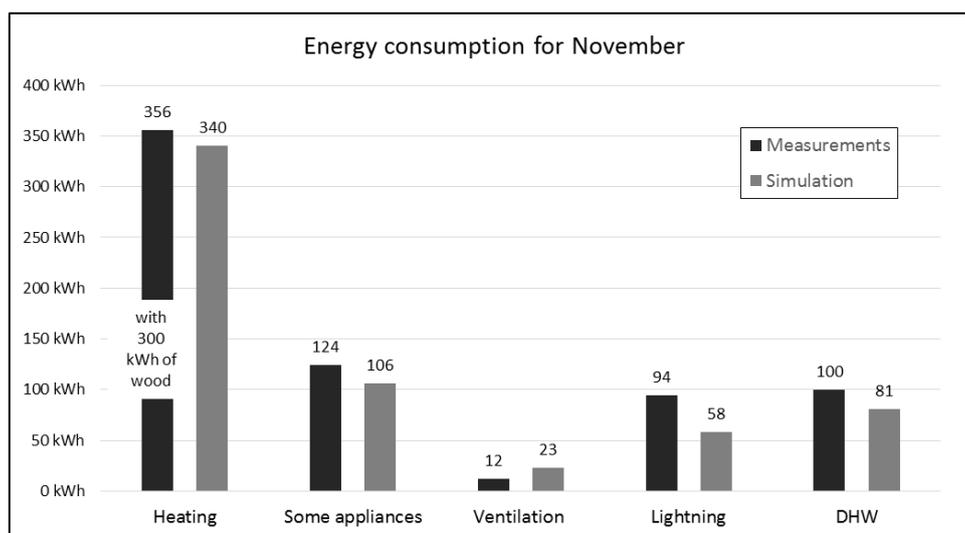


Figure 5: Total measured and simulated energy consumption for November

6. DISCUSSION AND CONCLUSIONS

In this paper, the results of the simulations for the design phase of an energy efficient building are compared to data collected during the operational phase.

First a comparison between simulated and measured temperatures is made for a seven-week period. This has shown that the ground floor air temperature is almost constant at 19°C contrary to the first floor air temperature that varies between 19 and 25 °C mainly due to the use of a wood burner manually filled in by the owner.

Then, a comparison with the model is also made for one month during the heating period. Results shown that appliances energy consumption is the second energy consumer after heating. The results of the simulation for lightning are underestimated and the values corresponding to ventilation overestimated. Future investigations using the real weather file are also planned in order to have a more precise view about the comparison between the operational phase and the design phase.

7. ACKNOWLEDGEMENTS

This project has received support from the National Program “Investment for the Future” bearing the reference (ANR-10-IEED-0003). The authors wish to thank APS (l’Assemblée des Pays de Savoie) and AMI COMEPOS (ADEME) for their support.

8. BIBLIOGRAPHIE

Knight I., Stravoravdis S., Lasvaux S., Assessing the operational energy profiles of UK education buildings: findings from detailed surveys and modelling compared to measured consumption, in: 2nd PALENC Conference and 28th AIVC Conference on Building Low Energy Cooling and Advanced Ventilation Technologies in the 21st Century, Crete Island, Greece, 2007, pp.531–536.

Derbez et al. Méthodologie d’évaluation de la qualité d’air intérieur, du confort et des consommations énergétiques des logements performants en énergie. Environ Risque Sante 2012 ; 11 : 40-51. doi : 10.1684/ers.2011.0505

Sharmin et al. Monitoring building energy consumption, thermal performance, and indoor air quality in a cold climate region. Sustainable Cities and Society 10.1016/j.scs.2014.04.009

Stefanoiu, A.-M., Woloszyn, M., Wurtz, E., Jay, A. Comparaison mesure-simulation et l'analyse de sensibilité. Conférence nationale IBPSA France, mai 2014, Arras (France).

Stefanoiu, A.-M., Parys, W., Woloszyn, M., Wurtz, E., Jay, A. Robustness assessment of a near zero energy dwelling for varying occupant behaviour, Conférence Internationale ,IBPSA 2015, Hyderabad, India

Stefanoiu A-M, Woloszyn M., Wurtz E., Jay A., Buhe C., A methodology to assess the ambient temperature of a building using a limited number of sensors, Conférence Internationale, IBPC 2015, Turin- Italy

Arrêté du 26 octobre 2010 relatif aux caractéristiques thermiques et aux exigences de performance énergétique des bâtiments nouveaux et des parties nouvelles de bâtiments

<http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/>

RT 2012. 2014. Accessed September 17. <http://www.rt-batiment.fr/>.

RT 2012 ET MAISONS INDIVIDUELLES, 8 février 2013 – Le Moniteur n° 5698 – Cahier détaché n°2 consultable sur www.lemoniteur.fr

Application de techniques de clustering pour la segmentation de parcs de bâtiments à rénover

Yunseok LEE *¹, Pierre BOISSON¹, Mathieu RIVALLAIN¹, Olivier BAVEREL²

¹ Université Paris-Est, CSTB

84 Avenue Jean Jaurès, 77420 Champs-sur-Marne,

² Université Paris-Est, Laboratoire Navier (UMR 8205), ENPC, IFSTTAR, CNRS

Cité Descartes, 6-8 Avenue Blaise Pascal, 77455 Champs-sur-Marne,

*yunseok.lee@cstb.fr

RESUME. L'élaboration de stratégies de rénovation énergétique à l'échelle d'un parc existant nécessite de modéliser l'ensemble des bâtiments, en tenant compte de l'information disponible. Les approches de modélisation recourent traditionnellement à des typologies, régulièrement fondées sur les caractéristiques constructives connues ou observables des bâtiments. Or il s'avère difficile d'établir des corrélations entre les performances énergétiques et ces typologies descriptives. L'objectif de cette contribution vise à développer une approche de segmentation du parc fondée sur des techniques d'apprentissage automatique. Différents algorithmes de clustering ont été appliqués sur une base de données réelle de logements français. Leur paramétrisation et le choix du nombre de clusters, ont été étudiés en vue d'apprécier la pertinence de cette approche. Cette première application donne des résultats encourageants pour segmenter un parc de bâtiments selon des critères descriptifs mais aussi performanciers (consommations ou économies d'énergie, coûts d'investissement liés à des scénarios de réhabilitation).

MOTS-CLÉS : parcs de bâtiments, clustering, performance énergétique

ABSTRACT. The development of energy renovation strategies at the scale of an existing stock requires to model all buildings, taking into account the available information. Modeling approaches traditionally employ typologies regularly based on observable or known construction characteristics of buildings. But it is difficult to establish correlations between energy performance and these descriptive typologies. The aim of this contribution is to develop a building stock segmentation approach based on machine learning techniques. Different clustering algorithms have been applied to a real database of French homes. Their parameterization and the selection of the number of clusters were studied in order to assess the relevance of this approach. This first application gives encouraging results to segment a building stock according to descriptive but also performance criteria (such as energy consumption, energy savings and investment costs related to refurbishment scenarios).

KEYWORDS : building stock, clustering, energy performance

1. INTRODUCTION

1.1. TYPOLOGY OF EXISTING BUILDING STOCKS

The renovation of the existing stock is the main source of energy savings in the building sector in France. At the scale of a stock, the development of retrofit strategies need to model all of the buildings, considering the available information. Modeling approaches traditionally employ descriptive typologies to define the criteria of typical buildings and describe exemplary buildings of representing building types (TABULA Project Team 2012). The exemplary building, or the reference building might be “a hypothetical or real reference building that represents the typical building

geometry, components and systems, typical energy performance for both building envelope and systems, typical functionality and typical cost structure in the Member State and is representative of climatic conditions and geographic location” (European Commission 2012).

From the state of art, many different projects exploiting typologies of building stocks are found. While the typologies are defined by different sets of specific attributes depending on the issue considered, most of the attributes are observable features used for conventional urban or architectural issues. However, these attributes cannot guarantee appropriate building typologies on expected energy performance issues. For example, the period of construction and the living surface, quite common attributes in the state of art, cannot show sufficient discrimination in between similar buildings after different process of renovation over time.

Ultimately, from the perspective of energy performance, successful building stock modeling requires more than the traditional building typologies. To the expectation for robust building stock modeling, machine learning techniques might offer powerful tools to analyze wide sets of buildings, and identify potential hidden structures of building stocks.

1.2. MACHINE LEARNING

Machine Learning is a broad field of study in computer science mainly concerned with the discovery of regularities, such as models and patterns, in data (Fürnkranz 2012). Machine learning is roughly classified into two main approaches depending on the nature of the learning signal. **Supervised learning** exploits a general rule that maps inputs to outputs, from labeled training data, given sets of example inputs and their desired outputs, e.g. automatic spam filters of e-mail providers. **Unsupervised learning** searches for some intrinsic structure in the example inputs. Unlike the supervised learning, the data is simply an input without an associated output, e.g. grouping of similar news articles. Among unsupervised learning techniques, data clustering is a method of grouping a given input sets based on their similarities. Consequently, data clustering is to reduce a number of examples into smaller number of clusters, giving a clue for building stock modeling.

2. METHODOLOGY

2.1. DATA OF EXISTING BUILDING STOCK

In this study, we used the PHEBUS survey data, which was executed by INSEE, the French national statistics bureau, in 2013 for the purpose of providing energy performance data of French residential building stock. The PHEBUS survey consists of two frames; the first frame CLODE dealt with general properties, socio-demographic characteristics and energy behavior through face-to-face interview with 8000 representative houses. In the second frame DPE, which is more relevant to this study, the energy performances of housing were measured by qualified diagnosticians.

The PHEBUS DPE data presented detailed information about housing descriptions, energy consumptions, and building information, which includes opaque walls, windows, thermal bridges, heating systems and domestic hot water systems. Depending on the diagnosis method and the type of housing, some information was not recorded in the database. For example, the houses examined with energy bills have only energy meter reading with basic building information. On the other hand, the housings estimated with 3CL-DPE, a conventional method to estimate energy consumption, have more

detailed information of the building, lacking the actual metered data. Some houses have both data, giving different actual and calculated energy consumption.

The PHEBUS DPE data provides interesting comparison among segments of conventional typologies. When the final energy consumption for heating per unit surface of houses is focused on, collective houses consume less energy than individual houses. Though recently built houses tend to consume less energy as well, the houses built before 1980 have no apparent tendency depending on the period of construction. The houses using electricity as the only energy source show distinct low heating energy consumption than those using combustible sources (Figure 1). Some features can be calculated or obtained through combinations with other data, such as heating degree day depending on department and elevation.

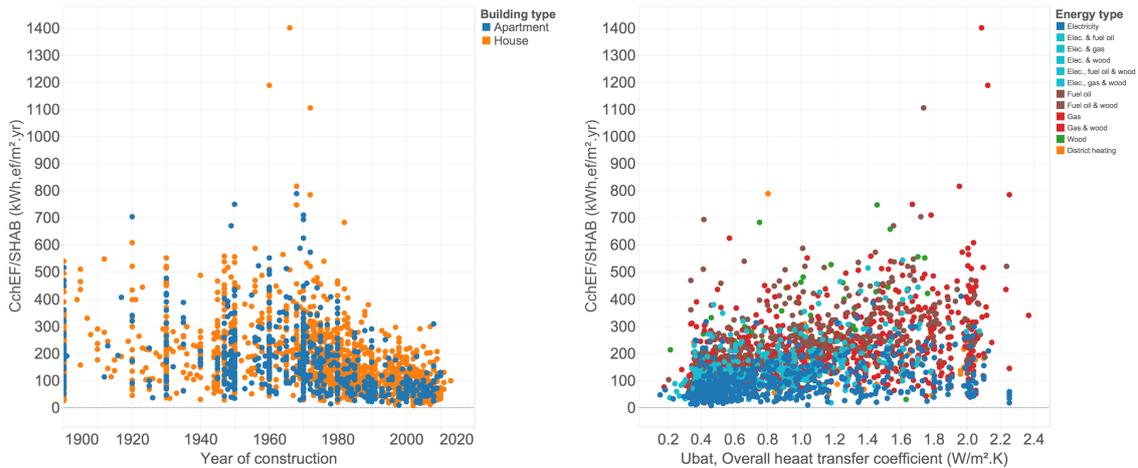


Figure 1 : Final energy consumption for heating according to some features.

2.2. ATTRIBUTES SELECTION

More than 240 features are included in PHEBUS DPE data. In addition to these, many other interesting features can be newly added by recombination of the existing data or combination with external data. Among the features, however, not every feature is meaningful for a specific purpose and some features are often redundant. Before a study, therefore, appropriate features should be selected among them, and the features to be added should be decided. In this study, for this purpose, a dozen features in building information and heating system, which seem more relevant to the energy performance of housing, were chosen. Though some of them were directly available from the PHEBUS DPE data file, others should be calculated combining with other internal (e.g. window area) or external data of the file (e.g. heating degree-hour according to the department).

Features	Minimum	Maximum	Average
Living space (SHAB, m ²)	15	2005	109.20
Heating degree-hour corrected for elevation (°C.h)	31333.8	106568.2	58757.2
Air infiltration heat loss per SHAB (W/m ² .K)	0.25	0.93	0.63
Overall heat transfer coefficient U _{bat} (W/m ² .K)	0.15	2.37	0.99
Window-floor surface ratio	0.00	0.52	0.15
Compactness	0.08	12.00	2.48
Final energy consumption for heating (kWh _{FE} /m ² .yr)	8.92	1400.62	176.61
Thermal efficiency of heating system	0.50	3.61	0.86

(a) Numeric features

Features	Number of categories	Remark
Type of building	2	
Period of construction	11	Ordered
Thermal mass class	4	Ordered
Type of energy	13	Combination of 6 energies

(b) Categorical features

Table 1 : Selected features in PHEBUS DPE data.

Redundant features can degrade the performance of analysis. To eliminate the redundancy, the linear association between features can be considered before the analysis. The Pearson’s product-moment coefficient ρ can be calculated between two numeric features X, Y as following equation,

$$\rho_{X,Y} = \text{corr}(X, Y) = \frac{\text{cov}(X, Y)}{\sigma_X \sigma_Y} = \frac{E[(X - \mu_X)(Y - \mu_Y)]}{\sigma_X \sigma_Y} \quad (1)$$

where, cov, E, σ and μ stand for covariance, E, standard deviation and mean value respectively. Pearson suggested an interpretation according to the size of the coefficient (Table 2) (Pearson 1904).

As the Pearson’s correlation coefficient can be calculated between numeric features, in this study, the 8 numeric features and a categorical feature expressed in numeric form are applicable. A matrix plot of correlation coefficients shows that final energy consumption for heating has moderate correlations with overall heat transfer coefficient, heating-degree-hour corrected for elevation, thermal efficiency of heating system, and compactness (Figure 2).

Size of correlation	Proposed interpretation
0.75-1.00	High correlation
0.50-0.75	Considerable correlation
0.25-0.50	Moderate correlation
0.00-0.25	Low correlation

Table 2 : Interpretation of a correlation coefficient

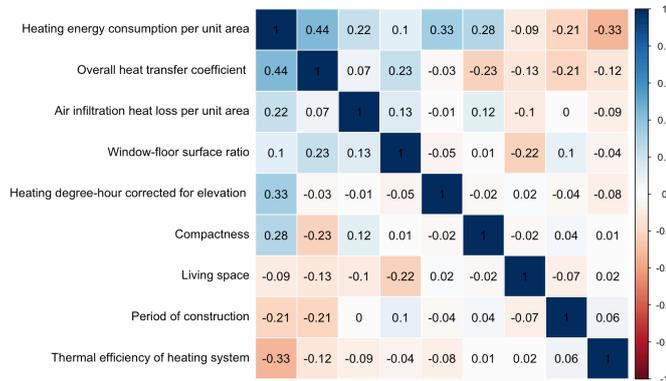


Figure 2 : Correlation matrix plot of numeric features.

The multiple criteria of decision making problems can be represented with multiple objective functions. The vector space defined with objective variables of the multiple objective functions is called **objective space**. On the other hand, the vector space with decision variables is called **decision space**. The vector space consisted of both variables can be considered as a **hybrid space**. In this study, considering the energy performance, the final energy consumption for heating forms an objective vector, thereby objective space. The others compose decision variables and decision space (Table 3).

Objective space	Decision space
Final energy consumption for heating	Living space (SHAB), heating degree-hour corrected for elevation, air infiltration heat loss per SHAB, overall heat transfer coefficient U_{bat} , window-floor surface ratio, compactness, thermal efficiency of heating system, type of building, period of construction, thermal mass class, and type of energy

Table 3 : Classification of features by space.

2.3. PREPROCESS OF DATA

The PHEBUS DPE data contains 3452 items, which include entire building data, incompletions and errors. Duplicated items, of which energy consumptions were calculated in 3CL-DPE method and collected from energy bills in parallel, exist as well. These apparently unnecessary data could degrade the performance of clustering analysis by distorting results. Therefore, eliminating building data, overlapped data, and incomplete data and unreasonable data, 2339 houses were finally left to be used in the analysis.

Based on the distance conception, most of machine learning algorithms can handle only numeric variables. Categorical variables should be converted into numeric variables by introducing dummy variables for each category. If a categorical feature has an order, the values can rather be expressed with ordinal numbers. While the features expressed in the form of numbers are available for machine learning, the results can be influenced by the scales of features. This scale dependency can be avoided by standardization or normalization of the numeric values.

In this study, two categorical features (type of building and type of energy) were converted into binary variables, two others (period of construction and thermal mass class) into normalized ordinal numbers. The eight numeric features were standardized to have zero mean and unit variance.

2.4. APPLICATION OF CLUSTERING ALGORITHMS

Among a variety of clustering algorithms, the following five algorithms were selected in this study. **K-means** is a flat clustering algorithm. The objective of K-means algorithm is to find a set of clusters which minimize the residual sum of squares (RSS) (Hartigan 1979). **Hierarchical Agglomerate clustering (HAC)** is a connectivity-based cluster analysis algorithm, which builds a hierarchy of clusters by a bottom-up approach (Murtagh 1983). In order to increase the quality of clusters, some algorithms integrated hierarchical clustering and distance-based clustering. Among the algorithms, **BIRCH** algorithm introduces a CF (Clustering Features) concept for effective clustering particularly over large data-sets (Zhang et al. 1997). **Affinity propagation (AP)** is an exemplar-based clustering algorithm. In this algorithm, data points exchange *messages* to find their *exemplars*, and the group of data points which shares the same exemplar becomes a cluster (Dueck 2009). **DBSCAN** is a density-based clustering algorithm which can handle arbitrary shape clusters. This algorithm requires two parameters defining the least dense cluster (Ester et al. 1996).

2.5. EVALUATION OF CLUSTERING PERFORMANCE

Among various evaluating indices of the clustering performance, the silhouette coefficient is widely used when the ground truth classes are unknown. The silhouette coefficient was suggested to be used to select the number of clusters for partitioning techniques (Rousseeuw 1987). For each object i , when $a(i)$ is the average dissimilarity of i to all other objects of the belonging cluster A , and $b(i)$ is the average dissimilarity of i to all other objects of the second-best cluster B , the silhouette value $s(i)$ is defined as

$$s(i) = \frac{b(i) - a(i)}{\max\{a(i), b(i)\}} \quad (2)$$

The average of the $s(i)$ over all object i is called the overall average silhouette width, and the highest average silhouette width over all the number of clusters is called the silhouette coefficient. A subjective interpretation was proposed from the experiences (Table 4).

Silhouette coefficient	Proposed interpretation
0.71-1.00	A strong structure has been found.
0.51-0.70	A reasonable structure has been found.
0.26-0.50	The structure is weak and could be artificial, try additional methods.
≤0.25	No substantial structure has been found.

Table 4 : Interpretation of the silhouette coefficient (Struyf et al. 1996).

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1. DECISION OF NUMBER OF CLUSTERS

Some algorithms introduced in 2.4, typically K-means, require the number of clusters as an input. As many real-world problems, however, it is unknown in this study. Thus, the silhouette values were calculated for a range of numbers of clusters in each space (Figure 3). The objective space, which has the smallest one dimension, showed reasonable structures with the average silhouette width around 0.54. No substantial structures could be found in the decision space (15-dimensional) and the hybrid space (16-dimensional). Instead of two to five clusters which seemed not to be sufficient for the partitioning of building stocks, seven were selected as the number of clusters. This number of clusters would be applied in the decision and the hybrid space as well.

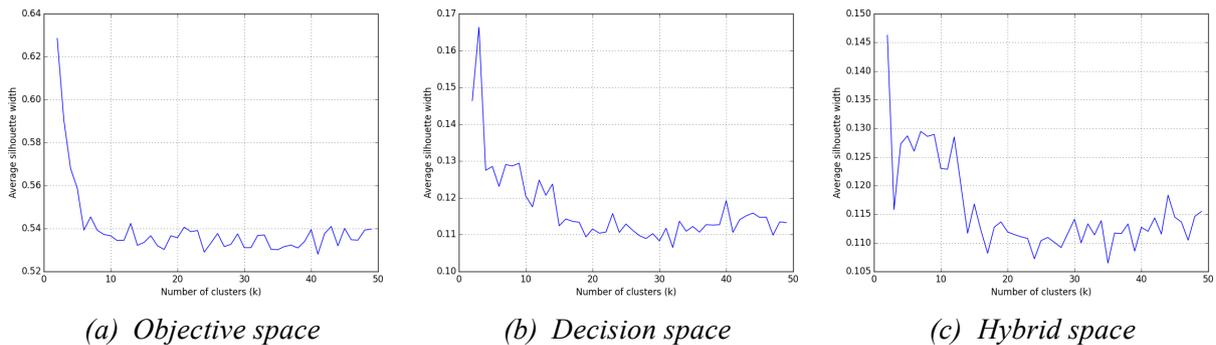


Figure 3 : Average silhouette width with different number of clusters

3.2. COMPARISON OF ALGORITHMS

Five algorithms mentioned in 2.4 were applied to the prepared data. The number of clusters was set to 7 for three algorithms, K-means, HAC and BIRCH, where the number of clusters could be selected. For the others, varying available parameters, as close to 7 clusters as possible were obtained.

The characteristics of the algorithms could be well observed in the objective space, the simplest space. While three algorithms, i.e. K-means, HAC and AP formed similar clusters, BIRCH and DBSCAN showed quite different distributions of clusters. Particularly, DBSCAN, the only algorithm allowing noise points, which do not belong to any cluster, categorized from 13.9% (in the objective space) up to 31.8% (in the hybrid space) of houses as noise. As DBSCAN tends to equal density clusters, in the data without apparent density distinction, such as in this study, the clustering performance seems to decline. On the other hand, though HAC and BIRCH share some theoretical background, the results were quite different. In the case of AP algorithm, where the number of clusters could be achieved by trial and error, the result was similar to those of K-means and HAC, the two most conventional algorithms.

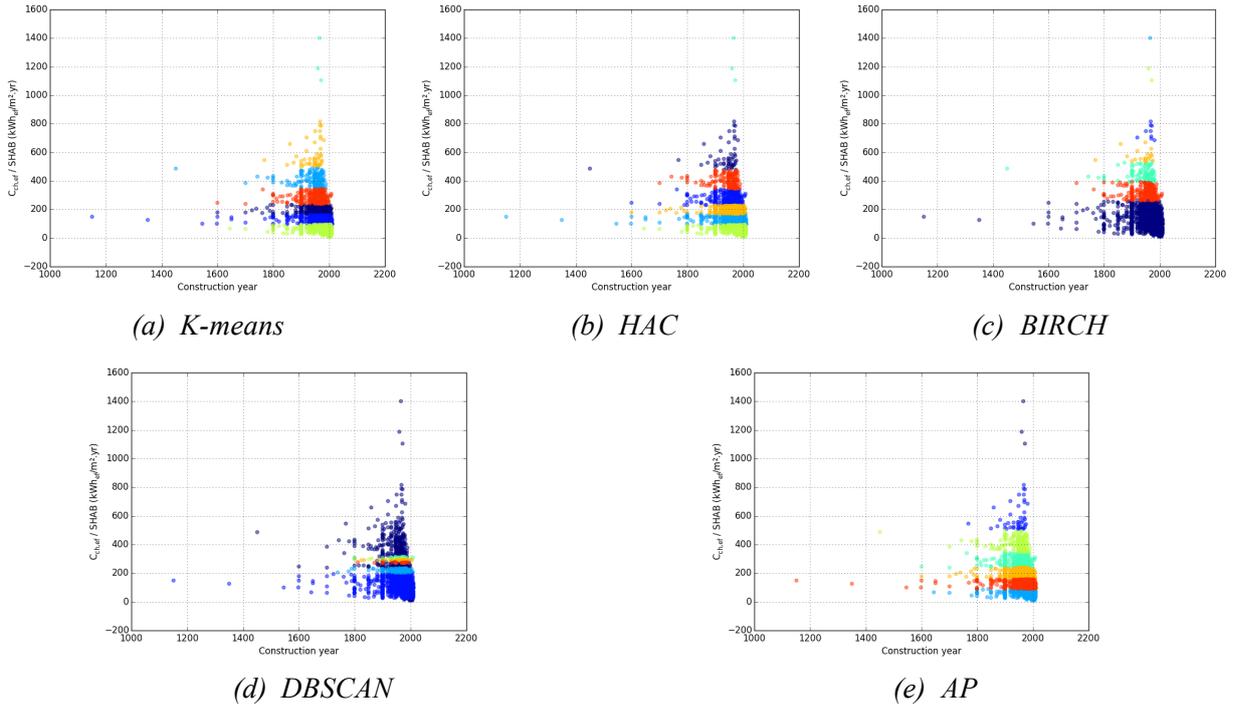


Figure 4 : Algorithm comparisons in the objective space ($k=7$).

3.3. COMPARISON OF SPACES

Clustering analysis were performed in three different criteria spaces, respectively. Though the decision space and the hybrid space can be subdivided by the including features, to simplify the problem, the spaces were presumed to include all 11 and 12 features, respectively. In this section, as a representative case, the results of K-means algorithms were presented.

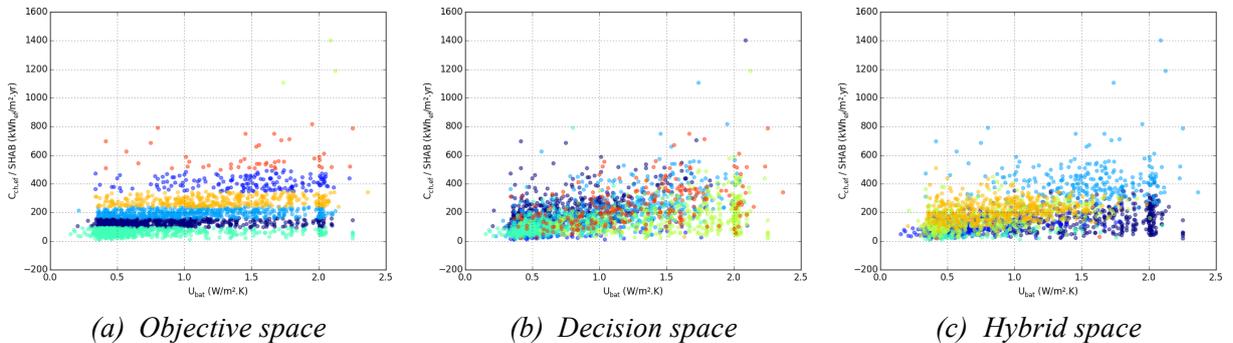


Figure 5 : Space comparison in objective space (*K-means*, $k=7$).

Clustering in objective space did not show distinguishable clusters in the decision space (x-axis in *Figure 5 (a)*) and vice versa (y-axis in *Figure 5 (b)*). As a feature occupied just one dimension in the decision space, the clusters were not evident even in an aspect of the decision space. It is worthy of notice that, in the hybrid space, distinguishable clusters were observable along the objective feature (y-axis in *Figure 5 (c)*).

Combining decision features with the objective space seems to be relevant. Hybrid space is an example. But we can also imagine applying clustering algorithms two (or more) times to re-segment clusters already created, and successively in the objective space and then the decision space, or vice

versa. In this way, we could obtain good clusters from the energy performance point of view and that make sense for the descriptive criteria.

4. CONCLUSION

The results showed the possibility that the clustering techniques might be efficient for the modeling of building stocks considering energy performance of houses. It was verified that, even when the number of clusters was unknown, it could be decided by estimation of clustering performance. Some algorithms turned out to be probably inappropriate in certain data distribution. If noise points exist in the data, less algorithms are capable to handle with them, and the other algorithms considered the noise points as normal data. In the case of extreme noise, which can distort the clustering results, proper preprocessing seems to be required before the clustering analysis.

As a first application of clustering techniques to the building stock data, the results offer the possibility of further studies. Firstly, parametric studies of each clustering algorithm could be considered. For some algorithms, the required parameters are not intuitively comprehensive nor easily decidable. Secondly, differing from this study, the objective space could be extended to other features such as the entire final energy consumption instead of the final energy consumption for heating, the unique objective feature utilized in this study. Even further, the investment cost and the improvement of energy efficiency might be interesting objective features, though these data require data of energy retrofit scenarios.

5. BIBLIOGRAPHY

- Dueck, Delbert. 2009. "Affinity Propagation: Clustering Data by Passing Messages." University of Toronto.
- Ester, Martin, Hans-Peter Kriegel, Jörg Sander, and Xiaowei Xu. 1996. "A Density-Based Algorithm for Discovering Clusters in Large Spatial Databases with Noise." *Kdd*.
- European Commission. Commission Delegated Regulation (EU) No 244/2012 of 16 January 2012.
- Fürnkranz, Johannes, Dragan Gamberger, and Nada Lavrač. 2012. *Foundations of Rule Learning*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. doi:10.1007/978-3-540-75197-7.
- Pearson, Karl. 1904. "Report on Certain Enteric Fever Inoculation Statistics." *Bmj* 2 (2288). British Medical Journal Publishing Group: 1243–46. doi:10.1136/bmj.2.2288.1243.
- Hartigan, John Anthony, and Manchek Anthony Wong. 1979. "Algorithm as 136: a K-Means Clustering Algorithm." *Applied Statistics* 28 (1): 100. doi:10.2307/2346830.
- Murtagh, Fionn. 1983. "A Survey of Recent Advances in Hierarchical Clustering Algorithms." *Computer Journal* 26 (4). Oxford University Press: 354–59. doi:10.1093/comjnl/26.4.354.
- Rousseeuw, Peter J. 1987. "Silhouettes: a Graphical Aid to the Interpretation and Validation of Cluster Analysis." *Journal of Computational and Applied Mathematics* 20 (November): 53–65.
- Struyf, Anja, Mia Hubert, and Peter Rousseeuw. 1996. "Clustering in an Object-Oriented Environment." *Journal of Statistical Software* 1 (4). doi:10.18637/jss.v001.i04.
- TABULA Project Team. 2012. "Typology Approach for Building Stock Energy Assessment. Main Results of the TABULA Project." Edited by Tobias Loga et al. Institut Wohnen und Umwelt.
- Zhang, Tian, Raghu Ramakrishnan, and Miron Livny. 1997. "BIRCH: a New Data Clustering Algorithm and Its Applications." *Data Mining and Knowledge Discovery* 1: 141-182.

Switching models for the building's thermal behavior

Balsam Ajib^{*1}, Sanda Lefteriu¹, Antoine Caucheteux², Stéphane Lecoeuche¹,
Pierre Tittlein³

¹ Mines Douai, IA

F-59508 Douai, France

² Cerema – DTer Ouest – DLRCA

23 avenue de l'Amiral Chauvin 49136 Les Ponts de Cé, France

³ Laboratoire Génie Civil et géo-Environnement (EA-4515), Faculté des Sciences
Appliquées-Université d'Artois

Technoparc Futura, 62400 Béthune, France

*balsam.ajib@mines-douai.fr

RESUME. Le secteur du bâtiment est le plus énergivore avec plus de 40% de la totalité de la consommation énergétique en France. Outre l'évaluation de la performance énergétique, le pilotage des bâtiments et leur intégration énergétique dans l'ilot interviennent comme enjeux incontournables. Pour cela, il faut avoir à disposition des modèles fiables et faciles à implémenter permettant de prévoir le comportement énergétique des bâtiments en temps quasi réel. La limitation de la plupart des modèles expérimentaux utilisés aujourd'hui autour de l'évaluation de la performance énergétique reste relative à l'utilisation de structures de modèles linéaires. Il semble alors nécessaire d'aller au-delà de ces modèles afin de pouvoir représenter au mieux la dynamique et la non-linéarité du système. En conséquence, on propose, dans ce papier, d'étudier l'introduction des modèles à commutation pour la modélisation thermique d'une salle en se basant sur les mesures collectées dans le bâtiment. L'expérimentation vise à s'assurer de la faisabilité en ayant recours à des données obtenues sur une maquette numérique réalisée sur le logiciel Dymola.

MOTS-CLÉS. comportement énergétique, modélisation thermique, modèles à commutation.

ABSTRACT. The building sector accounts for 40% of the total energy consumption in France. In addition to the evaluation of their energy performance, the control of buildings and their integration in their neighborhoods represent important issues for the energy sector. For addressing these, one has to have at his disposal reliable and easy to implement models allowing them to observe and predict the energy behavior of buildings in near real-time. Most experimental models used nowadays to evaluate the energy performance of buildings are still hindered by limitations related to their linear structure, making them yield an incomplete description of the real behavior. Therefore, it is necessary to go beyond these models to be able to represent the system's dynamics and non linearities. Consequently, we propose in this paper to introduce switching models for modeling the thermal behavior of a room based on collected measures. The aim of the experiment is to study the feasibility using data obtained from a model created with the Dymola software.

KEYWORDS. energy behavior, thermal modeling, switching models.

1 INTRODUCTION

The building sector accounts for 40% of the total energy consumption in the European Union (EPBD 2010) and residential buildings make up to 60% of it (Poel et al. 2007). Therefore, many European countries set out a framework of ambitious targets to improve buildings' energy efficiency (Annunziata et al. 2013). For example, the French regulation sets the maximum primary energy consumption in new dwellings to 50 kWh/m²/year (RT 2012). On the other hand, the emergence of smart grids (Moura et al. 2013) along with the appearance of smart neighborhoods reveal the necessity of having buildings that can communicate with their surroundings. In consequence, we are in need of reliable and easy to implement tools that observe and predict the building's thermal behavior, evaluate its energy performance and follow its real time monitoring.

In general, modeling methods are divided into three groups : white box, black box and grey box models. White box models rely on physical equations. Black box models are constructed using mathematical relationships inferred via statistical, machine learning or system identification techniques. The midway between them constitute the grey box approaches. Fouquier (Fouquier et al. 2013) gives a detailed description of the three types of models commonly used in building modelling and energy performance prediction. To model the building's thermal behavior, white box approaches are based on solving equations derived from fluid dynamics principles. Despite continuous improvement, they are still hindered by limitations like the users' behavior or the insufficient knowledge of hundreds of physical input parameters that are often not measured. Seen as a complementary approach, black box modeling develops models of buildings in terms of their thermal and energy behavior using real data collection. Yet, the system identification models commonly used in the literature are linear. Residential buildings are complex systems characterized by many nonlinearities, thus making linear models yield an incomplete description.

In this work, we attempt to overcome these difficulties by studying the feasibility of using switching models and, in particular, PieceWise Affine models (PWA) (Boukharouba 2011) to describe the thermal behavior of a room. Indeed, switching models seem well suited for modeling buildings because of the intermittency of a number of phenomena. In fact, the functioning mode of a residential building changes when it is subjected to different conditions, due to the change of the value of some factors. For example, a bigger number of people in a room adds heat to it, so does the solar energy delivered by the radiation when the windows' shutters are opened.

Paulus presented a changing model in his paper (Paulus et al. 2015). He suggested different model shapes (with zero, one, or two changing points) to estimate the energy consumption of buildings. The models are linear and the algorithm aimed to select the most appropriate one to describe the monthly energy use of each building. The work presented in this paper falls into the same category, as we try to find a model with a certain number of sub-models and each of them corresponds to a functioning mode of the building. This type of modeling has already given relatively satisfactory results for the modeling of a greenhouse (Rajaoarisoa et al. 2012).

This paper is a preliminary step in investigating the feasibility of using switching models for studying the thermal behavior of buildings, making them independent of their uses or the user's behavior. The case study considered here is a room located on the first floor of an office building in Ecole des Mines de Douai, France. We apply various scenarios to this room with different air change rates. We then investigate the capability of linear and switching models to predict its behavior when subjected to different conditions. To study the feasibility, data has been generated using a numerical model of the room created with Dymola software (Dymola & Catia 2015).

This paper is organized as follows. In section 2, the room model and the chosen scenarios are presented. Section 3 describes the different system identification techniques. In section 4 we will show and discuss the results. Finally, the conclusion and future work are presented in section 5.

2 SYSTEM MODEL AND APPLIED SCENARIOS

To study the feasibility of introducing PieceWise Affine models for the building’s thermal calculation, we consider, in the first instance, a single room, before tackling a whole residential building later on. The room has an area of 29 m^2 , its ceiling is 2.7 m high and it is located on the first floor of the Computer Science and Control Systems department at Ecole des Mines de Douai, Douai, France. The room has one wall in contact with a hallway inside the building. Two walls and a roof are in contact with other offices, while one wall with two windows with shutters is in contact with the outside. The soil is supposed to be at a constant temperature of 10°C . A partition wall divides the room into two. Heating is provided by three electric radiators with 1000 W maximum heating power. The room is equipped with sensors measuring the value of various parameters (temperature, energy consumption, humidity, etc.).

The goal is to collect measurements which we later use in the estimation of the room’s model via parametric linear models and PWA models. However, to ensure that the dynamics are well captured, one has to have enough measurements, which means collecting data for several days, rather weeks and possibly months, which would be unfeasible in our case because we consider many scenarios. Hence, for the feasibility study we use data generated by the numerical model of the room created with Dymola that will quickly allow us to generate sufficient amount of data. The room’s model was created using the Buildings Library (Wetter et al. 2015).

In this work we are considering a MISO (Multiple Input Single Output) model where the temperature of the room simulated with Dymola is the output variable, the exterior influence (wind velocity, relative humidity, solar radiation) and the heating power are the input parameters.

The motivation behind using switching models is that, in a residential building, there exist different local linear functioning modes that correspond to the building’s different configurations. These configurations can be related to the user’s behavior. The number and the activity of the occupants and actions like opening and closing the doors and the shutters, lead to a change in the values of certain parameters, that leads to a change in the functioning mode. Oftentimes, changes in parameters like air change rate cannot be measured. If they were to be known, they could be used as an input to the MISO model and the behavior could be easily modeled by linear parametric models. However, when the air change rate cannot be measured, it should be treated as a characteristic of the system, hence parameter varying systems come into play. When considering that the air change rate parameter varies abruptly due to the opening of a window, for example, it can be taken as a discrete parameter, giving rise to switching systems. Based on all that, we decided to test the capability of switching models to capture the change in the functioning mode.

In order to find the model that reproduces the room’s thermal behavior, we subject the room, via Dymola, to multiple conditions, collect the data and then compare Dymola’s simulated output to, on one hand, the output predicted by the parametric models, and, on the other hand, the output predicted by the switching models. We will first test the change of the temperature of the room induced by the variation of the air change rate. Hence, in *scenario 0*, the air change rate in the room is fixed at a constant value equal to 0.2 vol/h . The weather parameters change according to their values in the weather file. The heat flow changes randomly every 15 min between 0 and 3000 W as shown in Fig. 2 (on a small time scale so that the variation could be well noticed). The simulation is run for 36 days starting from January first at midnight. The time interval is 15 min. In a second scenario, called *scenario 1*, the air change rate switches between two values : 0.2 vol/h and 20 vol/h every 6 days, as shown in Fig. 1. Although 20 vol/h for the air change rate for a simple residential building is unrealistic, but this paper is a first step in our feasibility study, so we use high values to have a preliminary result of how the switching models will perform. The heat flow remains the same as in *scenario 0*.

The result of the simulation is exported to Matlab, where the System Identification toolbox

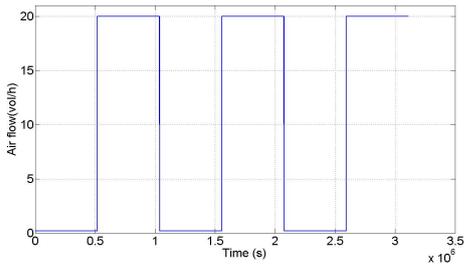
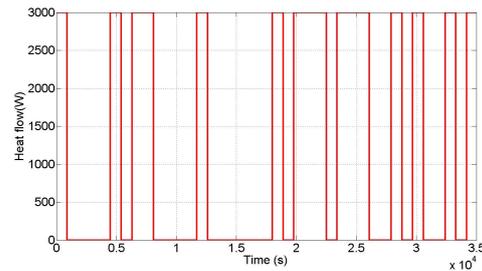

 FIGURE 1. Air change rate used in *scenario 1*


FIGURE 2. Heat flow used in both scenarios

and the algorithm presented in subsection 3.2 are used to test the capability of parametric linear models and PWA models respectively to predict the room's temperature.

3 SYSTEM IDENTIFICATION METHODS

System identification finds mathematical equations of dynamical systems from data, using statistical methods. A set of input-output data is required to find the desired parameters.

3.1 LINEAR PARAMETRIC MODELS

The dynamic system of a building can be represented by means of linear autoregressive relations between the discrete output $y(t)$ and the discrete input $u(t)$. Linear parametric models were successfully applied to building modeling. (Freire et al. 2008) used regression equations to predict the energy and hygrothermal performance of a building. (Ríos-Moreno et al. 2007) studied how to apply linear autoregressive models as an approach to the dynamic behavior of the temperature of the air inside classrooms. In the following, we present a short review on the structure of one of the three parametric models that we later use in section 4 to reproduce the room's thermal behavior. The equations correspond to a SISO (Single Input Single Output) system. For MISO systems, the equations are similar, with extra inputs coming into play. The estimation of the models is done using MATLAB's System Identification (ident) toolbox (MATLAB & SI 2012), (Jiménez et al. 2008).

The input-output relationship for a dynamic system is given by (Ljung 1987) :

$$y(t) = -a_1 y(t-1) - \dots - a_{n_a} y(t-n_a) + b_1 u(t-1) + \dots + b_{n_b} u(t-n_b) + e(t), \quad (1)$$

where $y(t)$ is the output, $u(t)$ is the input and $e(t)$ is the noise considered white and uncorrelated with the input. This yields to the conventional way of writing the input-output relationship :

$$\hat{y}(t) = \theta^\top \varphi(t), \quad (2)$$

where $\hat{y}(t)$ is the estimated value of the output $y(t)$, $\theta = [-a_1 \dots -a_{n_a} \ b_1 \dots b_{n_b}]^\top$ is the parameter vector to be calculated and $\varphi = [y(t-1) \dots y(t-n_a) \ u(t-1) \dots u(t-n_b)]$ is the regression vector. This gives the $ARX(n_a, n_b, n_k)$ model, where n_a is the order of the polynomial for the output, n_b , that of the input, and n_k indicates the number of sampling intervals related to dead time.

The other two structures used in our study are $ARMAX(n_a, n_b, n_c, n_k)$ and $OE(n_b, n_f, n_k)$. The reader is referred to chapter 4 of Ljung's book (Ljung 1987) for details on these structures.

The parameters in ARX and ARMAX model structures can be estimated using the least-squares method. However, in OE model structure, the relation being nonlinear, the least-squares method leads to bias, so to eliminate the bias the parameters are estimated using the Instrumental Variable (IV) method (Ljung 1987). The data is divided into two disjoint sets : the estimation data, which we use as the first two thirds of the data set, and validation data, chosen as the last

third. Estimation data is used to estimate the parameters of the model, i.e. the coefficients a_i , b_i , c_i , f_i . This model is validated using the validation data by means of the

$$Fit = 100 \left(1 - \frac{\sum_{k=1}^N \| y(k) - \hat{y}(k) \|}{\sum_{k=1}^N \| y(k) - \bar{y} \|} \right), \quad (3)$$

where $y(k)$ is the system's output, \bar{y} is its mean and $\hat{y}(k)$ is the model's estimation of $y(k)$ and

$$SSE = \sum_{k=1}^N (y(k) - \hat{y}(k))^2, \quad MSE = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (y(k) - \hat{y}(k))^2, \quad (4)$$

where SSE is the Sum square Error (SSE), and MSE is its mean. For a good match, Fit must be close to 100%, SSE must be minimal and MSE must be close to zero.

3.2 PIECEWISE AFFINE MODELS

The approach aims to model a specific system given its input-output data, using a Piece Wise AutoRegressive eXogeneous (PWARX) model (Boukharouba 2011).

A PWARX model is defined by

$$y(t) = f(\varphi(t)) + e(t), \quad (5)$$

where $e(t)$ refers to zero-mean noise samples and $\varphi(t) \in \mathbb{R}^n$ is the regression vector defined as

$$\varphi(t) = \left[y(t-1) \dots y(t-n_a) \ u(t)^\top \dots u(t-n_b)^\top \right]^\top, \quad (6)$$

where $u(t) \in \mathbb{R}^m$ and $y(t) \in \mathbb{R}$ are the input vector and the measured output of the system at time $t \in \mathbb{Z}$ respectively. The parameters n_a and n_b are the model orders. In (5), f is a PieceWise Affine map of the form

$$f(x) = \begin{cases} \theta_1^\top \bar{\varphi}, & \text{if } \varphi \in \chi_1 \\ \vdots & \\ \theta_s^\top \bar{\varphi}, & \text{if } \varphi \in \chi_s \end{cases} \quad (7)$$

where $\bar{\varphi} = [\varphi^\top \ 1]^\top$ is the extended regression vector and $\{\theta_i\}_{i=1}^s$ are the parameter vectors defining each of the submodels of (5). The sets $\{\chi_i\}_{i=1}^s$ in (7) form a complete partition of the regression space $\chi \subseteq \mathbb{R}^n$, with $n = n_a + mn_b$. Each region χ_i is a convex polyhedron $\chi_i = \{\bar{\varphi} \in \mathbb{R}^{n+1} : H_i \bar{\varphi} \leq \mathbf{0}\}$, with H_i a matrix of appropriate dimensions and $\mathbf{0}$, the null vector.

The algorithm used to test the feasibility of switching models was initially proposed in (Boukharouba 2011). It treats simultaneously the problem of data clustering and parameter estimation. We will briefly present the main ideas.

Given N data vectors $X(i) = [\varphi(i)^\top, y(i)]^\top$; $i = 1, \dots, N$ from our system, the approach consists of three steps : initialization, data re-affectation and convergence test.

The number of submodels being unknown, we set it initially to $\bar{s} = N$, i.e. each data point is a submodel. Data are initially partitioned into N clusters $C = \{C_1, \dots, C_N\}$, where $C_i = \{X(i)\}$. To these N clusters we assign the initial parameter vectors $\Theta^{(0)} = [\theta_1^{(0)}, \dots, \theta_N^{(0)}]$ where $\theta_i^{(0)}$ is calculated by considering the data $X(i)$ of the submodel C_i and its c nearest neighbors, denoted as cNN , and by using the least squares technique on these $c + 1$ data.

The initialization being done, the aim now is to reduce the number of clusters by reclassifying each data. Data will migrate towards the most representative clusters. The less representative clusters become empty and they are eliminated. Since the data are locally linear, the reassignment

of each $X(i), i = 1, \dots, N$, can be based on the information provided by its nearest neighbors and $X(i)$ can migrate to one of the clusters that contain some of its nearest neighbors according to a specific decision rule. Let $\Gamma_c(X(i))$ be the set of the cNN of $X(i)$ and let $X(j) \in \Gamma_c(X(i)), j = 1, \dots, c$, be one of its neighbors that belongs to $C_p, p \in \{1, \dots, \bar{s}\}$. We introduce the measure

$$\phi_j^i = \exp(-\alpha_p(d_j^i)^2 - \beta_p(y(i) - \theta_p^\top \bar{\varphi}(i))^2), \quad (8)$$

where $d_j^i = [(X(i) - X(j))^\top (X(i) - X(j))]^{\frac{1}{2}}$ is the Euclidean distance between $X(i)$ and the neighbor $X(j)$ and θ_p is the parameter vector associated with the cluster C_p . β_p and α_p are positive parameters associated with the cluster C_p and are computed by

$$\alpha_p = 1/d_p^2, \quad \beta_p = 1/e_p^2, \quad (9)$$

where e_p is the average error between the measured output and the submodel's output and d_p is the average distance between data belonging to the cluster C_p .

We define now the probability that the data point $X(i)$ belongs to the cluster C_p as

$$P(X(i) \in C_p) = \frac{\sum_{j/X(j) \in \{\Gamma_c(X(i)) \cap C_p\}} \phi_j^i}{\sum_{j=1}^c \phi_j^i}, \quad p \in \{1, \dots, \bar{s}\}. \quad (10)$$

This probability is equal to 1, if all the cNN of $X(i)$ belong to the cluster C_p and it is equal to 0 if none of them belongs to C_p . The decision is made by assigning the data $X(i)$ to the cluster C_{ret} , $ret \in \{1, \dots, \bar{s}\}$, that achieves the maximum of P . The decision rule is given by :

$$C_{ret} = C_{ret} \cup \{X(i)\}, \quad ret = \max_{p=1, \dots, \bar{s}} (P(X(i) \in C_p)). \quad (11)$$

The procedure of data reassigning ends when the stopping criterion $\|\Theta^{(r+1)} - \Theta^{(r)}\| \leq \eta$ is achieved, where r is the iteration index and η is a threshold of the user's choice. In our simulations a threshold η of order 10^{-5} is used.

4 RESULTS

For each scenario, samples were taken every 15 *min* for 36 *days*, thus yielding 7600 samples generated by the simulations. The table below shows the agreement between the temperature estimated by different linear parametric models and the output temperature from Dymola. As

Model structure ¹	Fit [%]		SSE		MSE	
	Scenario 0	Scenario 1	Scenario 0	Scenario 1	Scenario 0	Scenario 1
ARX (110)	45.65	0 ²	2.9×10^4	2.95×10^5	11.9	115.9
ARX (320)	66.11	0	1.54×10^4	3.34×10^5	6.24	131.18
ARMAX (2220)	65.27	0	1.41×10^4	2.9×10^5	5.72	113.69
ARMAX (3220)	71.65	0	1.39×10^4	3.08×10^5	5.6	120.82
OE (110)	47.35	29.16	3.17×10^4	2.29×10^5	12.82	89.8
OE (330)	73.06	0	1.26×10^4	4.8×10^9	5.1	1.8×10^6
PWA	74	64	2.17×10^4	8.8×10^4	2.92	11.54

TABLE 1: Evaluation of the tested models

shown in Tab. 1 and Fig. 3, for *scenario 0*, in which the air change rate is fixed at 0.2 vol/h , the temperature predicted by the parametric models was close to the output temperature, with the best estimate being 73%. However, for *scenario 1*, in which the air change is no longer constant, these same models do not succeed in predicting the room's temperature. Fig. 4 shows the plots of the output temperature and its best estimated value using parametric models for *scenario 1*. The drop of the temperature is due to the sudden increase in the air change rate (see Fig. 1).

1. ARX($n_a n_b n_k$), ARMAX($n_a n_b n_c n_k$), OE($n_b n_f n_k$)
 2. symbolic 0, very bad fit

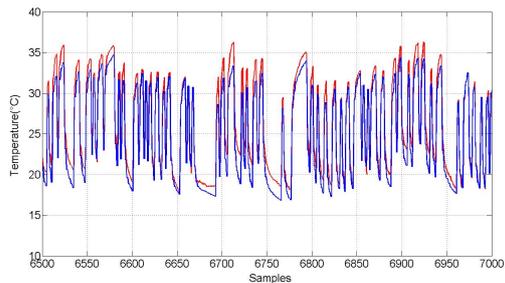


FIGURE 3. True output of the system (blue curve) together with the estimated output of OE(330) (red curve) for *scenario 0*

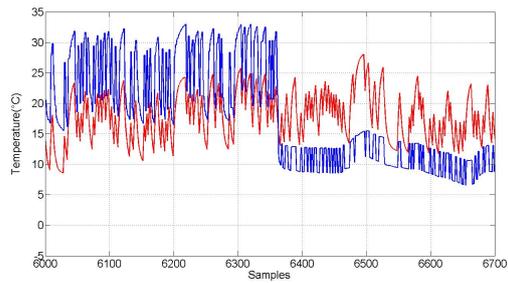


FIGURE 4. True output of the system (blue curve) together with the estimated output of OE(110) (red curve) for *scenario 1*

On the other hand, PWA models managed to give a good estimation of the output temperature in both scenarios. Fig. 5 shows the output temperature from Dymola and the estimated output of the PWA models together for *scenario 0* (for 1000 samples). This result is obtained for $n_a = n_b = 2$ and $c = 4000$. Only one class is predicted and a fit of 74 % is obtained. Fig. 6 shows the results for *scenario 1*. PWA models are able to identify the two functioning modes that correspond to the two values of the air change rate and the estimated temperature follows the output with a fit of 64%. The results were obtained for $n_a = n_b = 1$ and $c = 1500$. This same figure shows that the clusters identified correspond to the regions where the air change rate switches values. A third class can be related to other nonlinearities in the model.

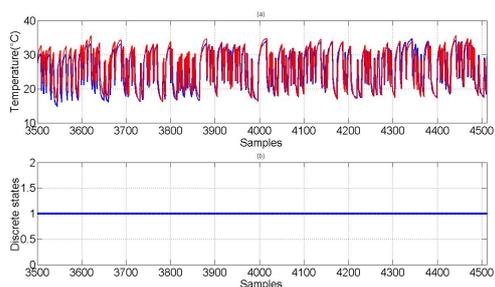


FIGURE 5. *scenario 0* : (a) True output of the system (blue curve) together with the estimated output of PWA models (red curve); (b) discrete states of the system

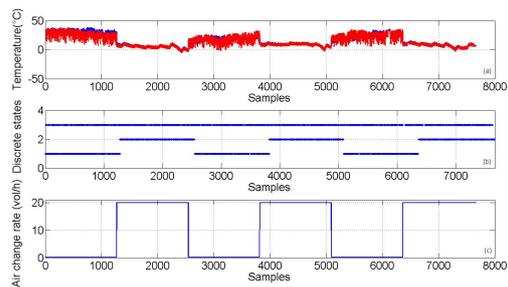


FIGURE 6. *scenario 1* : (a) True output of the system (blue curve), estimated output of PWA models (red curve); (b) discrete states of the system; (c) air change rate

5 CONCLUSION AND FUTURE WORK

In this paper we begin our study of the feasibility of using switching models for predicting the thermal behavior of buildings. For the current work, we studied the feasibility for the prediction of a room's temperature in different conditions and we presented a comparison between the results given by linear parametric models and PWA models when the room is subjected to a variable air change rate. The results showed that, while the standard linear parametric models failed to predict the temperature, switching models were able to detect those changes and predict the temperature with a fit of 64%. As future work, we will consider applying more scenarios in the room and collect a database of real measurements to test the ability of PWA models to estimate the room's behavior when more functioning modes are considered. After that, the goal would be to use the switching models to evaluate the energy performance of a building when considering a behavior that respects the norms of the thermal regulation and where construction parameters come into play.

RÉFÉRENCES

- Annunziata, E., Frey, M. & Rizzi, F. (2013), ‘Towards nearly zero-energy buildings : The state-of-art of national regulations in europe’, *Energy* **57**, 125 – 133.
- Boukharouba, K. (2011), Modélisation et classification de comportements dynamiques des systèmes hybrides, PhD thesis.
- Dymola & Catia (2015), *version 2015*, Dassault systemes.
- EPBD (2010), ‘On the energy performance of buildings’, *Official journal of the European Union, Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council* .
- Foucquier, A., Robert, S., Suard, F., Stéphan, L. & Jay, A. (2013), ‘State of the art in building modelling and energy performances prediction : A review’, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **23**, 272 – 288.
- Freire, R. Z., Oliveira, G. H. & Mendes, N. (2008), ‘Development of regression equations for predicting energy and hygrothermal performance of buildings’, *Energy and Buildings* **40**(5), 810 – 820.
- Jiménez, M., Madsen, H. & Andersen, K. (2008), ‘Identification of the main thermal characteristics of building components using {MATLAB}’, *Building and Environment* **43**(2), 170 – 180. Outdoor Testing, Analysis and Modelling of Building Components.
- Ljung, L. (1987), ‘System identification : theory for the user’, *Englewood Cliffs* .
- MATLAB & SI (2012), *version R2012b*, The MathWorks Inc., Natick, Massachusetts.
- Moura, P. S., López, G. L., Moreno, J. I. & Almeida, A. T. (2013), ‘The role of smart grids to foster energy efficiency’, *Energy Efficiency* **6**(4), 621–639.
- Paulus, M. T., Claridge, D. E. & Culp, C. (2015), ‘Algorithm for automating the selection of a temperature dependent change point model’, *Energy and Buildings* **87**, 95 – 104.
- Poel, B., van Cruchten, G. & Balaras, C. A. (2007), ‘Energy performance assessment of existing dwellings’, *Energy and Buildings* **39**(4), 393 – 403.
- Rajaoarisoa, L. H., M’Sirdi, N. K. & Balmat, J. F. (2012), Micro-climate optimal control for an experimental greenhouse automation, *in* ‘Communications, Computing and Control Applications (CCCA), 2012 2nd International Conference on’, pp. 1–6.
- Ríos-Moreno, G., Trejo-Perea, M., Castañeda-Miranda, R., Hernández-Guzmán, V. & Herrera-Ruiz, G. (2007), ‘Modelling temperature in intelligent buildings by means of autoregressive models’, *Automation in Construction* **16**(5), 713 – 722.
- RT (2012), ‘La réglementation thermique grenelle de l’environnement’.
URL: <http://www.rt-batiment.fr/>
- Wetter, M., Marco, B., Thierry-Stéphane, N., Wei, T. & Wangda, Z. (2015), Modelica buildings library 2.0, *in* ‘Building Simulation 2015 Hyderabad, India’.

Génération automatisée de plans d'instrumentation pour le commissionnement des bâtiments

Wilfried Thomaré^{*1}, Théo Reffet¹, Simon Rouchier¹, Monika Woloszyn¹

¹ LOCIE, Université de Savoie, CNRS UMR 5271

Polytech Annecy-Chambéry – Campus Scientifique – Savoie Technolac 73376 Le Bourget-Du-Lac cedex

*wilfried.thomare@univ.savoie.fr

RESUME. La phase de commissionnement d'un bâtiment, dont l'objet est de s'assurer de son bon fonctionnement, de celui de ces composants ainsi que de ses performances énergétiques, intègre la mise en œuvre d'actions en conception, réception, mise au point, ainsi que la mise en place d'un suivi énergétique reposant sur un plan d'instrumentation adapté.

Cet article se focalise sur la réalisation des plans d'instrumentations, facilité par l'utilisation d'une base de données et permettant le calcul de quatre niveaux d'indicateurs de performances. L'étude s'appuie sur le bâtiment démonstrateur Hélios, siège de l'INES, qui comporte différents systèmes innovants pour la régulation de l'hygrométrie et la production d'énergie renouvelable. L'article propose une structuration innovante d'indicateurs pour le commissionnement des bâtiments puis l'utilisation d'une base de données pour la réalisation de plans d'instrumentations pour ces premiers

MOTS-CLÉS : commissionnement, base de données, instrumentation.

ABSTRACT. The commissioning new building phase which purpose is to ensure proper operation and its energy performance and those of these components, integrates the implementation in design activities, reception, development and the implementation of an energy monitoring based on an instrumentation plan tailored.

This article focuses on the implementation of instrumentation plans, facilitated by the use of a database and allowing the calculation of four levels of performance indicators. The study is based on the Helios building, headquarters of the INES, which has various innovative systems for humidity control, production of inter-seasonal renewable energy and a central atrium. It first presents the structure of our indicators, then the use of our database to achieve instrumentation plans for these first

KEYWORDS : commissioning, data base, instrumentation.

1. INTRODUCTION

Les nouveaux bâtiments intègrent des systèmes énergétiques pour le chauffage, la climatisation, l'éclairage et la ventilation affichant des performances élevées. Ces performances énergétiques supposées sont estimées par les fabricants en situations contrôlées et isolées de toutes interactions. En conditions réelles, ces interactions avec les autres systèmes, le bâti et l'utilisation faites par les occupants du bâtiment font généralement chuter les performances énergétiques affichées lors de la phase conception (Neymark and Judkoff 2006)(Ternes and Michael 2008).

Une phase de commissionnement est donc nécessaire entre la phase de conception et d'exploitation pour garantir le maintien de la performance énergétique. Le commissionnement diffère des politiques d'économies d'énergie car il remet en cause l'intérêt d'un système énergétique par rapport à un autre. L'utilité première de cette phase est de définir la performance globale d'un système pour un service-rendu. Mais aussi, si une alternative plus efficace est envisageable, là où les politiques d'économies d'énergie ne s'intéressent qu'à augmenter la performance des systèmes présents (Mills 2010).

En France, le diagnostic des systèmes du bâtiment est un diagnostic énergétique décrit dans les Techniques de l'Ingénieur (Brasselet, Frustra, and Clerjaud 1994) et ayant évolué pour répondre aux différentes normes européennes et internationales (normes EN 16247-1 & 2, ISO 52003-1). On s'y cantonne à mesurer les consommations et rendements des systèmes, ce qui est insuffisant en présence d'équipements interconnectés, participant à plusieurs services-rendus ou utilisant des apports énergétiques gratuits.

L'article présente la méthode de commissionnement des systèmes énergétiques aux seins des bâtiments mise en place au sein du projet COMIS soutenu par l'ANR. Une méthode générale par mesure in-situ et la métrologie nécessaire, permettant le calcul d'un ensemble d'indicateurs est d'abord abordée. Ensuite une base de données permettant la réalisation de plans d'instrumentation automatisés pour la réalisation de la phase de commissionnement est présentée.

2. DEFINITION DES INDICATEURS DE PERFORMANCE

La volonté d'avoir une méthode applicable à toute situation fait la complexité de notre démarche. Si des démarches similaires ont pu être engagées, celles-ci se limitaient à l'étude d'un bâtiment prototype où les charges sont connues et où une instrumentation lourde peut être utilisée (Eynard et al. 2009)(Nazila Kahina 2008). Pour remplir ces objectifs, notre démarche s'articule autour de deux axes de travail. Premièrement, la définition d'indicateurs permettant de rendre compte de la performance des systèmes et de s'adapter à toute situation. Enfin, la définition d'une métrologie permettant le calcul des indicateurs.

2.1. STRUCTURE DES INDICATEURS DE PERFORMANCES

Nos indicateurs doivent permettre d'appréhender différents niveaux de détail. Ils doivent être capables, en partant d'observations macro, de naviguer à travers des indicateurs de plus en plus détaillés jusqu'aux valeurs plus spécifiques, permettant d'évaluer la performance d'un composant pour expliquer un phénomène à l'échelle du bâtiment. A cette fin nous avons défini des indicateurs dits « imbriqués », qui sont fonction non seulement des mesures mais aussi d'autres indicateurs préalablement calculés. La structure finale de la liste d'indicateurs est illustrée en **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** et repose sur 4 niveaux :

- Bâtiment
- Service rendu
- Système
- Composant

Chaque niveau contient un ou plusieurs éléments qui peuvent être liés avec des éléments d'autres niveaux via des relations « un-à-plusieurs » (ex : 1 bâtiment pour 5 services) ou « plusieurs-à-plusieurs » (niveau Système à niveau Composant ; un système comprend un ou plusieurs composants, un composant peut appartenir à plusieurs systèmes).

On définit un système en tant que « moyen » de satisfaire un service-rendu, un système étant la chaîne d'équipements, de la génération jusqu'à l'émission, qui vont transformer une source énergétique donnée en un service-rendu. Chacun des équipements sera appelé un « composant », pour lequel on pourra définir des indicateurs de performance intrinsèques, dénotant ses caractéristiques physiques. À noter que bien qu'un système est défini par rapport à une source énergétique donnée, cela ne l'empêche pas d'avoir des consommations électriques auxiliaires en plus de celle-ci. Cette définition permet de considérer chaque système comme utile à un seul service-rendu et ainsi de pouvoir aisément sommer les consommations de systèmes pour obtenir les consommations par service-rendu. Cela permet également de comparer entre eux les différents « moyens » employés dans le bâtiment pour satisfaire chaque service-rendu (voir lequel est le plus important, le plus efficace, lequel utilise une énergie gratuite, ou de juger de l'intérêt d'une technologie par rapport à une autre...).

Chaque élément d'un de ces niveaux contient une liste d'indicateurs qui définissent entièrement son fonctionnement et ses performances. Les indicateurs restent génériques et applicables à tous les bâtiments sans compromettre leur précision.

Cela implique que les consommations d'un système ne sont pas forcément égales à la somme de celles de ses composants puisqu'un composant peut alors faire partie de plusieurs systèmes (par exemple des capteurs solaires thermique faisant partie des systèmes « chauffage » et « production d'eau chaude sanitaire »).

De même, si un même composant est utilisé par deux systèmes différents, la production d'un système n'est pas égale à celle de ce composant. Il est donc nécessaire pour chaque composant de connaître dans quelles proportions il se dédie à chaque système auquel il appartient, et on considérera alors que ces proportions concernent aussi bien sa consommation que pour sa production. Il faut donc être capable de mesurer la répartition des flux énergétiques traversant un composant à chaque système auquel il participe.

Comme nous l'avons constaté, on peut trouver en sortie d'un composant plusieurs flux ayant pour destinations différents systèmes. Il faut dans ce cas appliquer un coefficient de répartition à tous les flux mesurés avant le composant pour connaître en quelle proportions ils sont destinés à chaque système. On définit pour chaque composant les coefficients de répartition: un composant ayant n sorties aura n coefficients notés y^{synt} . Ce principe est illustré en Figure 1

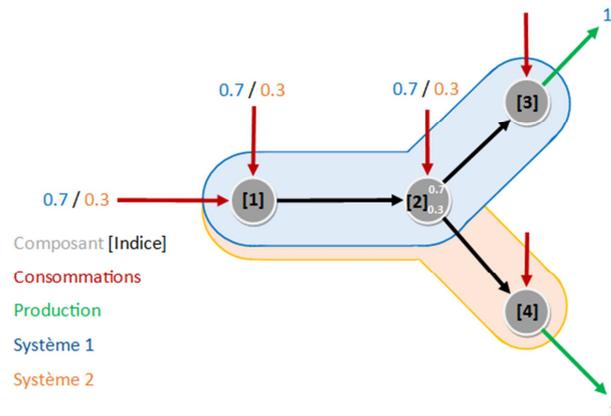


Figure 1 Exemple d'application de coefficient pour la répartition des flux pour différents systèmes

Dans cet exemple, on observe 2 systèmes partageant 2 composants (les composants [1] et [2]) en amont de leur composant terminal respectif ([3] et [4]). Il nous faut, d'après notre méthodologie, calculer en quelle proportion le flux issu du composant [2] se répartira entre les deux systèmes. Une fois cette donnée connue, il faut appliquer ce coefficient de répartition à toutes nos mesures de consommation (auxiliaire et primaire) pour les composants en amont de cette répartition.

Ainsi on observe qu'un coefficient de 0.7 et appliqué à toutes les consommations en amont de la sortie du composant [2] pour les calculs propre au système 1 et respectivement un coefficient de 0.3 pour le système 2 alors que les consommations en aval du composant [2] ne sont pas pondérées car ne subissent plus de division de flux.

2.2. DEFINITION DE LA METRIQUE

Pour la spécification des métriques deux points sont renseignés :

- La définition du type de mesure (thermique, énergie, CO₂ et qualité de l'air, ensoleillement, humidité, questions sur le confort thermique...).
- La définition du nombre et de la position des capteurs et du pas de temps de l'acquisition.

Les informations suivent majoritairement les préconisations du guide de l'instrumentation du bâtiment de l'ADEME (Costic 2015). Les mesures à effectuer sont définies indicateur par indicateur, et sont décrites suivant les mêmes caractéristiques pour toutes les mesures :

- le nom de la donnée ;
- le lieu d'acquisition : Une mesure se fait généralement soit sur le système ou composant pour lequel on définit l'indicateur, soit sur le milieu ambiant intérieur (pièces témoins), soit sur le milieu extérieur (météo). On notera « Occupants » lorsque l'on définit un besoin de sondage ;
- le pas de temps de l'acquisition ;
- le type de mesure correspondant : Il permet de retrouver la référence établi pour la bonne pratique de mise en place de la mesure dans un catalogue de bonne pratique édité pour le projet Comis.

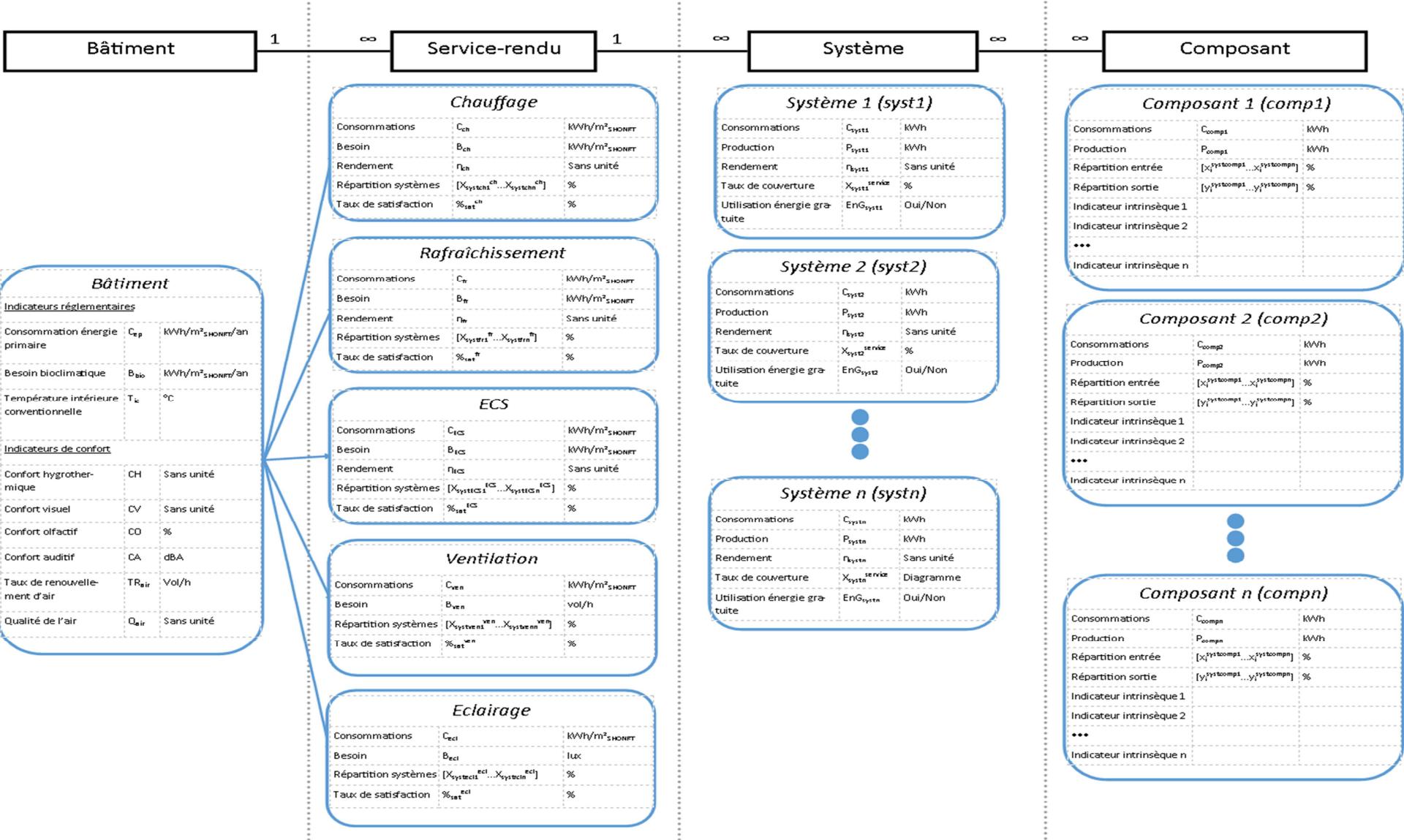


Figure 2 Structure finale des indicateurs de performance

3. CREATION ASSISTEE DE PLAN D'INSTRUMENTATION

Après avoir mis en place notre structure d'indicateurs, le problème se pose de la redondance des mesures nécessaires en cas de calcul d'indicateurs à différents niveaux notamment pour les bâtiments dotés de nombreux systèmes. Cela rend difficile l'utilisation de notre méthode et la prise en main du plan d'instrumentation obtenu. De plus l'apparition d'une même mesure pour un composant appartenant à différents systèmes rend difficile une éventuelle mise à jour après la modification du composant ou de la mesure.

Nous avons donc mis au point une base de données des mesures nécessaires au calcul de nos indicateurs. Cette base permet à l'utilisateur de renseigner les systèmes et composants constituant son bâtiment selon la hiérarchie présentée dans les parties précédentes et d'allouer à chaque système un service rendu. Dans un second temps, l'utilisateur indique les services-rendus et les systèmes pour lesquels il souhaite le calcul d'indicateurs comme l'illustre la Figure 3

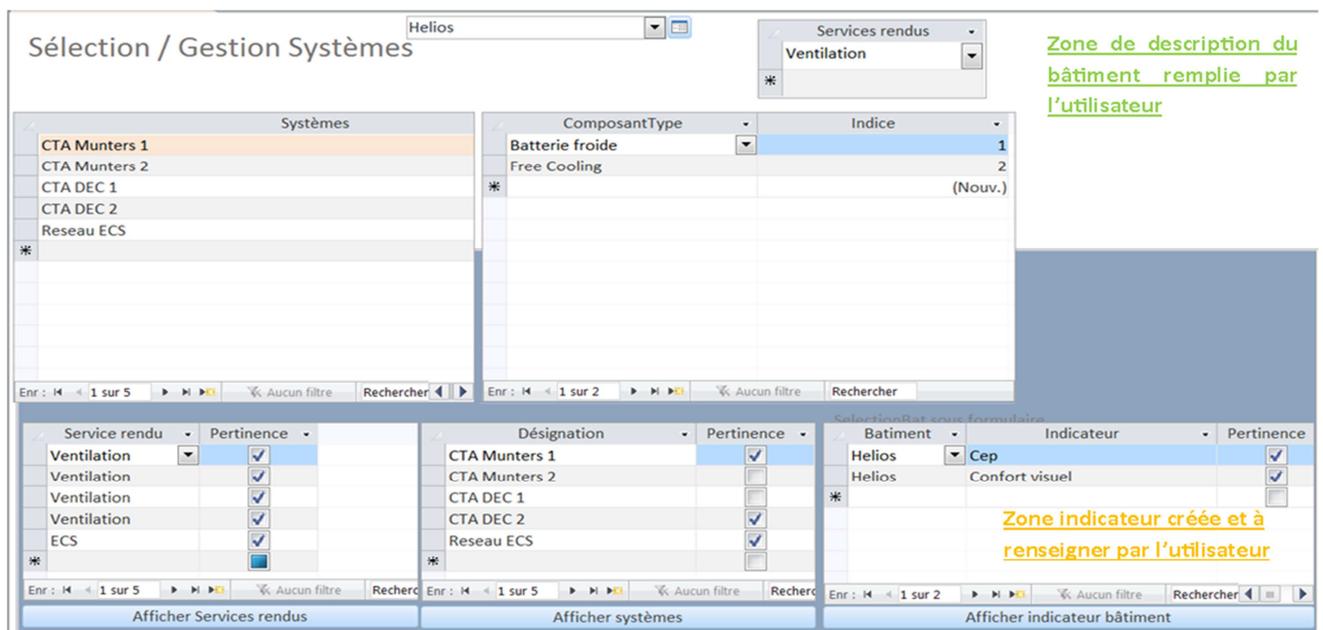


Figure 3 Interface de la base de données

L'utilisateur enregistre tout d'abord le nom de son bâtiment, puis nomme les systèmes le constituant. Pour chaque système un service-rendu unique doit être renseigné. Enfin, l'utilisateur remplit pour chaque système la suite logique des composants constituant son système en leur donnant un rang ; 1 depuis le composant de production à « n » pour le ou les composants d'émission. Ces composants sont à choisir parmi une liste, la plus exhaustive possible, de composants pré enregistrés. Cependant, si l'utilisateur souhaite enregistrer de nouveaux composants, cela lui est disponible par différentes boîtes de dialogue. Si un même composant est utilisé dans différents systèmes dans un même bâtiment, une boîte de dialogue lui demandera si ce composant est commun aux systèmes ou non.

Une fois le bâtiment entièrement configuré, l'utilisateur peut afficher l'ensemble des indicateurs calculables d'après notre méthodologie. Il lui est alors permis de sélectionner uniquement ceux

l'intéressant puis de générer le plan d'instrumentation. La configuration du bâtiment est enregistrée dans notre base de données, permettant ainsi une réutilisation rapide de l'outil une génération de différents plans à différents moments de son projets.

L'utilité de la base de données est de fournir un plan d'instrumentation listant l'ensemble des points de mesure nécessaires pour renseigner tous les indicateurs souhaités sans aucune redondance. Il est facilement modifiable par l'utilisateur en cas d'élargissement de la zone de commissionnement ou de changement de configuration dans son bâtiment. Un exemple partiel de plan d'instrumentation généré par notre base de données est montré en Figure 4, il s'appuie sur les systèmes énergétiques du bâtiment Hélios au Bourget du Lac.

Désignation	typecomposant.Nom	NomDeLaMesure	TypeMesurePossible.Nom	Reference
CTA Munters 1	CTA	Consommation auxiliaire	Energie electrique	[13, p. 30]
CTA Munters 1	CTA	Debit d'air traité	Vitesse d'air en conduit	[13, p. 34]
CTA Munters 1	CTA	Entrée d'eau chaude (n fois)	Energie thermique	[13, p. 31]
CTA Munters 1	CTA	Humidités absolue de l'air traité	Hygrometrie en conduit	[13, p. 19]
CTA Munters 1	CTA	Humidités absolues de retour (n fois)	Hygrometrie en conduit	[13, p. 19]
CTA Munters 1	CTA	Température de l'air traité	Temperature en conduit	[13, p. 19]
CTA Munters 1	CTA	Temperature de retour (n fois)	Temperature en conduit	[13, p. 19]
CTA Munters 2	CTA	Consommation auxiliaire	Energie electrique	[13, p. 30]
CTA Munters 2	CTA	Debit d'air traité	Vitesse d'air en conduit	[13, p. 34]
CTA Munters 2	CTA	Entrée d'eau chaude (n fois)	Energie thermique	[13, p. 31]
CTA Munters 2	CTA	Humidités absolue de l'air traité	Hygrometrie en conduit	[13, p. 19]
CTA Munters 2	CTA	Humidités absolues de retour (n fois)	Hygrometrie en conduit	[13, p. 19]
CTA Munters 2	CTA	Température de l'air traité	Temperature en conduit	[13, p. 19]
CTA Munters 2	CTA	Temperature de retour (n fois)	Temperature en conduit	[13, p. 19]

Figure 4 Plan d'instrumentation final

4. CONCLUSIONS

Une base de données a été créée dans le cadre du projet COMIS afin de faciliter l'utilisation d'une méthode de commissionnement créée en parallèle. Le développement d'une méthode et d'outils associés a pour but de développer la pratique d'une phase de commissionnement entre la fin de la phase de construction des bâtiments et le début de leurs exploitations.

En effet le commissionnement est la méthode permettant au mieux de maintenir les performances énergétiques théoriques d'un bâtiment, pour un coût très largement inférieur aux profits engendrés (Piette et al. 2004). Notre méthode se distingue des méthodes classiques de commissionnement des bâtiments ((GSA 2005), (Bochat et al. 2009) ...) par son interopérabilité et son adaptabilité face à tous types de bâtiment et par le support technique apporté aux utilisateurs. Cette volonté fut gardée lors de la réalisation des outils associés. En conséquence notre base de données se veut exhaustive et précise tout en pouvant être modifié par l'utilisateur tout au long de la réalisation de son projet.

5. PERSPECTIVES

Le commissionnement, bien qu'économiquement viable, reste largement sous-employée pour différentes raisons (Absence de cadre légal, manque de formation, faible popularisation, coût fort à l'investissement, ...). C'est pourquoi, le LOCIE, le CEA et I2M ont décidé de développer leur méthode.

Pendant, cette méthode doit être confirmée par une application in-situ. Pour cela 3 bâtiments ont été sélectionnés : Le bâtiment Hélios, siège de l'INES, le nouveau bâtiment de l'école Polytech Annecy-Chambéry et le bâtiment SYNERGI de l'I2M. Les mesures obtenues après instrumentation seront comparées à des mesures simulant le comportement idéal des bâtiments mais aussi à des mesures comparables si ces bâtiments étaient pourvus de systèmes les plus courants. Cela afin de pouvoir qualifier l'intérêt des systèmes présents, de valider nos modèles d'indicateurs et la pertinence des plans d'instrumentation ressortant de notre base de données.

6. BIBLIOGRAPHIE

- Bochat, James, Steve Wiggins, Gerald Bauers, Barry Fitzgerald, Robert Linder, Michael Locke, Terry Townsend, James Whorton, David Bevirt, and Andrew Nolfo. 2009. "NEBB Procedural Standards for Whole Building Systems Commissioning of New Construction." Gaithersburg. http://www.nebb.org/assets/1/7/PST_BSC_2009.pdf.
- Brasselet, Jean-Pierre, Frédéric Frustra, and Michel Clerjaud. 1994. "Audits énergétiques Des Bâtiments" Techniques de l'ingénieur, Vol. Archives - Thermique industrielle.
- Costic. 2015. *L'instrumentation Des Bâtiments*. ADEME créadequat. Guide pratique.
- Eynard, J, B Paris, S Grieu, and G François. 2009. "Stratégies de Contrôle Pour La Gestion énergétique D'un Bâtiment." In *3ème Journées Doctorales / Journées Nationales MACS*.
- GSA. 2005. "The Building Commissioning Guide." <https://www.wbdg.org/ccb/GSAMAN/buildingcommissioningguide.pdf>.
- Mills, Evan. 2010. "A Golden Opportunity for Reducing Energy Costs and Greenhouse Gas Emissions." Lawrence Berkeley National Laboratory. <http://cx.lbl.gov/2009-assessment.html>.
- Nazila Kahina, Hannachi-belkadi. 2008. "Développement d'une méthodologie d'assistance au commissionnement des Bâtiments à Faible Consommation d'énergie." Université Paris-Est. 2008PEST0241.
- Neymark, J, and R Judkoff. 2006. "Model Validation and Testing: The Methodological Foundation of ASHRAE Standard 140." In *ASHRAE 2006 Annual Meeting*, 15. Quebec. <http://www.nrel.gov/buildings/pdfs/40360.pdf>.
- Piette, Mary Ann, Evan Mills, Hannah Friedman, Tehesia Powell, Norman Bourassa, David Claridge, and Tudi Haasl. 2004. "The Cost Effectiveness of Commercial-Buildings Commissioning. A Meta-Analysis of Energy End Non-Energy Impacts in Existing Buildings and New Construction in the United States.pdf." <http://evanmills.lbl.gov/pubs/pdf/cx-costs-benefits.pdf>.
- Ternes, Mark, and Gettings Michael. 2008. "Analyses to Verify and Improve the Accuracy of the Manufactured Home Energy Audit (MHEA)." http://weatherization.ornl.gov/pdfs/ORNL_CON-506.pdf.

Caractérisation de l'impact de la diffusion de pompes à chaleur sur la demande électrique

Baptiste Béjannin^{1,*}, Thomas Berthou¹, Bruno Duplessis¹, Philippe Rivière¹

¹ MINES ParisTech, PSL Research University, Centre d'efficacité énergétique des systèmes

* baptiste.bejannin@mines-paristech.fr

RESUME. Cette étude permet d'observer l'impact des consommations des pompes à chaleur (PAC) sur la courbe de charge électrique nationale en fonction du nombre de PAC installées et propose des éléments de prospective sur l'évolution du gradient thermique du chauffage électrique.

MOTS-CLÉS : Pompe à chaleur, Courbe de charge, Smart-E.

ABSTRACT. This study shows the impact of heat pump consumption on the national electrical load curve based on the number of heat pumps installed and offers prospective elements on the evolution of the thermal gradient of the electric heating.

KEYWORDS: Heat pump, load curve, Smart-E.

1. INTRODUCTION

Aujourd'hui, plus d'un tiers des logements en France sont équipés de systèmes de chauffage électrique, ce qui représente une consommation annuelle d'environ 43 TWh. La courbe de charge électrique nationale en est donc très impactée et est donc fortement dépendante de la température extérieure. Pour plusieurs raisons (nouvelles réglementations thermiques (RT2005 puis RT2012) qui contraignent à l'installation de systèmes de chauffage performants dans les logements neufs ou encore les aides financières (crédit d'impôt) pour la rénovation des logements anciens), les ménages sont poussés à opter pour de meilleurs systèmes de chauffage. C'est pour cela que le nombre de pompes à chaleur (PAC) a considérablement augmenté en France: 5% des ménages en possèdent aujourd'hui et on en prévoit environ 8% en 2020 (Özkizilkaya, 2014). Parmi ces PAC, 45% sont de type Air/Eau et 44% Air/Air. Nous ne nous intéresserons dans cette étude qu'aux pompes à chaleur Air/Air. Grâce à ces systèmes de chauffage, la consommation globale peut être fortement réduite, mais ils induisent une forte thermosensibilité. En effet, l'efficacité varie non-linéairement avec la température extérieure. Au vu du nombre important de PAC en France et des perspectives de développement, il est important d'évaluer leur impact sur la courbe de charge nationale.

2. PRESENTATION DE L'ETUDE

Le but de ce travail est de déterminer l'impact de la mise en place des pompes à chaleur sur la consommation électrique nationale. Nous utilisons à cet effet la plateforme de simulation de la

consommation énergétique d'un parc *Smart-E* (Berthou et al., 2015). Cette plateforme permet notamment de simuler le comportement énergétique des logements français à partir d'un échantillon représentatif. A l'aide de modèles physiques simples, cet outil donne la possibilité de paramétrer et simuler plusieurs centaines d'équipements énergétiques. Les besoins de chaleur sont calculés à l'aide d'un modèle RC validé précédemment (Berthou et al., 2014) et les systèmes sont paramétrés à partir d'enquêtes terrain et de données constructeurs. Ainsi nous pouvons représenter simplement la diversité du mode d'utilisation et de systèmes CVC à l'échelle nationale.

Pour caractériser l'impact de l'installation des PAC sur la courbe de charge nationale, nous avons adopté la procédure suivante :

- Sélection d'un modèle de PAC facile à paramétrer, peu couteux en temps de calcul et validé.
- Création d'un parc de logements réduit représentatif de la France. Des éléments de représentabilité de ce parc sont donnés.
- Test de différentes projections d'installation de PAC et observation de leur impact sur la courbe de charge nationale.

Pour résumer, cette étude donne donc l'impact des consommations des PAC sur la courbe de charge électrique nationale en fonction du nombre de PAC installées et propose des éléments de prospective sur l'évolution du gradient thermique du chauffage électrique.

3. CREATION D'UN PARC DE LOGEMENTS REDUIT REPRESENTATIF DE LA FRANCE

Afin de modéliser un parc de logements réduits représentatifs des logements français, nous utilisons des données (« Recensement de la population 2012 », *INSEE* 2015) contenant des informations sur l'année de construction, la surface, le type de chauffage, le nombre de pièces, les occupants, la localisation, etc. Ainsi, nous représentons avec fiabilité la diversité du parc français. Cependant, ces données ne contiennent aucun élément sur les pompes à chaleur : nous avons donc dû en équiper les logements concernés de façon à garder une certaine représentation du parc français. Nous avons équipé en priorité les logements antérieurs à 1988 (ceux-ci étant supposés rénovés).

Notre étude ne portant que sur la consommation électrique, nous n'avons gardé que les logements équipés de systèmes de chauffage électrique (représentant environ 30% de tous les logements français). La part de logements équipés de pompes à chaleur est de 5% sur le parc entier (donc environ 15% des logements électriques) (Özkizilkaya, 2014). Dans le but d'obtenir une diversité représentative du parc français, nous avons dû prendre un parc réduit de 10000 logements, en ne gardant que 2955 logements équipés en chauffage électrique pour chacun de nos scénarios (avec plus ou moins de logements équipés de pompes à chaleur).

	Logements collectifs (%)	Logements individuels (%)	Chauffage au gaz (%)	Chauffage électrique (%)	Chauffage au fuel (%)	Nombre d'occupants moyen	Surface moyenne (m)
Parc français	41,9	58,1	35,9	32,0	13,7	2,3	91,0
Parc réduit	41,3	58,7	37,0	29,6	15,8	2,3	85,4

Tableau 1: Comparaison entre parc français et parc réduit

Les valeurs de notre parc réduit correspondent donc au parc français.

4. DESCRIPTION DU MODELE CHOISI DE POMPE A CHALEUR

4.1. METHODE POUR ANALYSER L'IMPACT DES PARAMETRES

Nous avons dû tout d'abord modéliser la pompe à chaleur (PAC) air/air. Pour ce faire, nous avons exploité le modèle d'un article de Morisot et Marchio (2004) portant sur la modélisation des pompes à chaleur. Seulement deux équations sont nécessaires :

$$\left(\frac{P_{afl}}{P_{cfl}} \right) = \left(\frac{P_a}{P_c} \right)_{Nom} \cdot (C_{C0} + C_{C1} \cdot \Delta t + C_{C2} \cdot \Delta t^2)$$

$$\text{où: } \Delta t = \left(\frac{t_{ei}}{t_{se}} \right) - \left(\frac{t_{ei}}{t_{se}} \right)_{Nom}$$

$$P_{cfl} = P_{cNom} \cdot (1 + D_{C1} \cdot (t_{ei} - t_{eiNom}) + D_{C2} \cdot (t_{se} - t_{seNom}))$$

Figure 1: Equations du modèle de PAC, Morisot & Marchio, 2004

Où :

- P_{afl} est la puissance électrique à pleine charge au compresseur en conditions non nominales (W).
- P_{cfl} est la puissance thermique de chauffage à pleine charge fournie en conditions non nominales (W).
- t_{ei} est la température de l'air intérieur (°C).
- t_{se} est la température de l'air extérieur (°C).
- Les valeurs nominales de t_{ei} et t_{se} sont respectivement 20°C et 7°C.

Les valeurs des constantes C_{C0} , C_{C1} , C_{C2} , D_{C1} et D_{C2} ont été identifiées à partir de valeurs des puissances électriques et thermiques de pompes à chaleur (P_{afl} et P_{cfl} dans les équations ci-dessus) en fonction des températures intérieures et extérieures d'un catalogue constructeur : $C_{C0} = 0,96$; $C_{C1} = -5,15$; $C_{C2} = 18,18$; $D_{C1} = 0,012$ et $D_{C2} = -0,012$.

Le COP nominal (correspondant aux températures nominales : 7°C et 20°C respectivement pour les températures extérieure et intérieure) de la PAC a été calé sur une valeur moyenne de 3,4 (*Ecodesign Lot 10 Final report of Task 4, 2009*) (voir figure 2).

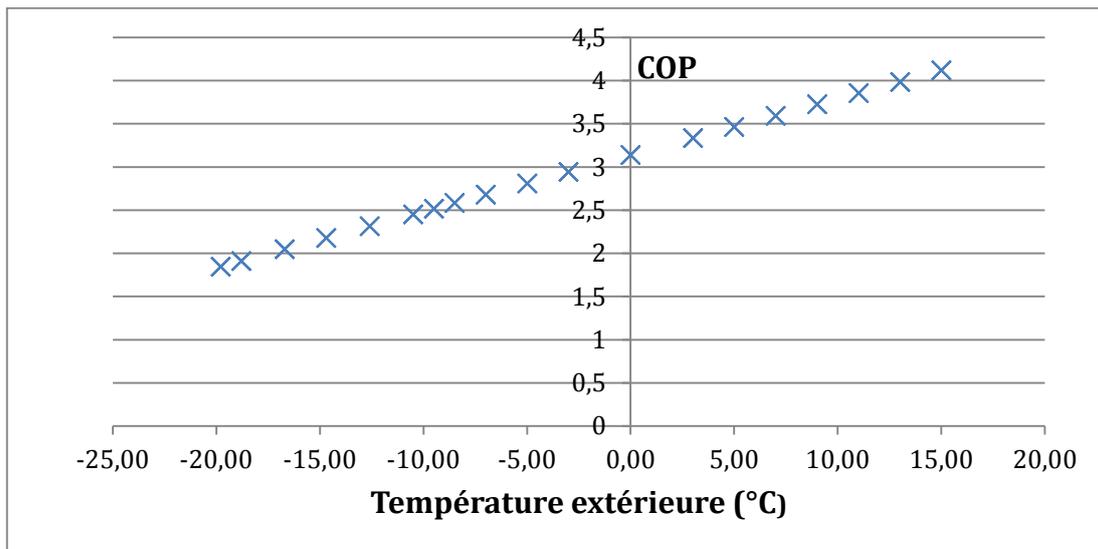


Figure 2: COP du catalogue en fonction de la température extérieure

Les pompes à chaleur dont les données ont été prises dans ce catalogue sont performantes : le COP vaut 2 lorsque la température extérieure est de -17°C . De plus, la valeur de D_{C2} n'est pas très élevée (seulement 1,2%) ce qui signifie que la dégradation de la puissance calorifique avec la température extérieure est limitée. Ainsi, ces courbes de performance ne correspondent pas forcément à une machine représentative. Cependant, le manque de données sur les pompes à chaleur Air/Air nous a amenés à garder cette valeur.

4.2. DIMENSIONNEMENT, APOINT ET CHARGE PARTIELLE

Nous avons modélisé une pompe à chaleur dimensionnée à -7°C , la température extérieure étant une moyenne sur tout le territoire français. Ceci permet de couvrir l'ensemble des besoins sans avoir recours à un appoint.

Nous avons modélisé la dégradation (nommé PLF pour 'Part Load Factor') ainsi que le taux de charge partielle (nommé PLR pour 'Part Load Ratio') de la pompe à chaleur comme Henderson nous l'indique (*Henderson et al 2000*).

Le PLR se calcule ainsi : $PLR = \frac{\text{charge réelle}}{\text{puissance max disponible}}$

Le PLF est lui le produit de deux dégradations liées au cyclage de la PAC et à la consommation de veille (tous deux étant fonction du PLR) :

$$PLF = PLF_{\text{cycle}} * PLF_{\text{sb}} ;$$

$$\text{Où } PLF_{\text{cycle}} = [(1-\alpha) + \alpha * PLR], \text{ avec } \alpha = 0.12$$

$$\text{Et } PLF_{\text{sb}} = \frac{PLR}{\beta + (1-\beta) * PLR}, \text{ avec } \beta = 0.03$$

Ce type de modèle est classiquement utilisé pour un fonctionnement horaire. Nous supposons qu'il reste valable pour un pas de temps plus court de 10 mn. Voici la courbe du coefficient de dégradation horaire PLF en fonction du taux de charge PLR :

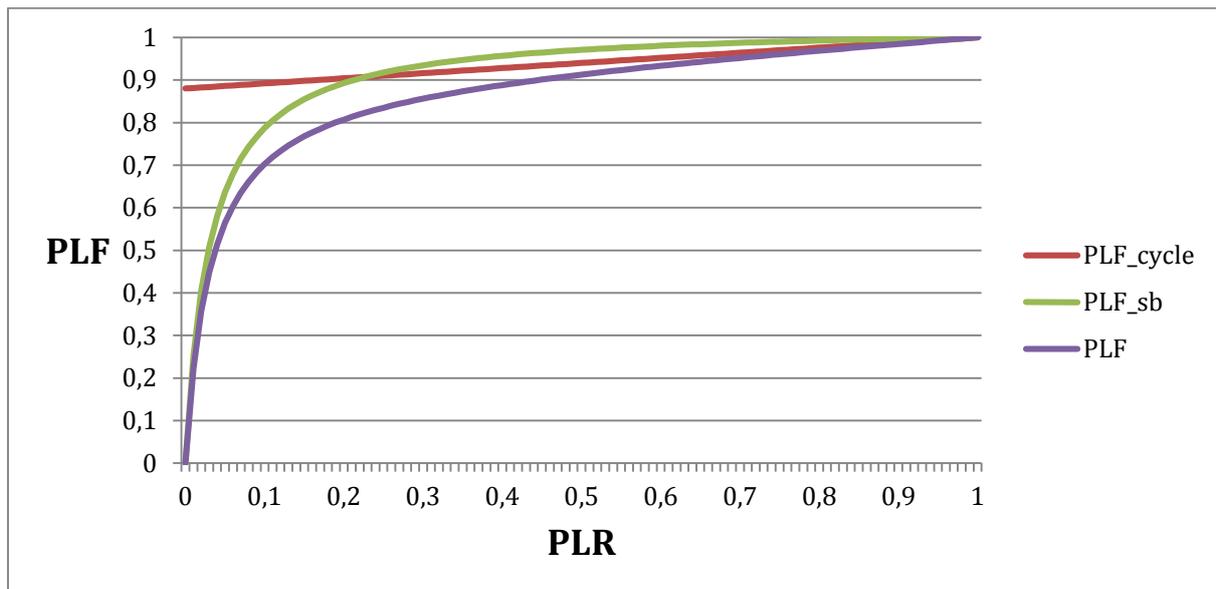


Figure 3: PLF en fonction du PLR

5. IMPACT DE LA DIFFUSION DES POMPES A CHALEUR

Nous avons testé plusieurs configurations de répartition des pompes à chaleur (PAC). Nous ne nous sommes intéressés qu'aux logements équipés de chauffage électrique (qui représentent comme nous l'avons déjà vu environ 30% du parc français) :

Scénario	Logements équipés de chauffage électrique visés par l'équipement de PAC
Parc actuel (5% de PAC) ⁽¹⁾	Toute époque
33% de PAC	Bâtiments antérieurs à 1988
67% de PAC	Bâtiments antérieurs à 1988
100% de PAC	Toute époque

Tableau 2: Logements visés par l'équipement de pompes à chaleur

A des fins d'analyse de sensibilité, nous avons poussé l'étude jusqu'à équiper la totalité du parc de PAC.

Afin de comparer ces différents scénarios, nous avons observé la puissance électrique en fonction du temps sur deux journées d'hiver classiques ainsi que l'énergie consommée quotidienne en fonction de la température extérieure moyenne (figure 5).

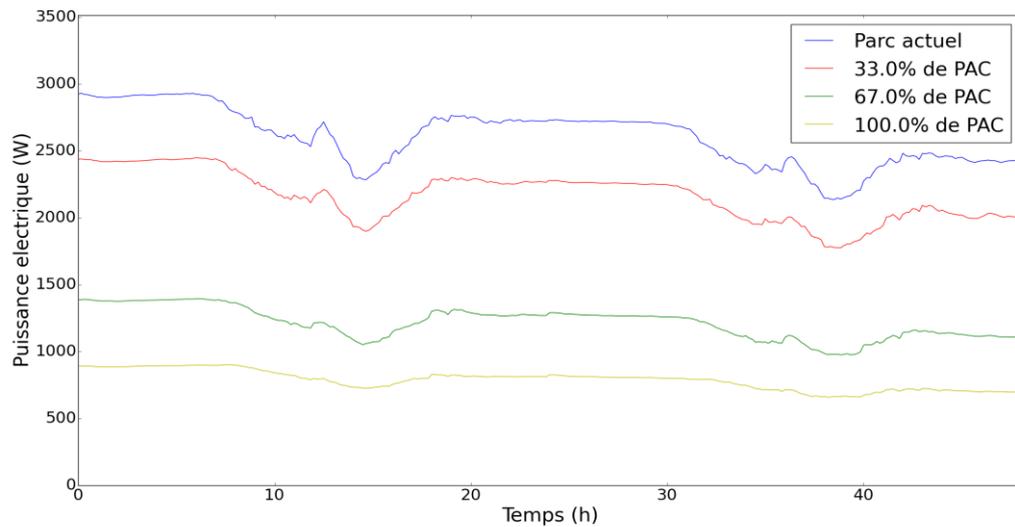


Figure 4: Puissances électriques moyennes pour 2955 logements sur deux journées pour nos différents scénarios

Ce graphique correspond à deux journées du mois de janvier. On peut d'abord remarquer que la courbe liée à un scénario avec 100% de PAC est bien environ 3 fois inférieure à celle du cas de référence. Ceci concorde avec notre COP calculé auparavant dont la valeur moyenne est de 3.

Nous avons ensuite souhaité observer l'impact d'ajout de PAC sur la consommation journalière en fonction de la température extérieure moyenne. Notre cas d'étude n'étant pas une PAC réversible, nous ne nous sommes intéressés qu'à la période de chauffage : du 15 octobre au 15 mai environ. A l'aide d'une régression linéaire, nous avons souhaité approcher chacune de nos courbes par une droite afin d'en mesurer la linéarité :

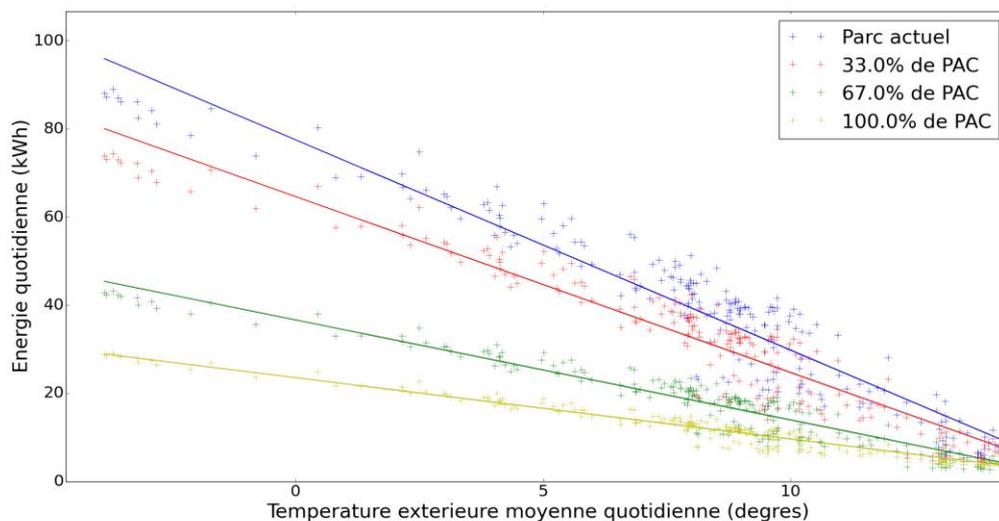


Figure 5: Consommations quotidiennes moyennes pour 2955 logements en fonction de la température extérieure moyenne pour nos différents scénarios

Nous remarquons que logiquement, plus la température extérieure augmente, plus la consommation journalière diminue : les besoins s'amoinrent. Voici les équations liées à nos différents scénarios avec le coefficient de détermination associé :

Scénario	Equation de la régression linéaire	R
Parc actuel (5% de PAC)	$-4,73*T + 76,94$	0,927
Parc avec 33% de PAC	$-4,65*T + 75,28$	0,926
Parc avec 67% de PAC	$-2,35*T + 37,94$	0,938
Parc avec 100% de PAC	$-1,47*T + 24,87$	0,952

Tableau 3: Identification du gradient thermique

L'erreur de l'approximation de la régression linéaire de notre consommation journalière ne varie quasiment pas avec l'augmentation de PAC dans notre parc et est constante à environ 0,93. Nous aurions pu supposer qu'il diminuerait à cause de la non-linéarité en fonction de la température extérieure liée à la pompe à chaleur mais ce n'est pas le cas. Cela s'explique par l'absence de la prise en compte d'un éventuel appoint électrique à faible température extérieure et aussi par la bonne performance relative de la PAC à charge partielle (voir *figure 7*).

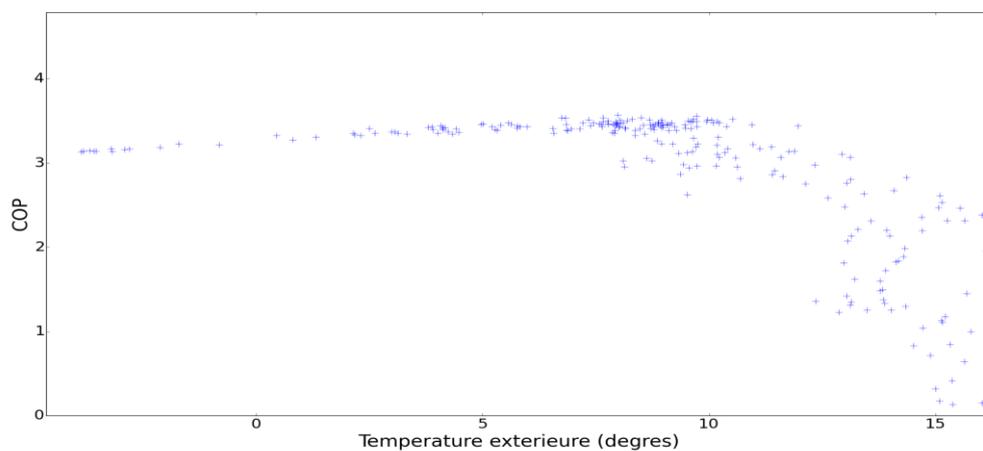


Figure 6: COP moyen quotidien en fonction de la température extérieure moyenne pour un cas avec 100% de PAC

Nous remarquons que les valeurs correspondent à nos attentes pour les températures faibles (inférieures à 8°C) avec un COP de 3 environ. Cependant, la pente avec laquelle il augmente avant 8°C n'est pas aussi forte que nos suppositions. De plus, on remarque une forte baisse pour les températures supérieures à 8°C. Ceci provient du taux de charge (voir *figure 8*).

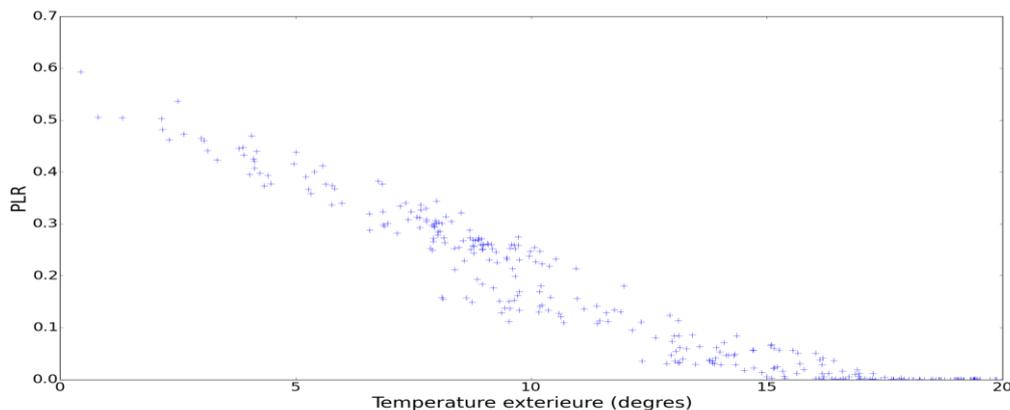


Figure 7: Taux de charge quotidien en fonction de la température extérieure

Ainsi, nous observons que le PLR est inférieur à 0.2 lorsque la température extérieure est supérieure à 8°C. Ceci est en accord avec la *figure 4* : le PLF (et donc le COP) diminue fortement pour un PLR

inférieur à 0.2. C'est donc le terme lié à la charge partielle qui atteint fortement le COP pour des températures élevées. De la même façon, pour les faibles températures d'air extérieur, le fait d'avoir intégré la perte de veille dans le modèle à charge partielle tend à compenser la non-linéarité de la consommation électrique liée à l'effet de la température extérieure sur le COP.

6. CONCLUSION

Comme nous pouvions nous y attendre, la consommation énergétique sur le parc français diminue avec le nombre de logements équipés de pompes à chaleur. De plus, la courbe d'appel de puissance résultante reste linéaire avec la température extérieure, contrairement à nos attentes. Cela s'explique via les hypothèses suivantes : absence d'appoint électrique pour les PAC air/air, et le fait d'avoir intégré la perte de veille dans le modèle à charge partielle, qui tend à compenser la non linéarité de la consommation électrique liée à l'effet de la température extérieure sur le COP.

Le manque de données sur les performances et les conditions d'installation des PAC Air/Air limitent la représentativité des résultats de l'étude. Mais l'impact important de ces hypothèses sur la courbe de charge électrique obtenue montre l'intérêt de poursuivre cette étude en intégrant d'autres hypothèses sur le dimensionnement, l'appoint ou la prise en compte des pertes de veille, dont une partie est elle-même probablement thermosensible.

7. BIBLIOGRAPHIE

Berthou, T., Stabat, P., Salvazet, R. & Marchio, D., 2014. Development and validation of a grey box model to predict thermal behavior of occupied office buildings. *Energy and Buildings*, Issue 74.

Berthou, T. et al., 2015. SMART-E: A TOOL FOR ENERGY DEMAND SIMULATION AND OPTIMIZATION AT THE CITY SCALE. *Building Simulation 2015*.

Blervarque, Hubert. 2014. « Règles de modélisation des systèmes énergétiques dans les bâtiments basse consommation ». Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris. <https://pastel.archives-ouvertes.fr/tel-01139365>

Henderson, Hugh I. 2000. « 2000 ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Buildings ».

INSEE, 2015. « Recensements de la population 2012 ». <http://www.insee.fr/>

Morisot et Marchio. 2004. « Pompe à chaleur à condensation à air : modélisation simplifiée dans l'optique d'un calcul des consommations d'énergie d'une installation de climatisation dans un bâtiment tertiaire ». Centre Scientifique et Technique du Bâtiment ; Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris.

Özkizilkaya, Özlem. 2014. « Thermosensibilité de la demande électrique : identification de la part non linéaire par couplage d'une modélisation bottom-up et de l'approche bayésienne ». Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris. <https://pastel.archives-ouvertes.fr/tel-01142341>

Rivière, Philippe. 2009. « Preparatory study on the environmental performance of residential room conditioning appliances (airco and ventilation) ». ECODESIGN Lot10 Final Report of Task 4. Armines, France.

Evaluation et optimisation énergétiques à l'échelle quartier

Clément Ribault*¹², Adrien Brun¹, Gilles Rusaoüen², Jean-Jacques Roux², Etienne Wurtz¹

¹ LGEB, CEA-LITEN

INES, 50 Avenue du Lac Léman, 73370 Le Bourget-du-Lac, France,

² CETHIL, UMR5008, CNRS, INSA-Lyon, Université Lyon1

20 Av. A. Einstein, 69621 Villeurbanne Cedex, France

*clement.ribault@cea.fr

RESUME. Cet article met l'accent sur le besoin d'outils d'aide à la conception des projets de densification des aires urbaines. Des possibilités d'utilisation du logiciel EnergyPlus dans cette optique sont présentées. Cet outil permet en effet de réaliser des simulations énergétiques d'un quartier et son pilotage aisé en langage Python facilite son intégration dans une méthode d'optimisation multi-objectifs. Les perspectives de développement de l'approche proposée sont esquissées, notamment en termes de prise en compte de l'aéroulque urbaine.

MOTS-CLÉS : simulation énergétique quartier, EnergyPlus, optimisation multi-objectifs, densification urbaine.

ABSTRACT. This paper focuses on the need for urban densification projects design aid tools. Some possibilities to use EnergyPlus software in this way are shown. Indeed, this tool enables to do district energy simulations and its easy control with Python language facilitates its incorporation in a multi-objective optimization method. Development prospects of the proposed approach are outlined, especially regarding the consideration of urban-scale aeroulc phenomena consideration.

KEYWORDS : district energy simulation, EnergyPlus, multi-objective optimization, urban densification.

1. INTRODUCTION

La population mondiale fait face, globalement, à une forte urbanisation. En effet, il est attendu que la part de population mondiale vivant dans des aires urbaines atteigne 66% en 2050, contre 30% en 1950 et 54% en 2014 (UN 2014). Cette urbanisation, fortement expansive, a des impacts néfastes sur la santé des humains et leur environnement, notamment à travers la destruction de forêts, de zones humides et de terres agricoles (Bhatta 2010).

La densification des zones urbaines existantes peut permettre de limiter cet étalement urbain. Néanmoins, venir combler les "dents creuses" présentes au sein des villes ou construire sur les toits risque d'accentuer l'effet d'îlot de chaleur urbain déjà bien présent au sein des aires urbaines denses (Bonhomme 2013). Cela pose aussi des problèmes d'accessibilité des bâtiments voisins à la ressource solaire, en diminuant leurs possibilités d'exploitation de cette ressource pour combler leurs besoins de chauffage et d'éclairage. Pour ces bâtiments existants, le potentiel de production d'énergies renouvelables via des systèmes intégrés au bâti peut lui aussi être pénalisé (Good et al. 2014).

L'intégration d'un nouveau bâtiment dans un quartier doit donc se faire en prenant en compte les interactions entre les bâtiments existants et le nouvel édifice. Afin d'évaluer les impacts de cette intégration en termes de performances énergétiques, bioclimatiques, voire environnementales, le comportement thermique dynamique de plusieurs bâtiments, leurs interactions et éventuellement le microclimat local doivent être simulés.

2. IDENTIFICATION ET CHOIX D'UN OUTIL ADAPTE AU BESOIN

2.1. OUTILS EXISTANTS

De nombreux outils ont été créés spécifiquement pour évaluer le potentiel solaire de bâtiments à l'échelle urbaine (Freitas et al. 2015). Certains logiciels permettent d'effectuer une simulation thermique dynamique (STD) d'un bâtiment en tenant compte des bâtiments voisins, mais ces derniers sont uniquement modélisés sous forme de masques solaires, ce qui ne permet pas de tenir compte des inter-réflexions entre bâtiments. C'est le cas de l'environnement logiciel Pléiades+COMFIE¹ et d'Ecotect² Analysis, maintenant intégré à Revit³. Un autre logiciel de STD, ArchiWizard, permet un calcul fin des masques solaires proches et lointains grâce à une mesure précise des apports solaires via la méthode de lancer de rayons, ou Ray-Tracing (Joseph et al. 2011).

Le logiciel Solene⁴ permet de calculer sur chaque face de chaque bâtiment d'un quartier le flux global incident qui provient du soleil ainsi que les inter-réflexions entre ces faces. En effet, le rayonnement solaire de courte longueur d'onde qui atteint le quartier est en partie réfléchi par le sol et par les parois des bâtiments, et ce phénomène peut s'avérer non-négligeable, particulièrement en milieu urbain (Bozonnet 2005). Solene permet aussi de réaliser un bilan radiatif en grandes longueurs d'onde sur chaque surface ; c'est-à-dire de prendre en compte les flux infrarouges émis et reçus par les façades des bâtiments ainsi que les échanges avec la voûte céleste. Le logiciel Solene micro-climat couple Solene et Code_Saturne⁵, outil de calcul de mécanique des fluides numériques (Morille et al. 2015), ce qui lui permet de prendre en compte l'aérodynamique urbaine lors de l'évaluation du bilan énergétique d'un bâtiment au sein d'un quartier.

CitySim⁶ est l'un des programmes de simulation urbaine les plus complets existants à ce jour. Il permet de simuler les flux d'énergie, d'eau et de déchets dans un contexte urbain, qui peut aller de quelques bâtiments à une ville en contenant plusieurs centaines de milliers. Le modèle thermique utilisé pour chaque bâtiment repose sur une analogie avec un circuit électrique Résistance-Condensateur. Un bilan radiatif complet à l'échelle urbaine est réalisé (Vermeulen 2014), à la fois en courte et grande longueurs d'onde comme décrit précédemment pour le logiciel Solene.

2.2. CARACTERISTIQUES ATTENDUES POUR UN OUTIL PERTINENT

L'étude complète des impacts de l'implantation d'un nouveau bâtiment au sein d'un îlot nécessite un outil permettant une modélisation précise du nouveau projet et une prise en compte fine de l'environnement urbain. Il s'agit non seulement de tenir compte de l'influence des bâtiments existants

¹ <http://www.izuba.fr/logiciel/pleiadescomfie>

² <http://usa.autodesk.com/ecotect-analysis/>

³ <http://www.autodesk.com/products/revit-family/overview>

⁴ <http://www.crenau.archi.fr/?q=fr/node/80>

⁵ <http://code-saturne.org/cms/features>

⁶ <http://citysim.epfl.ch/>

sur le bâtiment à implanter, mais aussi d'évaluer les conséquences de l'intégration du nouveau projet sur le bilan énergétique des bâtiments existants.

Par ailleurs, en conception de bâtiments neufs, atteindre un certain niveau de performance sur un critère (par exemple la minimisation des consommations énergétiques) implique souvent de pénaliser la qualité du projet vis-à-vis d'un autre critère, comme le coût de construction du bâtiment. A partir de ce constat, des travaux montrent dès le début des années 1980 l'intérêt de l'optimisation multicritères et de la description de surface de compromis pour soumettre aux décideurs un panel de bonnes solutions et mieux comprendre les liens entre les critères de décision (Gero et al. 1983). Il semble donc pertinent d'intégrer l'outil d'évaluation des impacts d'un projet de densification dans une méthode d'optimisation multicritères, ce qui nécessite que l'outil en question soit facilement paramétrable.

Il n'existe pas, à notre connaissance, de logiciel remplissant tous les critères cités dans les deux paragraphes précédents. Néanmoins, le logiciel américain de STD EnergyPlus⁷, gratuit et disposant d'une large communauté d'utilisateurs, est un candidat intéressant. Il permet le calcul des rayonnements de courte et grande longueurs d'onde reçus par les surfaces extérieures d'un bâtiment, en prenant en compte ceux provenant du soleil, des parois des bâtiments voisins, du sol et de la voûte céleste⁸. De plus, l'existence de la bibliothèque « Eppy » du langage de programmation Python facilite la manipulation de fichiers de description de la simulation et par conséquent les processus de simulation paramétrique ou d'optimisation. En revanche EnergyPlus est principalement utilisé pour la simulation d'un bâtiment, en tenant compte des bâtiments et de l'environnement proches sous la forme de masque solaire. Les études multi-bâtiments réalisées avec EnergyPlus rencontrées dans la littérature consistent à lancer en parallèle plusieurs simulations à l'échelle d'un bâtiment (Huber and Nytsch-Geusen 2011).

Nous présenterons donc dans cet article comment EnergyPlus peut être utilisé pour effectuer des simulations thermiques dynamiques à l'échelle d'un îlot urbain. Nous donnerons aussi un exemple d'intégration de cet outil dans une méthode d'optimisation multicritères avant de discuter des limites de notre approche, notamment en termes de prise en compte des phénomènes liés à l'aérodynamique urbaine, qui ne sont pas évalués par EnergyPlus.

3. MODELISATION ET SIMULATION ENERGETIQUE A L'ECHELLE QUARTIER AVEC ENERGYPLUS

3.1. MODELISATION DE L'ÎLOT

L'îlot urbain choisi pour cette étude est directement tiré d'un projet réalisé par des étudiants de l'Ecole nationale supérieure d'architecture de Versailles (ENSAV) au cours de l'année universitaire 2014/2015. Il s'agissait de concevoir le ou les bâtiment(s) à implanter sur un terrain libre au sein d'un ensemble de 19 bâtiments situé dans le quartier Ranzay de la ville de Nantes. Les étudiants ont proposé d'intégrer dans cet espace un ensemble de deux blocs de logements de 6,8 x 22m d'emprise au sol chacun, reliés entre eux par de grands plateaux de circulation à chaque étage. Par souci pratique on nommera ici « bâtiment 1 » le nouveau bâtiment situé du côté ouest de l'ensemble et haut de 4 étages, et « bâtiment 2 » le nouveau bâtiment situé du côté est de l'ensemble et haut de 7 étages, comme indiqué sur la figure 1.

⁷ <http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/pdfs/engineeringreference.pdf>

⁸ http://www.designbuilder.co.uk/helpv3/Content/Solar_Radiation_Distribution.htm

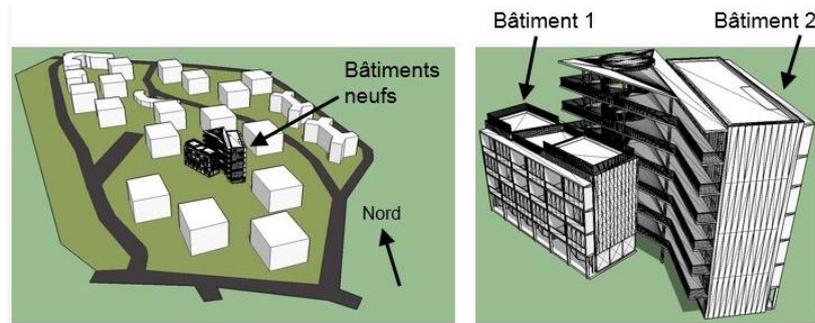


Figure 1 : maquettes du projet de densification au sein du site (à gauche) et seul (à droite), réalisées avec le logiciel SketchUp

A partir de ces maquettes et des informations fournies par l'ENSAV, nous avons tout d'abord modélisé le projet de densification avec le plug-in permettant d'intégrer le logiciel OpenStudio au logiciel SketchUp. Dans la suite de l'article ce modèle sera nommé « cas 1 ». Cet outil permet d'utiliser SketchUp comme interface graphique pour modéliser des bâtiments sous une forme directement compréhensible par le logiciel EnergyPlus. Nous avons ensuite modélisé les bâtiments existants, en nous limitant aux bâtiments les plus proches de ceux du projet pour limiter la complexité du modèle. Dans un premier temps, cet environnement urbain a été modélisé sous forme de masque solaire, tel que représenté sur la figure 2. Ce modèle sera nommé « cas 2 ».

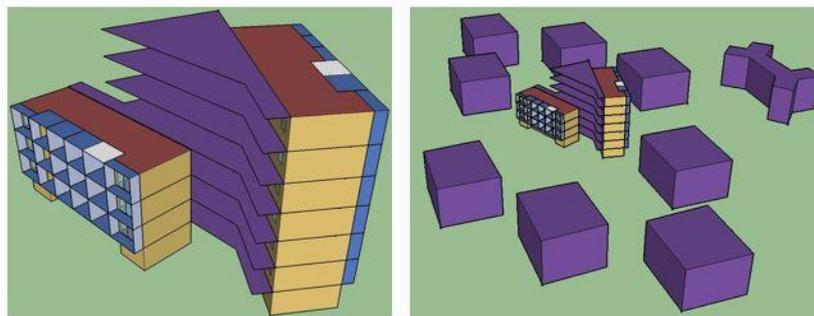


Figure 2 : maquettes des cas 1 (à gauche) et 2 (à droite), réalisées avec le plug-in OpenStudio

Les bâtiments 1 et 2 sont en béton, isolés par l'extérieur avec 20 cm d'isolant sur les murs extérieurs ainsi qu'en toiture et au niveau du plancher bas du premier étage, le rez-de-chaussée de chacun des deux bâtiments n'étant pas habité. Les surfaces vitrées sont composées de double vitrage avec gaz argon. La façade ouest du bâtiment 1 et la façade est du bâtiment 2 sont vitrées à 70%. Pour conserver la forme des plateaux de circulation qui relient les deux bâtiments et constituent d'importants masques solaires, nous avons représenté au niveau de chaque étage des casquettes qui ne sont liées à aucun des deux bâtiments. Chacune d'elle forme un masque solaire indépendant, tout comme chacun des bâtiments de l'environnement urbain modélisés dans le cas 2.

Dans un second temps, nous avons modélisé l'environnement urbain sous forme de bâtiments de logements. Les bâtiments de cette zone ayant bénéficié récemment d'une vaste opération de rénovation, nous avons considéré qu'ils sont eux aussi en béton avec 20 cm d'isolant sur les parois extérieures et en toiture. En revanche, le plancher bas du rez-de-chaussée de ces bâtiments, qui est habité, n'est pas isolé. Les surfaces vitrées ont la même composition que celles des bâtiments 1 et 2, et occupent 30% de la surface des murs extérieurs. Dans ce modèle multi-bâtiments, chacun des

bâtiments de l'environnement est composé de 4 étages de même hauteur et possède 4 zones thermiques, une par étage. Il s'agit du cas 3, dont la figure 3 donne un aperçu. Le cas 4 correspond au modèle du cas 3 sans les bâtiments 1 et 2, c'est donc un cas qui ne contient que l'environnement urbain constitué de bâtiments multizones.

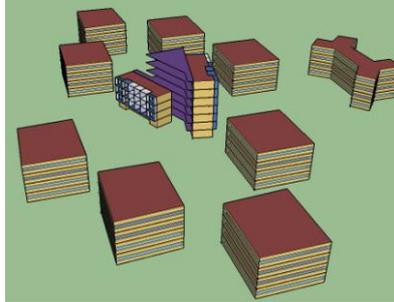


Figure 3: maquette du cas 3, réalisée avec le plug-in OpenStudio

3.2. RESULTATS DES SIMULATIONS EFFECTUEES

Des simulations thermiques dynamiques sous EnergyPlus ont été lancées à partir des modèles des 5 cas afin d'évaluer les interactions entre les bâtiments d'un projet de densification et l'environnement urbain existant. Les résultats obtenus sont des besoins annuels de chauffage et de climatisation. La comparaison des cas 1 et 2 montre que les écarts entre les bilans énergétiques réalisés sur des bâtiments avec et sans prise en compte de leur environnement urbain ne sont pas négligeables. En effet, le passage du cas 1 au cas 2 conduit à une augmentation des besoins de chauffage de 6,7% pour le bâtiment 1 et de 2,7% pour le bâtiment 2. Les besoins de climatisation subissent une diminution de 7,8% pour le bâtiment 1 et 3,4% pour le bâtiment 2. Le temps de simulation augmente peu entre les 2 cas : 2min 23s pour le cas 1, 2min 54s pour le cas 2.

Les comparaisons entre les cas 2 et 3 permettent d'estimer l'importance de la finesse de la modélisation physique de l'environnement urbain sur les résultats obtenus. Entre ces 2 cas, les besoins énergétiques des bâtiments 1 et 2 sont quasiment identiques, mais le temps de calcul augmente car il est de 5min 10s pour le cas 3. Si l'objectif est uniquement d'évaluer précisément le bilan énergétique des bâtiments neufs en prenant en compte les bâtiments voisins, il semble donc préférable de modéliser ces derniers comme de simples masques solaires. En revanche, l'affectation de zones thermiques aux bâtiments de l'environnement urbain permet d'estimer l'impact de la densification sur leur bilan énergétique. En comparant les cas 3 et 4, on observe que l'implantation des bâtiments 1 et 2 provoque une augmentation de 1.4% des besoins de chauffage totaux des bâtiments existants, et une diminution de 2.6% de leurs besoins de climatisation. En se focalisant sur le bâtiment existant le plus proche du bâtiment 1, situé au nord-ouest de ce dernier, l'impact de la densification est plus net : les besoins de chauffage augmentent de 5.3%.

L'étape suivante serait la comparaison entre deux cas similaires aux cas 3 et 4, avec un niveau de complexité de modélisation supérieur, qui tiendrait compte de la modification de l'aérodynamique urbaine induite par l'intégration des nouveaux bâtiments au sein de l'îlot.

4. OPTIMISATION MULTI-OBJECTIFS A L'ECHELLE D'UN BATIMENT

4.1. CAS D'ETUDE

Le cas d'étude choisi ici est volontairement simple afin de limiter les temps de simulation et de pouvoir tester rapidement la méthode d'optimisation. Il s'agit de minimiser les consommations énergétiques d'une pièce de bureau, constituée d'une seule zone thermique et dont la seule paroi déperditive est la façade sud. Les variables du problème d'optimisation sont la position et la taille de la surface vitrée ainsi que d'une casquette horizontale. Afin de pouvoir présenter les résultats sous forme de fronts de Pareto, on se limite à deux objectifs à minimiser : la somme des besoins de climatisation et d'éclairage annuels d'un côté, les besoins annuels de chauffage de l'autre.

4.2. METHODE

Les algorithmes génétiques sont largement utilisés dans des problèmes d'optimisation de la conception de bâtiments (Machairas et al. 2014). Parmi ces algorithmes, la méthode d'optimisation la plus communément adoptée (Lu et al. 2015) pour résoudre des problèmes multi-objectifs est l'algorithme génétique élitiste de tri non-dominé NSGA-II. Nous avons donc choisi de l'utiliser. Cette décision a été facilitée par l'existence de l'algorithme NSGA-II codé en langage Python au sein de l'environnement DEAP (Distributed Evolutionary Algorithms in Python) développé en 2009 à l'Université Laval (Fortin et al. 2012). En effet, le langage Python répond bien à notre besoin d'un outil générique de pilotage de logiciels spécialisés, qui permette à la fois d'automatiser le lancement de STD et le traitement des résultats ainsi que de modifier des paramètres du modèle. Nous avons donc adapté l'algorithme NSGA-II de DEAP à l'optimisation multi-objectifs de la conception d'un bâtiment. Grâce à la bibliothèque "Eppy" de Python, au cours du processus d'optimisation une STD est lancée sous EnergyPlus pour chaque nouvel individu créé et les résultats de cette simulation sont récupérés pour évaluer les performances de l'individu.

4.3. RESULTATS

La figure 4 présente un exemple de résultats obtenus avec cette méthode d'optimisation. Toutes les solutions obtenues sont quasi-optimales vis-à-vis des objectifs fixés. La diversité des solutions obtenues permet de laisser un réel choix à l'équipe de conception du projet, tout en lui fournissant des informations concrètes sur les conséquences de leurs décisions.

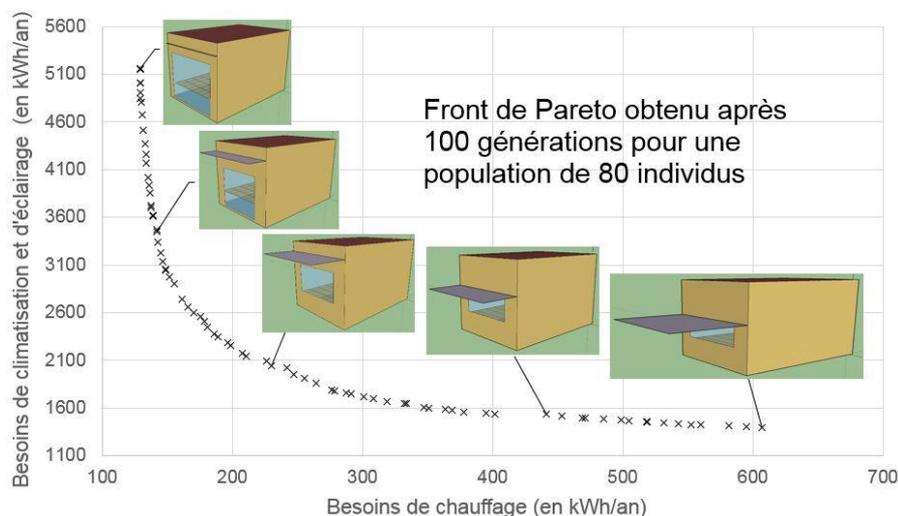


Figure 4 : résultats obtenus pour la minimisation des besoins énergétiques d'une pièce de bureau

5. CONCLUSION

L'urbanisation expansive de la population mondiale incite à densifier les aires urbaines existantes, mais une opération de densification peut avoir de nombreuses conséquences négatives. Il n'existe pas, à l'heure actuelle, d'outil d'aide à la décision permettant d'évaluer précisément les impacts de tels projets et d'en rendre compte à l'équipe de conception pour qu'elle puisse prendre des décisions en connaissance de cause. Par ailleurs, les bureaux d'études, urbanistes et architectes vont évaluer la pertinence d'un projet selon certains critères qui dépendent de leur expérience professionnelle et ne sont pas quantifiables. Ces critères peuvent être pris en compte en laissant ces décideurs choisir parmi un ensemble diversifié de solutions équivalentes. C'est ce que permet l'optimisation multi-objectifs par algorithme génétique.

L'application d'une telle méthode d'optimisation à l'intégration d'un nouveau bâtiment au sein d'un îlot requiert un outil de STD dont la récupération des données de sortie et la modification des données d'entrée soient automatisables. C'est le cas du logiciel EnergyPlus, aisément pilotable avec le langage Python, qui dispose aussi d'algorithmes génétiques bien documentés. L'outil de simulation doit permettre d'évaluer les interactions entre le projet de densification et l'environnement urbain existant. EnergyPlus est performant en termes de calcul de rayonnements de courte et grande longueurs d'onde, en prenant en compte les inter-réflexions entre bâtiments. Néanmoins, il est généralement utilisé pour étudier un bâtiment, en prenant en compte les bâtiments voisins sans pour autant étudier leur comportement thermique. L'étude réalisée ici montre qu'il est possible de modéliser un îlot urbain avec OpenStudio puis de le simuler sous EnergyPlus. Ce logiciel peut ainsi être utilisé pour quantifier l'impact de l'environnement urbain sur les bâtiments neufs, et inversement.

EnergyPlus a aussi été utilisé pour optimiser la conception d'une façade d'une pièce de bureau avec l'algorithme génétique NSGA-II de l'environnement DEAP, sous Python. En calculant l'hypervolume de la population à chaque génération on observe une convergence de l'algorithme à partir de 60 générations environ, pour une population de 80 individus, ce qui représente 4800 simulations. Pour ce cas, une simulation est réalisée en 5 s, ce qui représente près de 7 h pour réaliser 4800 simulations. Parmi les modèles multi-bâtiments, le cas 1 est simulé en un peu plus de 2 min ce qui montre que l'optimisation de la conception des bâtiments neufs serait déjà lourde en temps de calcul. La simulation du cas 3 s'effectue en 5 min environ. Ainsi, la prise en compte de l'environnement urbain sous sa forme la plus détaillée augmente considérablement le temps de calcul. Elle fournit néanmoins une estimation intéressante de l'impact du projet de densification sur le bilan énergétique des bâtiments existants. Pour l'application de la méthode d'optimisation testée ici à la conception d'un projet de densification nous allons donc devoir arbitrer entre le niveau de description de l'environnement urbain, la pertinence des résultats obtenus et le temps de calcul nécessaire pour les obtenir.

Enfin, l'intégration de nouveaux bâtiments dans un îlot modifie le micro-climat urbain dans toutes ses composantes, y compris en termes d'écoulement du vent. Ce type de phénomène n'est pas pris en compte dans EnergyPlus. Un couplage entre un outil de STD facilement paramétrable et un outil d'évaluation thermo-aéraulique du micro-climat urbain, comme Solene micro-climat, permettrait donc d'évaluer de façon plus complète les impacts potentiels d'une opération de densification. C'est la démarche qui est mise en œuvre dans le projet ANR MERUBBI (Méthode d'Exploitation des Ressources Utiles du Bâtiment Bioclimatique dans son Ilot).

6. BIBLIOGRAPHIE

- Bhatta, Basudeb. 2010a. *Analysis of Urban Growth and Sprawl from Remote Sensing Data*. Advances in Geographic Information Science. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. <http://link.springer.com/10.1007/978-3-642-05299-6>.
- Bonhomme, Marion. 2013. “Contribution À La Génération de Bases de Données Multi-Scalaire et Évolutive Pour Une Approche Pluridisciplinaire de L'énergie Urbaine.” Toulouse, INSA. http://lra.toulouse.archi.fr/lra/productions/theses-et-hdr-soutenues/theses-soutenues/Marion_Bonhomme.
- 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. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00011115>.
- Fortin, Félix-Antoine, François-Michel De Rainville, Marc-André Gardner, Marc Parizeau, and Christian Gagné. 2012. “DEAP: Evolutionary Algorithms Made Easy.” *Journal of Machine Learning Research* 13 (July): 2171–2175.
- Freitas, S., C. Catita, P. Redweik, and M. C. Brito. 2015. “Modelling Solar Potential in the Urban Environment: State-of-the-Art Review.” *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 41 (January): 915–31. doi:10.1016/j.rser.2014.08.060.
- Gero, John S., Neville D'Cruz, and Antony D. Radford. 1983. “Energy in Context: A Multicriteria Model for Building Design.” *Building and Environment* 18 (3): 99–107. doi:10.1016/0360-1323(83)90001-X.
- Good, Clara Stina, Gabriele Lobaccaro, and Siri Hårklau. 2014. “Optimization of Solar Energy Potential for Buildings in Urban Areas – A Norwegian Case Study.” *Energy Procedia*, Renewable Energy Research Conference, RERC 2014, 58: 166–71. doi:10.1016/j.egypro.2014.10.424.
- Huber, Jörg, and Christoph Nytsch-geusen. 2011. “Development of Modeling and Simulation Strategies for Large-Scale Urban Districts.” In *IBPSA 2011*, 1753–60. Sydney.
- Joseph, David, Delfin Braga, Jean-Patrick Rocchia, Edouard Gengembre, Antoine Thuillier, Bruno Ladevie, and Jean-Jacques Beziau. 2011. “Calcul Des Flux Solaires Pour Le Bâtiment Par Méthode de Ray-Tracing.” In . Perpignan.
- Lu, Yuehong, Shengwei Wang, Yang Zhao, and Chengchu Yan. 2015. “Renewable Energy System Optimization of Low/zero Energy Buildings Using Single-Objective and Multi-Objective Optimization Methods.” *Energy and Buildings* 89 (February): 61–75. doi:10.1016/j.enbuild.2014.12.032.
- 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.
- Morille, Benjamin, Nicolas Lauzet, and Marjorie Musy. 2015. “SOLENE-Microclimate: A Tool to Evaluate Envelopes Efficiency on Energy Consumption at District Scale.” In *IBPC 2015*. Turin, Italy.
- Nguyen, Anh-Tuan, Sigrid Reiter, and Philippe Rigo. 2014. “A Review on Simulation-Based Optimization Methods Applied to Building Performance Analysis.” *Applied Energy* 113 (January): 1043–58. doi:10.1016/j.apenergy.2013.08.061.
- United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division. 2014. “World Urbanization Prospects: The 2014 Revision, Highlights.”
- Vermeulen, Thibaut. 2014. “Optimisation de Formes Urbaines Soumises Au Rayonnement Solaire.” Compiègne. <http://www.theses.fr/2014COMP2142>.

Modélisation dédiée des conditions limites aérauliques des bâtiments : impact sur la prédiction des besoins énergétiques

Lucie Merlier^{*1,2,3}, Frédéric Kuznik^{1,2}, Gilles Rusaouën¹, Julien Hans³

¹ CETHIL UMR 5008 CNRS INSA de Lyon, Univ. Lyon1, Univ. de Lyon
9, rue de la Physique, Campus de la Doua Lyon Tech, 69 621 Villeurbanne cedex

² Laboratoire BHEE (Bâtiment à haute efficacité énergétique)
Laboratoire commun CETHIL / EDF

³ CSTB, Direction énergie et environnement
24, rue Joseph Fourier, 38 400 Saint Martin d'Hères

*lucie.merlier@insa-lyon.fr

RESUME. Afin d'évaluer l'erreur potentielle induite par l'application d'approches standard pour prédire les besoins énergétiques des constructions, cette communication présente une étude de dynamique des fluides numérique (CFD) détaillée visant à évaluer l'impact des conditions aérauliques extérieures locales sur les sollicitations énergétiques des bâtiments en fonction de leur environnement bâti. Après validation des modèles aérodynamique et thermique, les distributions des C_p et $h_{c,w}$ sont estimées pour un bâtiment cubique isolé ou situé dans un milieu urbain théorique. La demande énergétique liée aux infiltrations d'air et à la transmission de chaleur au travers de l'enveloppe est estimée et comparée aux valeurs obtenues en suivant une approche standard, et ce, pour un bâtiment neuf ou ancien. Les résultats sont discutés en termes de limites des approches standard mais également des approches CFD.

MOTS-CLÉS. Dynamique des fluides numérique, Infiltrations d'air, Échanges convectifs extérieurs, Demande énergétique des bâtiments.

ABSTRACT. To assess uncertainties linked with the use of standard approaches to predict building energy demand, the current paper develops a detailed computational fluid dynamic study. This approach highlights the impact of the aerodynamic conditions around constructions on their energy balance depending on their built environment. After validating the aerodynamic and thermal models, C_p and $h_{c,w}$ distributions are estimated for a building that is isolated or located in a theoretical urban environment. These computational data provide the basis to estimate the building energy demand due to air infiltration or heat transmission through its envelope, and to discuss estimations based on a standard approach, in cases of an old or new building. Results are especially discussed in terms of the limitations of standard and CFD approaches.

KEYWORDS. Computational Fluid Dynamics, Air infiltration, External convective heat transfer, Building energy demand.

INTRODUCTION

Le comportement énergétique des bâtiments en phase de service diffère souvent considérablement des estimations réalisées lors de sa conception. Le comportement énergétique du bâtiment dépend non seulement de ses usages, systèmes et propriétés intrinsèques, mais également de son environnement proche (Allegrini et al., 2012; Bouyer et al., 2011). La connaissance incertaine de l'influence de ces facteurs sur les besoins énergétiques de bâtiments devient problématique dans le contexte actuel de développement durable et de la multiplication des certifications relatives à la performance énergétique des constructions.

Afin d'évaluer l'erreur potentielle induite par l'application d'approches standard pour prédire les besoins énergétiques des bâtiments, et en parallèle des études à base expérimentale effectuées en vue de garantir les performances énergétiques des constructions (Thébault and Bouchié, 2015), cette communication présente une étude numérique détaillée de mécanique des fluides (CFD) visant à déterminer les coefficients de pression (C_p) et d'échange convectif ($h_{c,w}$) sur les façades de bâtiments types localisés en site ouvert ou bâti. Pour ce faire, les validations des modèles aérodynamique et thermique sont rapportés en partie 1 et l'évaluation des C_p et $h_{c,w}$ sur les façades extérieures de constructions théoriques est présentée en partie 2. L'estimation de la demande énergétique due aux infiltrations d'air et transmission de chaleur au travers de l'enveloppe de bâtiments récents ou anciens est développée et comparée aux estimations couramment obtenues suivant un approche réglementaire en partie 3. La dernière partie de cette communication reprend les principaux enseignements de l'étude et met l'approche développée en perspective.

1 VALIDATION DES MODÈLES AÉRODYNAMIQUE ET THERMIQUE

La validation des modèles aérodynamique et thermique est ici résumée afin de préciser le domaine de validité de l'étude. Les différentes phases de la validation des modèles sont détaillées dans Merlier (2015); Merlier et al. (2015).

1.1 VALIDATION DU MODÈLE AÉRODYNAMIQUE

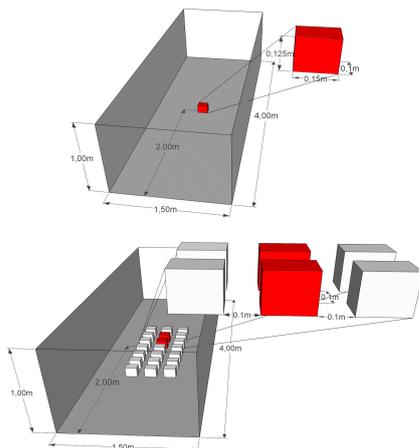


FIGURE 1. Cas A1-1 et B1-1

Afin d'évaluer les incertitudes du modèle CFD pour l'étude de écoulements d'air autour d'obstacles à angles saillants, des configurations tests ont été modélisées et comparées à des données expérimentales obtenues en soufflerie issues de la base CEDVAL^a (CEDVAL, 2013). Suivant les recommandations de la littérature, les configurations considérées sont un obstacle isolé (cas A1-1) et un réseau d'obstacles (cas B1-1, Fig. 1). Pour comparaison, ces configurations ont été également modélisées de façon détaillée grâce à la méthode de Boltzmann sur gaz réseau, avec une simulation aux grandes échelles (LBM-LES) (Obrecht et al., 2011, 2015). Cependant, ces simulations considéraient un sol lisse.

^a. Compilation of experimental data for the validation of dispersion models

L'approche numérique implémentée dans ce travail repose sur l'utilisation de modèles de type "steady RANS", et l'utilisation du logiciel Ansys Fluent version 14.5 et 15 (Ansys Fluent, 2013). Le domaine modélisé reproduit autant que possible la section de test de la soufflerie utilisée pour l'expérience en termes de dimensions et de conditions aux limites. En particulier, le sol est considéré rugueux, et le profil de vent d'entrée est déterminé par simulation préliminaire d'un

long tunnel vide présentant les mêmes conditions aux limites (sauf d'entrée) que le modèle de la section de test.

Deux modèles de turbulence ont été évalués : le modèle $k-\varepsilon$ réalisable, qui suppose des effets isotropes de la turbulence sur le champ d'écoulement moyen, et le modèle aux tensions de Reynolds (RSM) qui prend en compte des effets anisotropiques de la turbulence. Des fonctions de paroi standard modélisent le comportement du fluide proche des parois et les limites latérales et haute du domaine sont supposées lisses et non glissantes. Une condition de gradients longitudinaux nuls est spécifiée en sortie du domaine et les parois des obstacles sont supposées lisses. La convergence des simulations a été considérée atteinte lorsque des profils de vitesse moyenne choisis dans le domaine ne variaient plus en fonction du nombre d'itérations. L'exploitation des résultats a été effectuée pour le plan de symétrie du domaine et entre le cinquième et le sixième pavé pour le cas multi-obstacle.

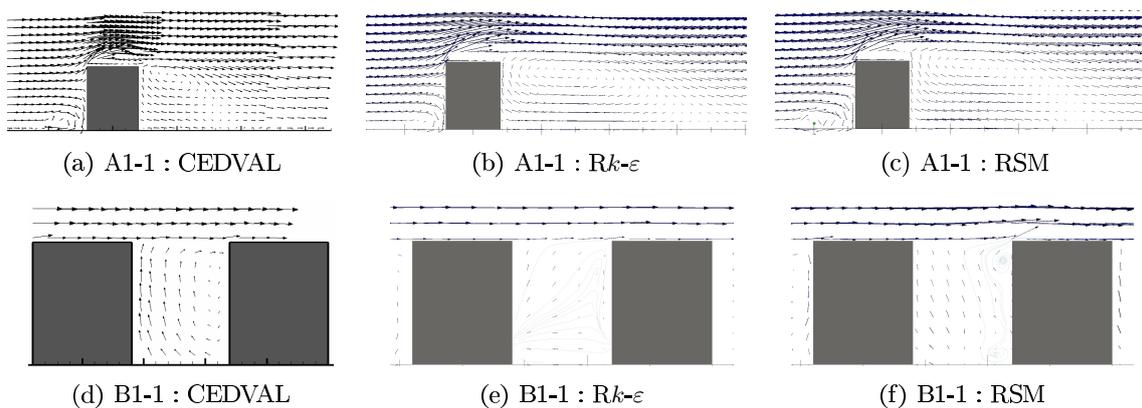


FIGURE 2. Validation aérodynamique : comparaison des champs d'écoulement moyen

Les deux modèles de turbulence testés reproduisent les trois recirculations principales qui se développent devant au dessus et derrière de l'obstacle isolé (Fig. 2 (a),(b),(c)). En comparaison avec l'expérience, le modèle $Rk-\varepsilon$ reproduit plus précisément les recirculations amont et supérieures, tandis que le RSM prédit de façon plus précise, mais toujours largement surévaluée, la recirculation avale. Les prédictions du modèles RSM sont également généralement plus proches de celles du modèle LBM LES, en considérant un sol lisse (non représenté ici).

Le cas multi-obstacle montre quant à lui un comportement plus réaliste du modèle RSM que du $Rk-\varepsilon$: seul le modèle RSM reproduit la recirculation se développant dans le canyon (Fig. 2 (d), (e), (f)). Cependant, les profils de vitesse à l'intérieur du canyon ne stabilisent pas en fonction du nombre d'itérations, mais varient de manière périodique. Ceci peut être expliqué par l'instabilité des recirculations soulignée dans la documentation expérimentale, et met en question l'utilisation courante de méthodes de type steady RANS pour l'étude de phénomènes fortement transitoires. Cependant, étant capable de reproduire les principaux phénomènes physiques, même si de façon imprécise, le modèle RSM a été retenu pour la suite de l'étude.

1.2 VALIDATION DU MODÈLE THERMIQUE

Afin d'étudier la capacité du modèle de turbulence à reproduire les échanges de chaleur par convection aux façades de bâtiments, une première étude a été réalisée pour un petit cube placé dans une soufflerie (Meinders et al., 1999). Les dimensions du modèle permettent l'utilisation d'un modèle bas Reynolds (LRNM) pour le traitement proche paroi. Ce modèle nécessite de considérer de très fines mailles près des parois mais permet la résolution des équations jusqu'à celles-ci. Ce cas expérimental a aussi servi de référence à Defraeye et al. (2011) pour évaluer la performance d'un modèle CFD (steady RANS $Rk-\varepsilon$ +LRNM). Ainsi, la méthodologie suivie pour modéliser ce cas d'étude est la même que celle détaillée par Defraeye et al. (2011) et évalue les performances des modèles $Rk-\varepsilon$ et RSM (Fig. 3).

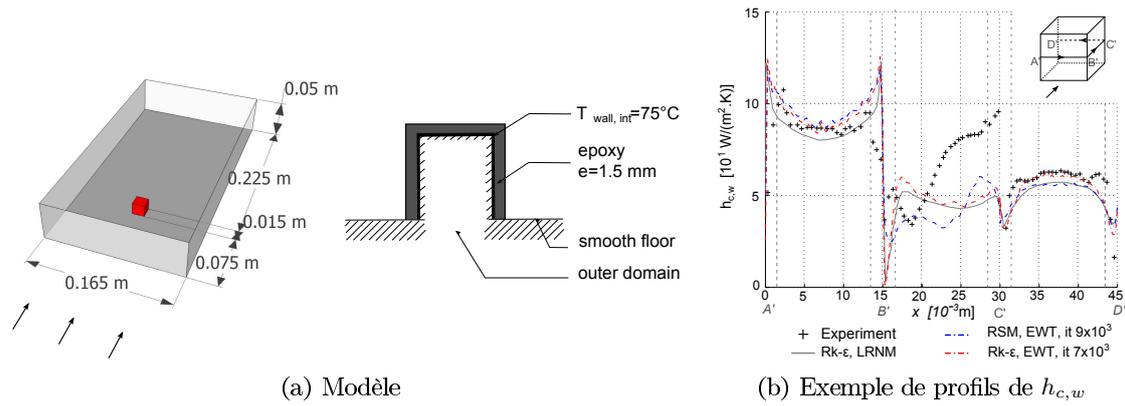


FIGURE 3. Validation du modèle thermique : modèle de turbulence

Les prédictions apparaissent satisfaisantes pour les faces avant et arrière du cube, quel que soit le modèle de turbulence considéré. Les résultats sur les autres faces diffèrent des résultats expérimentaux et entre eux. Si le modèle RSM semble mieux reproduire les variations des profils de $h_{c,w}$, il sous-estime notablement leur intensité et les profils ne se stabilisent pas en fonction du nombre d'itérations sur les faces latérales. Ce phénomène s'observe là encore où l'expérience rapporte un comportement fortement instationnaire de l'écoulement.

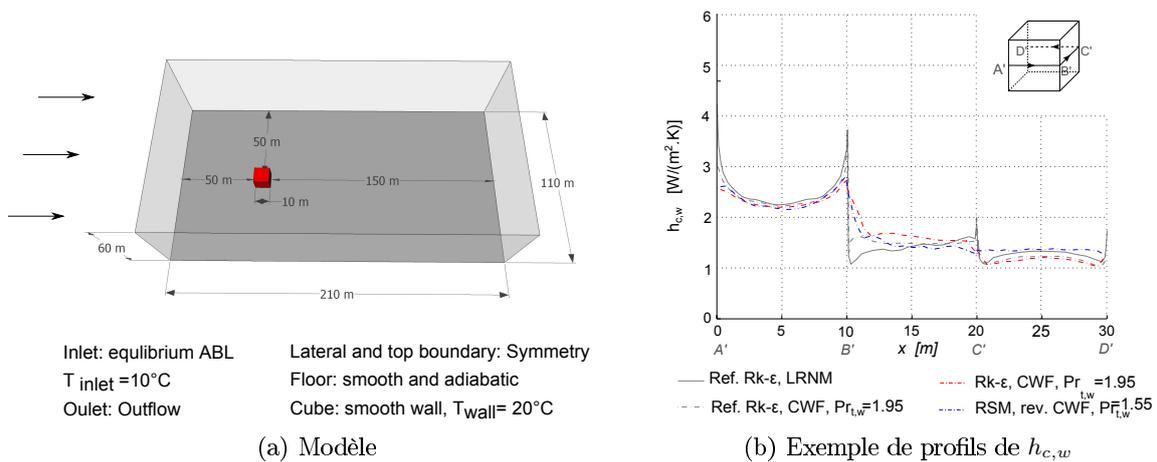


FIGURE 4. Validation du modèle thermique : fonctions de parois pour la température

Comme il n'est en général pas possible de développer une approche bas Reynolds pour des problématiques liées au bâtiment, la validité des fonctions de paroi a été évaluée. Celles-ci permettent d'utiliser des mailles relativement larges mais considèrent généralement un comportement logarithmique de la couche limite et des variables associées, ce qui n'est souvent pas pertinent pour ce qui concerne les transferts thermiques. Aussi, le cas d'un cube de 10 m placé dans une couche limite a été considéré (Fig. 4), pour lequel Defraeye (2009) rapporte des profils de $h_{c,w}$ issus d'un modèle bas Reynolds sur les faces avant et arrière, et pour des vitesses de vent de 0.5 et 5 m · s⁻¹.

L'utilisation des fonctions de paroi standard au lieu d'une approche bas Reynolds conduit à une surestimation des $h_{c,w}$, quel que soit le modèle de turbulence testé (non représenté ici). Ceci confirme les résultats de la littérature (Blocken et al., 2009; Defraeye et al., 2011). L'utilisation de fonctions de parois modifiées pour la température ($Pr_{t,w}=1.95$ au lieu de 0.85 par défaut dans le logiciel) améliore considérablement la précision des résultats obtenus avec le modèle $Rk-\epsilon$, pour lequel cette modification a été originalement développée par Defraeye et al. (2011). Pour le modèle RSM, une bonne correspondance est atteinte avec $Pr_{t,w}=1.55$ sur la face avant, et dans une légère moindre mesure sur la face arrière. Permettant d'obtenir des résultats satisfaisants sur ces faces tout en conservant un maillage raisonnable, cette modification des fonctions de paroi pour la température a été retenue pour la suite de l'étude.

2 DÉTERMINATION DES C_p ET $h_{c,w}$

2.1 MODÈLE ET CHAMPS AÉRODYNAMIQUES

Les principaux résultats de la phase de validation des modèles aérodynamique et thermique ont été mis à profit pour les études de cas finales. Le profil de vent incident a été modélisé par simulation préliminaire d'un tunnel vide de 10 km au sol rugueux, comme pour les modélisations principales. La vitesse de vent à 10 m est $U_{10} = 4.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Le modèle de turbulence utilisé est le modèle RSM, les tailles des domaines et de maillage ainsi que les conditions aux limites respectent les recommandations de la littérature (Tominaga et al., 2008). Les fonctions de parois modifiées pour la température sont utilisées. Aucun rayonnement ni phénomène de flottabilité n'est pris en compte. Afin de modéliser des parois de bâtiment, un coefficient d'échange convectif intérieur équivalent d' $1 \text{ W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K})$ est spécifié dans le modèle et une différence de température de 5°C entre l'intérieur et l'extérieur est imposée.

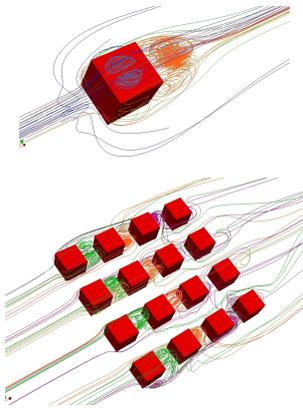


FIGURE 5. Résultats aérodynamiques

Les cas d'étude considérés sont un cube isolé et un réseau régulier de 4×4 cubes de 10 m placés perpendiculairement au vent incident. Pour ce dernier cas, les cubes médians situés en troisième ligne sont considérés pour l'exploitation des résultats.

Les résultats de simulations mettent en évidence les différences de champs de vitesse moyenne autour des constructions entre une configuration isolée ou non (voir Fig. 5). Si les recirculations se développant autour des cubes de la ligne de tête du réseau ressemblent à celle observées pour la cas du cube isolé, des recirculations plus complexes et floues se développent au sein du réseau de cubes. Cet environnement est notamment caractérisé par des vitesses de vent relativement faibles dues à la présence de masques aérodynamiques.

2.2 COMPARAISON DES C_p ET $h_{c,ext}$ SIMULÉS OU STANDARD

A partir des champs de vitesse moyenne simulés, il est possible de calculer directement les valeurs de C_p et $h_{c,w}$ sur les façades des constructions grâce aux formules suivantes :

$$C_p = \frac{P - P_{ref}}{0.5 \times \rho \times U_H^2} \quad h_{c,w} = \frac{q_{c,w}}{T_w - T_{ref}} \quad (1)$$

Cependant, l'évaluation usuelle de la performance énergétique des bâtiments repose généralement sur les méthodes énoncées dans les règles ThBCE et ThU annexées à la RT2012 (CSTB, 2012a,b). Ces règles proposent une distribution conventionnelle des C_p sur les façades¹ et une formulation pour les $h_{c,w}$ telle que $h_{c,w} = 4 + 4 \times U_{loc}$. U_{loc} étant généralement inconnue, U_{10} est utilisée, ce qui conduit à une répartition uniforme des $h_{c,w}$ sur les façades des constructions. Afin d'évaluer les différences entre les résultats des simulation et les valeurs standard, le tableau 1 compare les différentes valeurs de C_p et $h_{c,w}$ pour des deux cas d'étude mentionnés plus haut.²

La distribution conventionnelle des C_p diffère des valeurs simulées pour deux raisons principales. Premièrement, une face latérale est supposée au vent (valeur positive de C_p) alors que les deux faces latérales sont en dépression pour cette incidence particulière de vent d'après les simulations. Les valeurs standard des C_p font également toujours l'hypothèse de valeurs positives de

1. La distribution conventionnelle des C_p est indépendante de la direction du vent et suppose que la moitié des façades de bâtiments parallélépipédiques est au vent et l'autre moitié sous le vent, et que les bâtiments sont en configuration ouverte, normale ou écrantée.

2. Pour le cube non isolé, les valeurs standard sont prises en configuration normale.

cas		avant	arriere	cote	dessus	cas		avant	arriere	cote	dessus
Cube isolé											
Cp	ThBCE	0.5	-0.7	-0.7/0.5	-0.7	$h_{c,w}$	ThU	21.2	21.2	21.2	21.2
	Simu	0.52	-0.24	-0.54	-0.63		Simu	16.8	7.7	11.2	13.1
Cube non isolé											
Cp	ThBCE	0.25	-0.50	-0.5/0.25	-0.6	$h_{c,w}$	ThU	21.2	21.2	21.2	21.2
	Simu	-0.23	-0.31	-0.30	-0.34		Simu	9.7	4.7	7.6	9.9

TABLE 1: Comparaison des Cp [-] et $h_{c,ext}$ [$W \cdot m^2 \cdot K^{-1}$] simulés ou standard

Cp sur la moitié des faces verticales du cube non isolé alors que toutes les faces sont caractérisées par un Cp négatif d'après la simulation. Ainsi, les différences de Cp entre les faces du cube sont généralement plus importantes lorsqu'elles sont caractérisées à l'aide des valeurs indiquées par la réglementation que lorsqu'elles sont estimées par simulation.

En ce qui concerne les valeurs de $h_{c,w}$, elles sont surestimées lorsque les règles ThU sont interprétées avec U_{10} par rapport aux résultats de simulation. La valeur constante de $h_{c,w}$ estimée à partir de U_{10} est entre 1.25 et 4.5 fois plus importante que celle simulée. Les plus grandes différences s'observent logiquement pour les faces abritées du vent.

3 COMPARAISON DES DEMANDES ÉNERGÉTIQUES ESTIMÉES À PARTIR DES RÉSULTATS DE SIMULATION OU DES VALEURS STANDARD

3.1 MÉTHODE D'ESTIMATION DE LA DEMANDE ÉNERGÉTIQUE

Les infiltrations d'air sont estimées à partir de la démarche développée dans les règles Th BCE. En considérant un débit d'infiltration uniforme par face de l'enveloppe suivant une loi de puissance ($Q_{\Delta P} = \pm A \times K \times |Cp \times (0.5 \rho U_{10}^2) - P_{int}|^{2/3}$), un bilan de masse est calculé sur la base des Cp simulés ou standard. Le débit d'infiltration total alors connu en supposant P_{int} constant, la demande énergétique est calculée pour une différence de température de 10 °C suivant la formule suivante : $E_{inf} = \rho \times Q_{inf} \times c_{air} \times \Delta T$. Cette estimation est faite pour un bâtiment dont toutes les faces sont homogènes et respectant les obligations de la RT 2012 en termes d'étanchéité à l'air, ou pour un bâtiment cinq fois plus perméable.

De façon analogue, la demande énergétique due à la transmission d'air au travers de l'enveloppe est calculée grâce au bilan thermique des bâtiments théoriques calculé sur la base des $h_{c,w}$ simulés ou standard. Les transferts thermiques sont supposés uniquement unidirectionnels et l'enveloppe uniforme et opaque. L'intérieur de constructions est considérée à 20 °C et l'extérieur à 10 °C. L'enveloppe est supposée constituée de 15 cm de béton ($\lambda = 1.5 W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$) et 12,5 cm d'isolant ($\lambda = 0.05 W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$) ou juste de béton. Les coefficients d'échanges radiatifs superficiels et convectifs intérieurs sont pris égaux à ceux indiqués par les règles ThU.

3.2 COMPARAISON DE LA DEMANDE ÉNERGÉTIQUE LIÉES AUX INFILTRATIONS D'AIR ET À LA TRANSMISSION DE CHALEUR AU TRAVERS DE L'ENVELOPPE

Le tableau 2 compare les demandes énergétiques, par unité de surface de plancher, estimées sur la base des valeurs standard ou simulées de Cp et $h_{c,w}$ dues aux infiltrations d'air (E_{inf}) et à la transmission de chaleur (E_{conv}) au travers de l'enveloppe. Les résultats sont différenciés en fonction de la performance de l'enveloppe (étanche à l'air / isolée thermiquement ou non) et en considérant que toutes les parois sont actives ou seulement les faces perpendiculaires au vent.³

3. Sélectionner ces faces diminue l'influence de l'hypothèse retenue par la distribution conventionnelle des Cp et sont celles pour lesquelles le modèle thermique a été validé.

cas		Perf		non Perf		cas		Perf		non Perf	
		5faces	2faces	5faces	2faces			5faces	2faces	5faces	2faces
Cube isolé											
E_{inf}	ThBCE	2.31	0.97	11.56	4.87	E_{conv}	ThU	6.05	2.42	65.7	25.6
	Simu	1.53	0.71	7.66	3.59		Simu	6.00	2.39	60.5	23.6
	diff	-34	-26	-34	-26		diff	-0.8	-0.9	-7.9	-8.1
Cube non isolé											
E_{inf}	ThBCE	1.74	0.71	8.69	3.56	E_{conv}	ThU	6.05	2.42	65.7	25.7
	Simu	0.23	0.16	1.17	0.80		Simu	5.96	2.38	56.8	21.8
	diff	-87	-78	-87	-78		diff	-0.9	-1.7	-15.6	-15.0

TABLE 2: Comparaison des E_{inf} [$W \cdot m^{-2}$] et E_{conv} [$W \cdot m^{-2}$] simulés ou standards

Le recours à une modélisation détaillée conduit à des estimations de besoins énergétiques plus faibles qu'estimées en interprétant les méthodes réglementaires pour les cas étudiés. La différence relative entre les estimations est considérable pour ce qui concerne E_{inf} . La différence relative est majeure en site protégé ($\sim 80\%$). Cependant, pour un bâtiment neuf ou ancien, les besoins dus aux infiltrations sont généralement d'un ordre de grandeur inférieurs à ceux dus à la transmission de chaleur. Si les différences de E_{conv} sont négligeables pour un bâtiment bien isolé du fait de la faible sensibilité du résultats à la résistance thermique de surface, une différence relative de 8 à 15% est observée pour le cas non isolé. Cette différence n'est pas négligeable et est de l'ordre de l'influence des fenêtres sur les pertes de chaleur d'une maison traditionnelle non isolée (Ademe, 2016).

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

L'étude décrite dans cette communication a consisté en la mise en place d'une approche numérique détaillée pour estimer les conditions de pression et convectives sur les façades de bâtiments idéaux localisés en site ouvert ou en milieu urbain théorique, pour une vitesse et direction de vent données. L'influence de ces conditions particulières sur les besoins énergétiques dus aux infiltrations d'air et transmission de chaleur au travers d'une enveloppe supposée opaque et uniforme ont été estimées pour une différence de température de $10^\circ C$, et comparées aux estimations couramment faites par interprétation des valeurs standard de Cp et $h_{c,w}$ données en annexe de la RT2012. Des enveloppes performantes ou déperditives ont été considérées. Les résultats mettent en évidence une forte incertitude relative des estimations de E_{inf} liée au choix des valeurs de Cp , spécialement pour les bâtiments protégés du vent. Les besoins dus à la transmission de chaleur sont cependant estimés prépondérants, même si relativement moins sensibles à la valeur de $h_{c,w}$ considérée. L'incertitude sur E_{conv} liée au choix des valeurs de $h_{c,w}$ est néanmoins significative pour des bâtiments non isolés thermiquement.

Les résultats de cette étude montrent donc la valeur ajoutée par la mise en oeuvre d'une étude dédiée et détaillée de mécanique des fluides numérique pour mieux estimer le comportement énergétique des constructions, grâce à une meilleure prise en compte des effets de l'environnement aéraulique. Cependant, seule une direction de vent particulière est considérée dans cette étude, l'utilisation de modèles de type steady RANS conduit généralement à une estimation grossière des champs aérodynamiques moyens dans les zones caractérisées par la formation de recirculations, où les dépressions et fort gradients d'échanges convectifs sont observés, et des modèles de bâtiments très simples ont été considérés. La prise en compte de bâtiments plus réalistes, la réalisation de simulations CFD plus précises intégrant différentes vitesses et directions de vent ainsi qu'un calibrage des modèles avec des mesures dédiées apparaissent donc nécessaires pour porter cette démarche plus loin.

RÉFÉRENCES

- Ademe (2016). Isolation de la maison.
- Allegrini, J., Dorer, V., and Carmeliet, J. (2012). Influence of the urban microclimate in street canyons on the energy demand for space cooling and heating of buildings. *Energy and Buildings*, 55 :823–832.
- Ansys Fluent (2013). Fluent release 14.5 user guide and fluent release 14.5 theory guide.
- Blocken, B., Defraeye, T., Derome, D., and Carmeliet, J. (2009). High-resolution CFD simulations for forced convective heat transfer coefficients at the facade of a low-rise building. *Building & Environment*, 44(12) :2396–2412.
- Bouyer, J., Inard, C., and Musy, M. (2011). Microclimatic coupling as a solution to improve building energy simulation in an urban context. *Energy and Buildings*, 43(7) :1549–1559.
- CEDVAL (2013). Compilation of experimental data for validation of microscale dispersion models.
- CSTB (2012a). Annexe à l’arrêté portant approbation de la méthode de calcul Th-BCE 2012 : Méthode de calcul Th-BCE 2012. Technical report.
- CSTB (2012b). RT2012 : Règles Th-U, fascicule 4 parois opaques. Technical report.
- Defraeye, T. (2009). LRNM-based convective heat transfer coefficients on the windward and leeward faces of a 10 m cubical building - personal communication.
- Defraeye, T., Blocken, B., and Carmeliet, J. (2011). An adjusted temperature wall function for turbulent forced convective heat transfer for bluff bodies in the atmospheric boundary layer. *Building and Environment*, 46(11) :2130–2141.
- Meinders, E., Hanjalic, K., and Martinuzzi, R. (1999). Experimental study of the local convection heat transfer from a wall mounted cube in turbulent channel flow. *Journal of heat transfer*, 121 :564–573.
- Merlier, L. (2015). *On the interaction between urban structures and air flows : a numerical study of the effects of urban morphology on the building wind environment and the related energy loads*. PhD thesis, INSA de Lyon, CETHIL CSTB, Lyon, France.
- Merlier, L., Kuznik, F., Rusaouën, G., and Hans, J. (2015). An adapted steady RANS RSM wall-function for building external convection. *Building & Environment*, 94, Part 2 :654 – 664.
- Obrecht, C., Kuznik, F., Merlier, L., Roux, J.-J., and Tourancheau, B. (2015). Towards aerodynamic simulations at urban scale using the lattice Boltzmann method. *Environmental Fluid Mechanics*, 15(4) :753–770.
- Obrecht, C., Kuznik, F., Tourancheau, B., Roux, J.-J., and others (2011). Towards urban-scale flow simulations using the lattice boltzmann method. In *Journal of Building Performance Simulation*, pages 933–940.
- Thébault, S. and Bouchié, R. (2015). Estimating infiltration losses for in-situ measurements of the building envelope thermal performance. *Energy procedia*, 78 :1756–1761.
- Tominaga, Y., Mochida, A., Yoshie, R., Kataoka, H., Nozu, T., Yoshikawa, M., and Shirasawa, T. (2008). AIJ guidelines for practical applications of CFD to pedestrian wind environment around buildings. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 96(10-11) :1749–1761.

Indicateurs de pathologies liées à l'humidité : analyse des modèles et influence de l'hystérésis des isothermes de sorption

Thibaut Colinart*¹, Mathieu Bendouma¹, Patrick Glouannec¹

¹ Univ. Bretagne Sud, FRE CNRS 3744, IRDL

F-56100 Lorient, France,

*thibaut.colinart@univ-ubs.fr

RESUME. L'humidité est une des principales sources de pathologies dans le bâtiment. Pour mettre en évidence les occurrences de risques d'apparition de ces pathologies, différents indicateurs et modèles ont été définis dans la littérature en se basant sur la connaissance de l'humidité relative, de la teneur en eau et/ou de la température. Dans le cas de matériaux hygroscopiques, ces informations peuvent être déterminées par la résolution des équations de transferts couplés de chaleur et de masse, parfois en tenant compte de l'hystérésis des isothermes de sorption. L'objet de cette communication est d'analyser quelques modèles permettant de prédire les indicateurs de pathologies liées à l'humidité, en particulier ceux associés à l'apparition de moisissures, et d'évaluer l'influence de l'hystérésis des courbes de sorption sur ces indicateurs.

MOTS-CLÉS : Transfert hygrothermique, indice de moisissure M, indice TOW.

ABSTRACT. Excessive levels of moisture in buildings lead to building pathologies. To highlight the risk of occurrence of each type of pathology, numerous durability index and models were defined in the literature knowing the relative humidity, the moisture content and/or the temperature level. In the case of hygroscopic building materials, the hygrothermal fields are evaluated by solving heat air and moisture transfers equation. Furthermore, hysteresis can be included in the simulation. In this work, we aim to analyze some models predicting durability index, in particular mold prediction models, and to evaluate the influence of hysteresis on the prediction of durability index.

KEYWORDS : Heat and moisture transfer, mold growth index, TOW index.

1. INTRODUCTION

L'humidité est un facteur important dans la vie d'un bâtiment, que ce soit en phase de conception (design de l'enveloppe et des systèmes énergétiques) ou en phase d'exploitation en raison des risques de pathologies. Dans ce second cas, les pathologies peuvent être classées selon 4 catégories (Berger et al. 2015) : les altérations dues à l'action propre de l'humidité (modification des propriétés mécanique et thermique, variations dimensionnelles de type gonflement/retrait), les altérations dont l'humidité est le vecteur (gel/dégel, cristallisation des sels), les altérations se développant en milieu humide (dégradation biologique de type développement de moisissure, corrosion) et la dégradation des ambiances intérieures (confort hygrothermique, qualité des ambiances intérieures).

Chacune des pathologies listées précédemment peut être décrite à l'aide d'un ou plusieurs indicateurs. Par exemple, Vereecken et al. (2012, 2015) propose une revue des nombreux indicateurs et modèles associés permettant de prédire l'apparition et le développement des moisissures : on peut distinguer des indicateurs qualitatifs (ratio de température, durée de persistance de l'humidité (ou *time*

of wetness *TOW*), courbe de niveau *isopleth*) ou quantitatifs (indice M et modèle VTT, croissance des moisissures et modèle WUFI biohygrothermique). Les modèles qualitatifs fixent un seuil critique dépendant de la température et/ou de l'humidité relative au delà duquel un risque, avéré ou non, existe. Les modèles quantitatifs visent quant à eux à décrire l'évolution d'un indicateur en fonction de la température, de l'humidité relative, du substrat ou encore du temps d'exposition. Par exemple, le modèle WUFI biohygrothermique permet de prédire le taux de croissance des moisissures (en mm/jour) en se basant sur une description *a priori* de la géométrie et des propriétés hygrothermiques des moisissures. Cependant, au delà d'un certain seuil de croissance, la validité de ce modèle atteint ses limites (Vereecken et al. 2012). A contrario, le modèle VTT est un modèle phénoménologique visant à prédire un indice M variant entre 0 et 6 (Hukka et Viitanen, 1999). Initialement développé pour prédire l'apparition et le développement de moisissure sur des échantillons de pin et d'épicéa sujets à des conditions critiques constantes, le modèle a été étendu à des conditions variables, puis à d'autres classes de matériaux en définissant des catégories de sensibilité au développement fongique.

Cependant, la comparaison effectuée par Vereecken et al. (2015) entre le modèle VTT et les résultats expérimentaux récemment obtenus sur du pin et de l'épicéa par Johansson et al. (2013) souligne d'une part le besoin d'accéder à une base de donnée expérimentale de qualité afin de valider les modèles et d'autre part le besoin d'améliorer la définition des modèles (seuil critique, meilleure prise en compte d'un effet retardant, etc.). Toutefois, Vereecken et al. (2015) souligne également que prendre en compte les conditions de température et d'humidité en surface en résolvant les équations de transfert hygrothermique dans le matériau (au lieu de prendre les conditions d'ambiance en supposant un équilibre hygrothermique instantané des échantillons comme le suggère le modèle VTT) peut modifier les résultats et la nature des conclusions. Néanmoins, deux points méritent d'être discutés sur la base de cette remarque : d'une part, le pin ou l'épicéa sont des matériaux anisotropes par nature et leurs propriétés de transfert hygrothermique varient selon la direction (Zillig, 2009) ; d'autre part, les isothermes de sorption de ces matériaux hygroscopique présentent un hystérésis (Zillig, 2009). Patera et al. (2016) tiennent compte de ces deux points lors de la modélisation du comportement hygrothermique d'une poutre en bois soumise à des sollicitations sinusoïdale et climatique réelle : une influence de ces paramètres est bien observée sur les variations de teneur en eau en surface et dans le matériau, qui, selon les auteurs, devrait influencer le développement de moisissures ou la stabilité mécanique du matériau. L'objectif de cette communication vise donc à quantifier l'influence de l'anisotropie des propriétés de transfert et de l'hystérésis des isothermes de sorption sur la prédiction de l'apparition et du développement des moisissures à l'aide de différents modèles.

2. PRESENTATION DES MODELES

2.1. MODELE HYGROTHERMIQUE INCLUANT L'HYSTERESIS

Les transferts de chaleur et d'humidité sont décrits dans un matériau supposé homogène, continu et non déformable. Les effets liés à la gravité sont négligés et nous assumons l'équilibre thermodynamique local entre les phases liquide, gazeuse et solide. Enfin, la pression totale de la phase gazeuse étant prise comme constante, les deux variables d'état T et φ suffisent à décrire ce problème. Les équations de conservation de l'énergie et de l'humidité dans le matériau s'écrivent alors (Lelièvre et al. 2014, Colinart et al. 2016) :

$$\overline{\rho c_p} \frac{\partial T}{\partial t} = -\nabla \cdot (-\lambda \nabla T) - (L_v + (c_{p,v} - c_{p,l})(T - T_{ref})) \nabla \cdot (D_v^{\varphi} \nabla \varphi + D_v^T \nabla T) \quad (1)$$

$$\rho_s \theta \frac{\partial \varphi}{\partial t} = -\nabla \cdot \left(-(D_l^{\varphi} + D_v^{\varphi}) \nabla \varphi - (D_l^T + D_v^T) \nabla T \right) \quad (2)$$

avec $\overline{\rho c_p}$ et λ la capacité et la conductivité thermique apparente. Comme les gradients de températures sont faibles, les transferts associés de liquide peuvent être négligés et on pose $D_l^T = 0$.

Les autres coefficients de diffusion sont calculés comme suit :

$$D_v^{\varphi} = \frac{\pi_a}{\mu_{dry}} p_v^{sat}, \quad D_l^{\varphi} = \pi_a p_v^{sat} \left(\frac{1}{\mu} - \frac{1}{\mu_{dry}} \right) \quad \text{et} \quad D_v^T = \frac{\pi_a}{\mu_{dry}} \varphi \frac{dp_v^{sat}}{dT} \quad (3)$$

Enfin, en raison de l'hystérésis observé dans les isothermes de sorption, la capacité hydrique $\theta = dw/d\varphi$ ne peut être calculée au moyen d'une courbe unique, mais doit être déterminée à l'aide d'un modèle d'hystérésis. Dans cette étude, les approches empirique de Pedersen (1990) et phénoménologique de Mualem (1974) sont testées. Les capacités hydriques de courbes intermédiaires d'adsorption et de désorption sont calculées par les relations (4) pour le modèle de Pedersen et les relations (5) pour le modèle de Mualem :

$$\theta_{ad,hys} = \frac{B(w - w_{ad})^A \theta_{des} + (w - w_{des})^A \theta_{ad}}{(w_{des} - w_{ad})^A} \quad \text{et} \quad \theta_{des,hys} = \frac{(w - w_{ad})^A \theta_{des} + C(w - w_{des})^A \theta_{ad}}{(w_{des} - w_{ad})^A} \quad (4)$$

$$\theta_{ad,hys} = \frac{w_f - w_{des}(\phi_i)}{w_f - w_{ad}(\phi_i)} \theta_{ad} \quad \text{et} \quad \theta_{des,hys} = \frac{w_f - w_{des}}{w_f - w_{ad}} \theta_{ad} - \frac{(w_{ad}(\phi_j) - w_{ad}) (w_f - w_{des}) \theta_{ad} - (w_f - w_{ad}) \theta_{des}}{(w_f - w_{ad})^2} \quad (5)$$

avec w_{ad} et θ_{ad} (resp. w_{des} et θ_{des}) la teneur en eau et la capacité hydrique de la courbe d'adsorption principale (resp. désorption), A , B et C des coefficients empiriques à déterminer, w_f la teneur en eau à saturation libre et ϕ_i et ϕ_j les humidités relatives minimale et maximale atteintes durant un cycle d'adsorption/désorption. L'implémentation numérique du modèle de Pedersen ne pose pas de difficulté particulière, mais une non-fermeture du problème induit une erreur de pompage artificiel (Lelièvre et al., 2014). Le modèle de Mualem ne présente pas ce problème de fermeture. En revanche, le traitement numérique du modèle de Mualem est rendu difficile par la mémorisation en tout point des extremums d'humidité relative au cours de la simulation.

2.2. MODELES DE DURABILITE

Deux modèles d'apparition et de développement des moisissures sont explorés. Les courbes de niveaux *isopleth* définissent un seuil au delà duquel un risque de développement de moisissure existe. Même si plusieurs courbes sont disponibles dans la littérature, Vereecken et al (2012) constate une bonne concordance entre elles. Ici, la courbe de niveaux définie dans le modèle VTT est utilisée :

$$HR_{crit} [\%] = \begin{cases} -0,00267T^3 + 0,16T^2 - 3,13T + 100 & \text{si } T < 20^\circ C \\ 80 & \text{si } T \geq 20^\circ C \end{cases} \quad (6)$$

Cependant, l'utilisation des courbes de niveaux reste essentiellement graphique et ne permet pas de quantifier le risque. Ce dernier peut être appréhender plus finement en évaluant la durée de persistance de l'humidité relative (ou *time of wetness* TOW) au delà de ce seuil critique :

$$TOW = t_{HR > HR_{crit}} \quad (7)$$

Le modèle VTT est un modèle phénoménologique permettant de prédire un indice de moisissure M . Cet indice varie de 0 (aucun développement) à 6 (moisissures très développées couvrant toute la surface). Les niveaux $M = 1$ (apparition de moisissure à l'échelle microscopique) et $M = 3$ (moisissure visible à l'œil nu) sont des valeurs seuil pertinentes. Même si les équations gouvernant l'évolution de l'indice M sont disponibles dans la littérature, il apparaît opportun d'en rappeler les fondements, tant la confusion règne sur les indices et les unités. La dérivée temporelle de M (t étant exprimé en semaine !) est donnée par (Hukka et Viitanen, 1999) :

$$\frac{dM}{dt} = \begin{cases} \frac{k_1 k_2}{t_{M=1}} & \text{si } HR \geq HR_{crit} \\ k_3 & \text{si } HR < HR_{crit} \end{cases} \quad (8)$$

$$\text{avec } k_1 = \begin{cases} 1 & \text{si } M < 1 \\ \frac{2}{(t_{M=3}/t_{M=1}) - 1} & \text{si } M \geq 1 \end{cases} \quad \text{et } k_2 = \begin{cases} 1 & \text{si } M < 4 \\ \max(1 - \exp(2,3(M - M_{max})), 0) & \text{si } M \geq 4 \end{cases} \quad (9)$$

où $t_{M=1}$ [semaine] et $t_{M=3}$ [semaine] sont les temps caractéristiques pour atteindre les niveaux $M = 1$ et $M = 3$ et M_{max} un indice maximum de moisissure. Ces paramètres dépendent de la température, de l'humidité relative, du temps d'exposition et du matériau et de sa qualité de surface. L'expression détaillée de ces paramètres peut être trouvée dans Vereecken et al. (2012). La constante k_3 ($k_3 < 0$) permet de prendre en compte un effet retardant le développement des moisissures, voire d'induire une baisse de l'indice, si le seuil critique n'est pas dépassé sur une longue période. Cette constante, supposée dépendre du temps d'exposition, n'a été évaluée que sur un nombre limité d'expériences. Dans cette étude, on pose k_3 [semaine] = - 0,016 x 7.

3. CAS D'ETUDE

Un des objectifs de cette étude est de reproduire numériquement les séquences expérimentales menées par Johansson et al. (2013). Les simulations sont appliquées à des échantillons d'épicéa de 1,25 cm d'épaisseur, dont les propriétés thermohydriques sont extraites de la littérature. La masse volumique sèche et la capacité thermique sont égales à 405 kg.m⁻³ et 1,25 J.g.K⁻¹ (Glass et Zelinka 2010). Les isothermes de sorption ont été déterminées par Zillig (2009) à une température de 23 °C et modélisées par Zhang et al. (2015) à l'aide d'un modèle de GAB (cf. Tableau 1) :

$$w = \frac{w_m \times C \times K \times \varphi}{(1 - K \times \varphi)(1 + K(C - 1)\varphi)} \quad (10)$$

Si l'isotherme d'adsorption correspond effectivement à la courbe principale, la courbe de désorption n'est en fait qu'une courbe de désorption primaire partant de 97 %. En revanche, il est possible de déterminer la courbe de désorption principale à l'aide de la courbe d'adsorption principale, d'une courbe de désorption primaire et d'un modèle d'hystérésis. Les paramètres de cette courbe obtenus à l'aide du modèle de Mualem sont consignés dans le Tableau 1.

	w_m	C	K
<i>Adsorption principale</i>	0,058	5,58	0,775
<i>Désorption primaire à 97 %</i>	0,13	3,35	0,55
<i>Désorption principale</i>	0,3	3,33	0,75

Tableau 1 : Valeurs des paramètres ajustés du modèle de GAB.

Les relations donnant la conductivité thermique et le coefficient de résistance à la diffusion de vapeur sont extraites respectivement de Kühmann (1962) et Zillig (2009). On note en particulier qu'en raison de l'anisotropie de la structure de l'épicéa, les propriétés de transfert thermiques ou hydriques sont plus élevées dans la direction longitudinale que dans les directions transversales ou radiales :

$$\lambda_{T/R} = 0,0794 + 0,14w \text{ et } \lambda_L = 1,8\lambda_{T/R} \quad (11)$$

$$\mu_{T/R} = \left(3,94 \cdot 10^{-3} + 5,72 \cdot 10^{-6} \exp(11,9\phi)\right)^{-1} \text{ et } \mu_L = \left(2,8 \cdot 10^{-3} + 4,58 \cdot 10^{-6} \exp(13,5\phi)\right)^{-1} \quad (12)$$

Deux séquences isothermes ($T = 22 \text{ °C}$) sont testées : dans la première, l'humidité relative varie périodiquement entre 60 et 90 % avec une période de 24h ; dans la second, la période est de 14 jours. Pour chaque cas, des conditions de convection sont imposées pour les transferts thermiques et hydriques au niveau de chacune des surfaces :

$$-\lambda \nabla T - \left(\rho_s \nabla \cdot (D_i^\varphi \nabla \varphi + D_i^T \nabla T)\right) (L_v + (c_{p,v} - c_{p,l})T) = h_c (T_{air} - T_{surf}) \quad (13)$$

$$\rho_s \left[(D_v^\varphi + D_l^\varphi) \nabla \varphi + (D_v^T + D_l^T) \nabla T \right] = k_m \frac{M_v}{R} \left(\frac{P_{v,air}}{T_{air}} - \frac{P_{v,surf}}{T_{surf}} \right) \quad (14)$$

avec $h_c = 8 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ et k_m (calculé par la relation de Lewis) les coefficients de transfert convectif de chaleur et d'humidité. La température et l'humidité relative initiale sont prises égale à 22 °C et 90% . Enfin, les simulations sont réalisées à l'aide de Comsol Multiphysics® sur une période de 100 jours.

4. RESULTATS ET DISCUSSION

4.1. ANALYSE DU MODELE VTT SANS TENIR COMPTE DE L'HYSTERESIS

Dans le but d'évaluer le modèle VTT, une première série de simulation a été réalisée sans prendre en compte l'hystérésis (en utilisant uniquement la courbe d'adsorption). Les évolutions de l'indice M sont tracées sur les Figures 1 pour différents cas de figure et doivent permettre d'évaluer l'influence de la sollicitation (période longue vs. période courte), l'influence des effets convectifs en surface (HRamb vs. HRsurf), l'influence des propriétés de transfert dans le matériau (longitudinal vs. transversal) et l'influence de l'effet retardant le développement des moisissures ($k_3 = 0$ vs. $k_3 \neq 0$).

On observe que les propriétés de transfert dans le matériau ont une influence sur la prédiction de l'indice M lorsque la période de la sollicitation est courte, mais pas d'influence lorsque la période de la sollicitation est longue. Ces observations s'expliquent à double titre : d'une part, l'effusivité hydrique longitudinale est plus élevée que l'effusivité hydrique radiale, ce qui implique une variation plus faible de l'humidité relative en surface, et donc un indice de moisissure plus faible (cf. figure 1b) ; d'autre part, lorsque la sollicitation est plus longue, l'humidité relative de surface converge vers l'humidité relative ambiante et les effets transitoires dus aux différences d'effusivité hydrique s'amenuisent.

Pour évaluer l'influence des effets convectifs en surface, une simulation est réalisée en imposant des conditions limite de type Dirichlet (« HRamb » sur les Figures 1). Comme espéré, on constate, par comparaison aux simulations effectuées avec une condition limite convective, des évolutions d'autant plus importantes de l'indice M que la période de sollicitation est faible. Par conséquent, même s'il paraît séduisant de prendre les données d'ambiance pour estimer simplement une limite supérieure de l'indice M (comme le font Vereecken et al. (2015) dans leur étude), ce point souligne toutefois l'importance du nombre de Biot hydrique dans le calcul de l'indice M et de son interprétation.

Enfin, quelle que soit le type de sollicitation, on observe une très forte influence de l'effet retardant le développement des moisissures : par exemple, dans le cas d'une sollicitation de période longue, l'indice M prédit sans effet retardant est compris entre 2,5 et 3, correspondant à un niveau de moisissure visible à l'œil nu, alors que l'indice M prédit avec effet retardant est compris entre 0,75 et 1,25, correspondant à un niveau de moisissure visible au microscope. Aussi est-il intéressant de comparer ces résultats aux résultats expérimentaux de Johansson et al. (2013) : pour une sollicitation de période longue, pas ou peu de développement de moisissure a été observé expérimentalement, ce qui prouve l'intérêt de prendre en compte cet effet retardant. *A contrario*, pour une sollicitation de période courte, un développement de moisissure ($M = 1$) est observé expérimentalement après une période comprise entre 20 et 56 jours. Numériquement, cette tendance est constatée lorsque l'effet retardant n'est pris en compte, ce qui est contradictoire avec le constat précédent. Par conséquent, cela confirme les remarques de Hukka et Viitanen (1999) et de Vereecken et al. (2015) sur le besoin d'approfondir les connaissances sur le comportement des moisissures durant les périodes non favorables à leur développement.

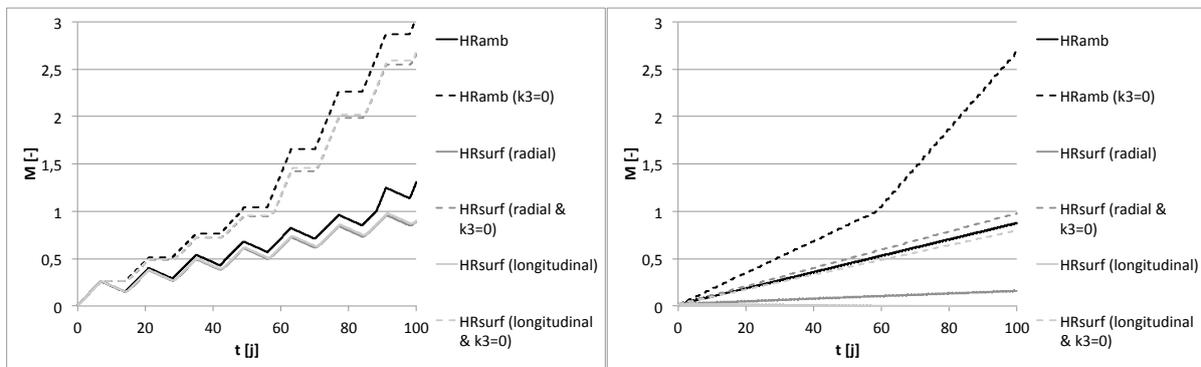


Figure 1 : Influence des propriétés de transfert dans le matériau, des effets convectifs en surface et d'un effet retardant le développement des moisissures sur l'évolution de l'indice de moisissure M pour des sollicitations périodique de période longue (gauche) et courte (droite).

4.2. INFLUENCE DE L'HYSTERESIS SUR LA PREDICTION DU DEVELOPPEMENT DE MOISSURES

Afin de juger de l'influence de l'hystérésis des isothermes de sorption sur la prédiction du développement de moisissures, les simulations ont été réalisées pour une sollicitation de période longue avec les propriétés longitudinales et en négligeant l'effet retardant ($k_3 = 0$). Les évolutions de l'indice M prédites avec les modèles de Pedersen et Mualem sont présentées sur la Figure 2a et comparées avec celles obtenues avec l'isotherme d'adsorption : on observe que ne pas tenir compte de l'hystérésis conduit à une légère sous-estimation de l'indice M . Cela s'explique par le fait qu'au fur et à mesure des cycles, la capacité hydrique $\theta = dw/d\varphi$ prédite avec les modèles d'hystérésis diminue (cf. Figure 2b), ce qui induit une diminution de l'effusivité hydrique et donc une augmentation de l'humidité relative en surface et de l'indice M . Cependant, les effets liés à l'hystérésis sont certainement plus faibles qu'escompté : d'une part, les propriétés de transfert hydrique sont exprimées en fonction de l'humidité relative HR (cf. eq(12)) ; or l'hystérésis influence plus amplement les évolutions de la teneur en eau w (cf. Figure 2b). Par conséquent, exprimer les propriétés de transfert en fonction de la teneur en eau (ce qui est raisonnable pour des humidités élevées) devrait conduire à un effet plus prononcé de l'hystérésis sur les évolutions de l'indice M . D'autre part, le cyclage étant régulier, la capacité de sorption converge vers un pseudo-état d'équilibre (qui n'est en aucun cas une moyenne entre l'adsorption et la désorption) et les écarts observés entre les courbes restent constants.

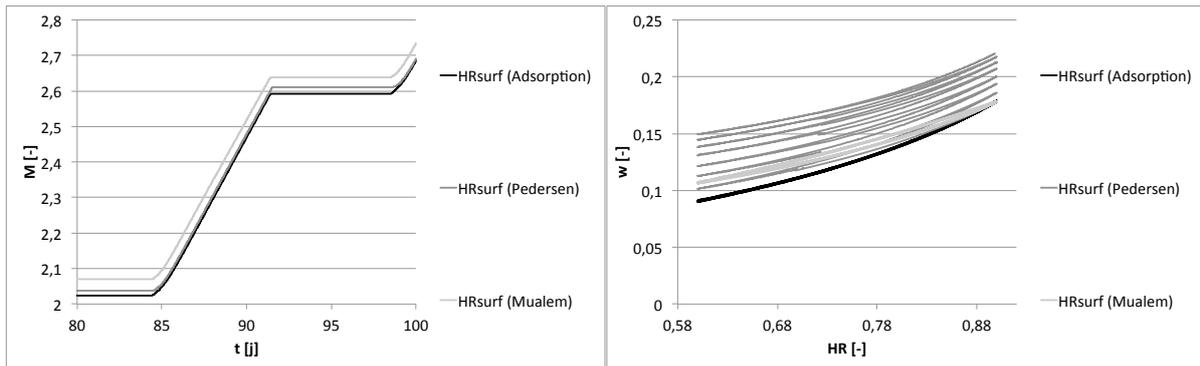


Figure 2 : Influence de l'hystérésis sur l'évolution de l'indice de moisissure M pour une sollicitations périodique de période longue (gauche) et évolutions de la teneur en eau de surface en fonction de l'humidité relative.

Pour évaluer l'influence de l'hystérésis sur les indicateurs de durabilité lorsque la sollicitation n'est pas périodique, une simulation a été effectuée avec les données météo de Lorient avec les propriétés longitudinales. Les résultats obtenus avec l'isotherme d'adsorption et les modèles d'hystérésis sont présentés sur les Figures 3. Avant tout, on peut noter à nouveau l'importance de l'effet retardant sur la prédiction de l'indice M (cf. Figure 3a) : ne pas le prendre en compte conduit à un indice $M > 4,5$ (contre $M = 2,7 \pm 0,2$ s'il est pris en compte), indiquant que plus de 60 % de la surface du matériau est couvert de moisissure. L'hystérésis influence légèrement les indicateurs et de manière antagoniste : prendre en compte l'hystérésis implique une augmentation de l'indice M , mais une diminution de l'indice TOW . Par conséquent, cela souligne que le choix de l'indicateur de durabilité se révèle donc crucial pour analyser l'influence de phénomènes physiques ou comparer des solutions technologiques.

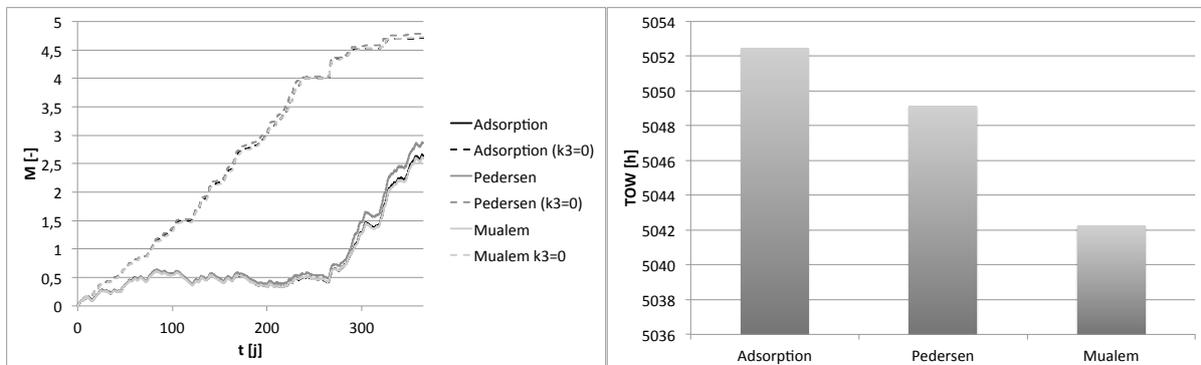


Figure 3 : Influence de l'hystérésis sur l'évolution de l'indice de moisissure M (gauche) et l'indice TOW (droite) pour une sollicitation non périodique (fichier météo de Lorient).

5. CONCLUSIONS

Cette étude s'est intéressée à la prédiction d'indicateurs de durabilité et aux modèles associés. Dans le cas du modèle VTT et de l'indice M , les résultats ont montré l'importance d'un effet retardant le développement des moisissures et ont souligné le besoin d'études complémentaires sur le sujet. Plus généralement, même s'il paraît séduisant de prendre les données d'ambiance pour estimer simplement une limite supérieure de l'indice M , il est indispensable de tenir compte des propriétés de transfert et stockage (*i.e.* hystérésis) pour affiner la prédiction de cet indice M . Enfin, le dernier exemple a mis en exergue le caractère crucial du choix de l'indicateur de durabilité pour analyser l'influence de phénomènes physiques ou comparer des solutions technologiques. Par ailleurs, ces conclusions

mériterait d'être généralisées pour diverses configurations d'enveloppe du bâtiment sous des conditions réelles et étendues à d'autres indicateurs de durabilité.

6. BIBLIOGRAPHIE

- Berger, Julien, Sihem Guernouti, Monika Woloszyn et Catherine Buhe. 2015. « Factors governing the development of moisture disorders for integration into building performance simulation ». *Journal of Building Engineering* 3 : 1-15. doi:10.1016/j.jobe.2015.04.008.
- 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. doi:10.1016/j.enbuild.2015.11.027
- Glass, Samuel, et Samuel Zelinka, 2010. « Moisture relations and physical properties of wood ». *Wood handbook : wood as an engineering material*. Madison, WI : U.S. Dept. of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory.
- Hukka, Antti et Hannu Viitanen. 1999. « A mathematical model of mould growth on wooden material », *Wood Science and Technology* 33(6) : 475-485. doi: 10.1007/s002260050131.
- Johansson, Pernilla, Gunilla Bok, et Annika Ekstrand-Tobin. 2013. « The effect of cyclic moisture and temperature on mould growth on wood compared to steady state conditions ». *Building and Environment* 65 : 178-184. doi:10.1016/j.buildenv.2013.04.004.
- Kühlmann, Günter. 1962. « Untersuchung der thermischen Eigenschaften von Holz und Spanplatten in Abhängigkeit von Feuchtigkeit und Temperatur im hygroscopischen Bereich ». *Holz als Roh- und Werkstoff* 20 (7) : 259-270. doi:10.1007/BF02604682.
- Lelièvre, Dylan, Thibaut Colinart, et Patrick Glouannec. 2014. « Hygrothermal behavior of bio-based building materials including hysteresis effects: Experimental and numerical analyses ». *Energy and Buildings* 84 : 617-627. doi:10.1016/j.enbuild.2014.09.013.
- Mualem, Yechezkel. 1974. « A conceptual model of hysteresis ». *Water Resources Research* 10 : 514–520. doi:10.1029/WR010i003p00514.
- Patera, Alessandra, Hannelore Derluyn, Dominique Derome, et Jan Carmeliet. 2016. « Influence of sorption hysteresis on moisture transport in wood ». *Wood Science and Technology* 50(2): 259-283. doi:10.1007/s00226-015-0786-9.
- Pedersen, Carsten Rode. 1990. « Combined heat and moisture transfer in building constructions ». Thèse de doctorat. Technical University of Denmark.
- Vereecken, Evy, et Staf Roels. 2012. « Review of mould prediction models and their influence on mould risk evaluation », *Building and Environment* 51 : 296-310. doi:10.1016/j.buildenv.2011.11.003
- Vereecken, Evy, Kristof Vanoirbeek, et Staf Roels. 2015. « Towards a more thoughtful use of mould prediction models: A critical view on experimental mould growth research », *Journal of Building Physics* 39 (2) : 102—123. doi: 10.1177/1744259115588718
- Zhang, Xiaobo, Wolfgang Zillig, Hartwig M. Künzler, Xu Zhang, et Christoph Mitterer. 2016. « Evaluation of moisture sorption models and modified Mualem model for prediction of desorption isotherm for wood materials ». *Building and Environment* 92 : 387-395. doi:10.1016/j.buildenv.2015.05.021
- Zillig, Wolfgang. 2009. « Moisture transport in wood using a multiscale approach ». Thèse de doctorat. KU Leuven.

Vers la prise en compte des interactions air-enveloppe dans les défauts d'étanchéité

Clément Belleudy^{*,1,2,3}, Monika Woloszyn², Marx Chhay², Matthieu Cosnier³, Daniel Quenard³

¹ WIGWAM Conseil

1 rue d'Argentré, F-44000 Nantes

² LOCIE, UMR 5271, Univ. Savoie Mont Blanc / CNRS

F-73000 Chambéry

³ CSTB, DEE-EMI & PEB,

24 rue Joseph Fourier, F-38400 Saint-Martin d'Hères

*clement.belleudy@univ-smb.fr

RESUME. Une bonne étanchéité à l'air de l'enveloppe est essentielle pour atteindre les niveaux de performance des bâtiments basse consommation. Des défauts de mise en œuvre peuvent induire des transferts d'air parasites à travers l'enveloppe. Pour évaluer l'impact de ces fuites d'air sur la déperdition thermique du bâtiment, l'approche classique consiste à ajouter aux pertes par conduction une perte par infiltration d'air, sans considérer l'échange de chaleur entre l'air et l'enveloppe. Dans cet article, un modèle thermo-aéraulique, préalablement validé expérimentalement, est utilisé pour mettre en évidence l'effet du couplage. En s'inspirant des méthodes simples type 'coefficient de pont thermique', nous définissons un coefficient de déperdition thermique lié au défaut d'étanchéité. Des valeurs numériques sont données pour un défaut ponctuel dans une paroi légère fortement isolée. En conclusion, les avantages et inconvénients de l'approche proposée sont abordés.

MOTS-CLÉS. défaut d'étanchéité, transferts couplés, enveloppe

ABSTRACT. Good building airtightness is of major importance to achieve energy efficient buildings. Poor workmanship may lead to unintended air transfer through the building envelope. The traditional method to assess the impact of air leakage on the building heat loss is to add an infiltration heat loss to the existing conduction heat loss, without considering heat transfer between air flow and envelope. In this article, an experimentally validated Heat-Air model is used to investigate this coupling effect. By using simple methods similar to those for thermal bridges, a heat loss coefficient specific to the defect is defined. Numerical values are given for an airtightness defect in a highly insulated lightweight wall. To conclude, strengths and weaknesses of the proposed approach are discussed.

KEYWORDS. air leakage, coupled transfers, building envelope

1 INTRODUCTION

Les transferts d'air parasites à travers les enveloppes des bâtiments ont un fort impact à la fois sur la consommation énergétique (Jokisalo et al., 2009) et sur les risques liés à l'humidité (Janssens et Hens, 2003). Ce deuxième point est particulièrement important dans le cas des enveloppes légères à ossature bois, sensibles aux transferts d'air par les défauts structurels et les joints, très présents dans ce type de structure.

Dans la très grande majorité des approches existantes les transferts thermiques diffusifs dans une paroi multicouche sont traités de manière indépendante des mouvements de l'air inter- et intra- zones. Du point de vue thermique, plusieurs études ont montré que l'approche classique, complètement découplée '1D thermique' + '0D aéraulique' n'est pas équivalente à une approche multidimensionnelle thermo-aéraulique (Buchanan et Sherman, 2000; Abadie et al., 2002).

Un modèle à deux dimensions hygro-thermo-aéraulique, nommé HAM-Lea, préalablement validé expérimentalement (Belleudy et al., 2015) permet de modéliser l'impact des transferts d'air sur le comportement hygrothermique d'un défaut d'étanchéité complexe (Belleudy et al., 2016). Ce modèle permet donc la simulation des transferts thermiques de manière couplée. Pour prendre en compte l'impact de ces défauts sur la déperdition thermique d'un bâtiment, une simulation fine de l'ensemble de l'enveloppe en 2D ou 3D avec le modèle HAM-Lea serait trop lourde à mettre en œuvre et trop coûteuse en temps de calcul. Il faut donc imaginer des méthodes intermédiaires, qui constituent un compromis entre les temps de calcul, la précision des résultats, et la simplicité de mise en œuvre. Une proposition est donnée dans le présent article, en s'inspirant des méthodes simples type 'coefficient de pont thermique'.

Dans le travail présenté ici, nous rappelons d'abord les approches existantes pour prendre en compte de manière simplifiée les points singuliers de l'enveloppe. Ensuite, le modèle HAM-Lea qui constitue la situation de référence, est comparé aux approches simplifiées '1D thermique' et '0D aéraulique', ce qui permet de mettre en évidence l'effet du couplage. Nous définissons un coefficient de déperditions thermiques lié au défaut d'étanchéité. Des valeurs numériques sont données pour un défaut dans une paroi légère fortement isolée.

2 TRAITEMENT TRADITIONNEL DES POINTS SINGULIERS

Pour calculer la déperdition globale d'un bâtiment, la plupart des codes de Simulation Thermique Dynamique de bâtiment (STD) font l'hypothèse de flux conductifs 1D à travers l'enveloppe. On peut notamment citer EnergyPlus (www.energyplus.net), TRNSYS (www.trnsys.com) ou COMETH (www.cometh-cstb.fr). Les points singuliers de l'enveloppe, que sont par exemple les ponts thermiques et les défauts d'étanchéité à l'air, sont pris en compte de manière simplifiée. Dans les deux sous-parties qui vont suivre, nous allons détailler les approches les plus courantes pour traiter ces points singuliers dans les codes existants.

2.1 PONTS THERMIQUES

Rappelons que la conduction thermique à travers l'enveloppe d'un bâtiment est en réalité un phénomène 3D. Comme précédemment évoqué, la conduction est généralement traitée par une approche 1D dans les parois courantes, et par une approche spécifique aux points singuliers où les transferts thermiques sont fortement multidimensionnels. Ces points singuliers sont couramment appelés « ponts thermiques » (CSTB, 2012).

L'indice H (de l'anglais 'heat') est utilisé pour désigner les transferts de chaleur par conduction. Nous exposons ici brièvement la méthode de calcul d'un coefficient ψ_H [W/(m.K)] caractérisant le pont thermique linéaire de longueur l . L'expression de ψ_H est :

$$\psi_H = \frac{\Phi_H^{2D} - \Phi_H^{1D}}{l \Delta T} \quad (1)$$

Φ_H^{2D} [W] est le flux thermique conductif total, obtenu par calcul numérique en 2D (méthode des différences finies ou des éléments finis), à l'aide d'un programme dédié. Parmi les plus utilisés, on peut notamment citer THERM et HEAT3. Φ_H^{1D} [W] est le flux conductif 1D traversant les éléments « non perturbés », c'est à dire sans l'effet multidimensionnel dû à la singularité.

Il convient de préciser que dans cette approche, les ponts thermiques sont pris en compte en régime permanent, et que les effets 2D ou 3D sur le transfert de chaleur n'y sont que partiellement capturés. Des travaux menés par exemple par (Gao et al., 2008) permettent d'évaluer les ponts thermiques de manière plus précise en réalisant une réduction de modèle, à partir d'un modèle de pont thermique 2D ou 3D en régime variable, de manière à conserver un temps de calcul raisonnable.

2.2 DÉFAUTS D'ÉTANCHÉITÉ À L'AIR

Après les ponts thermiques, les défauts d'étanchéité à l'air constituent la deuxième catégorie des points singuliers de l'enveloppe d'un bâtiment. En régime permanent, la perte thermique totale Φ_{tot} d'un bâtiment est la somme de la perte par conduction à travers l'enveloppe, traduite par le U_{bat} et de la perte par renouvellement d'air, qui fait intervenir un débit d'air net et une différence de température. La perte par renouvellement d'air comprend la perte Φ_{ventil} due au système de ventilation mécanique (dépend de la technologie utilisée), et de celle due aux fuites d'air parasites $\Phi_{defauts}$, appelées souvent « infiltrations », indépendamment du sens de ce transfert d'air. Dans la plupart des codes de STD bâtiment, $\Phi_{defauts}$ est calculée à partir d'un débit d'air total $Q_{v\ tot}$ transitant à travers les défauts et d'un écart de température entre l'intérieur et l'extérieur. On a alors :

$$\Phi_{tot} = U_{bat}S_{tot}(T_{int} - T_{ext}) + \Phi_{ventil} + \underbrace{\rho_{air} c_{p_{air}} Q_{v\ tot}}_{\Phi_{defauts}}(T_{int} - T_{ext}) \quad (2)$$

Ce débit total $Q_{v\ tot}$ est déterminé à partir de la perméabilité à l'air globale du bâtiment, mesurée lors d'un test de type « porte soufflante » et exprimée de manière normalisée à l'aide d'indicateurs comme le $Q_{4Pa, surf}$ [$m^3/(h.m^2)$] (aussi appelé I_4 : débit de fuite sous 4 Pa divisé par la surface de parois froides, hors plancher bas), ou le n_{50} [h^{-1}] (débit de fuite sous 50 Pa divisé par le volume chauffé, aussi appelé taux de renouvellement d'air sous 50 Pa).

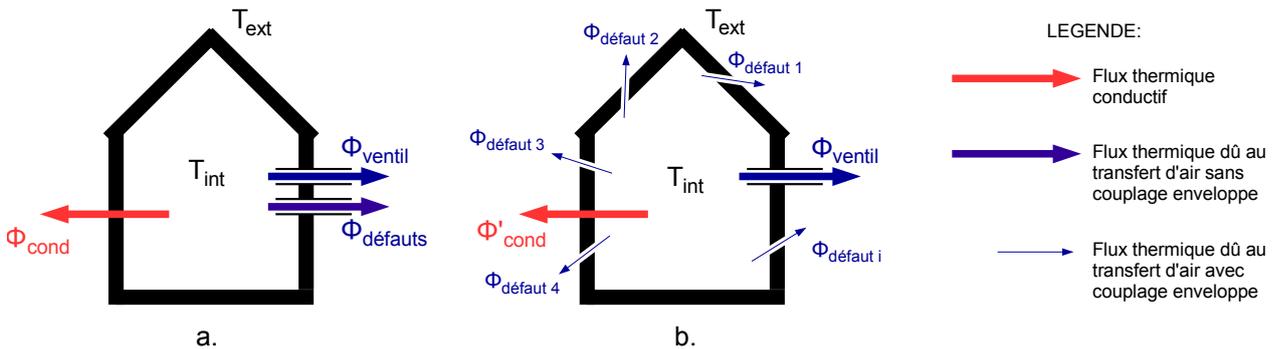


FIGURE 1. Représentation schématique de la prise en compte des défauts d'étanchéité dans le bilan thermique d'un bâtiment : a. approche découplée, b. approche couplée

Dans cette approche classique, le flux conductif Φ_{cond} et le flux convectif $\Phi_{defauts}$ sont découplés : tout se passe comme si l'air n'interagissait pas thermiquement avec les défauts d'étanchéité qu'il traverse (fig. 1 a.). En réalité, l'air qui transite par un défaut d'étanchéité échange de la chaleur avec la paroi environnante, ce qui modifie le champ de température dans celle-ci, et donc le Φ_{cond} . L'air est préchauffé en infiltration, tandis qu'il est refroidi en exfiltration.

Une étude de (Buchanan et Sherman, 2000) a montré que l'effet du couplage, appelé « recouvrement » n'est pas négligeable à l'échelle bâtiment puisque la méthode conventionnelle (décou-

plée) a tendance à surestimer la déperdition totale de 20% en moyenne par rapport à la méthode couplée, pour un bâtiment soumis à des infiltrations d'air.

Des travaux menés par (Svoboda, 1999) proposent d'introduire un coefficient de transmission thermique linéique lié au défaut d'étanchéité à ΔP fixé, en analogie à un coefficient de transmission thermique linéique de pont thermique.

3 VERS UNE APPROCHE SIMPLIFIÉE DE PRISE EN COMPTE DES DÉFAUTS D'ÉTANCHÉITÉ À L'AIR

3.1 VUE D'ENSEMBLE

L'approche de Svoboda est intéressante car elle permet de rendre compte du couplage défaut-enveloppe, avec une méthodologie similaire à celle employée pour les ponts thermiques. Dans cette partie, nous allons enrichir et généraliser cette approche. Pour illustrer nos propos, nous allons cibler un défaut ponctuel (fig. 2).

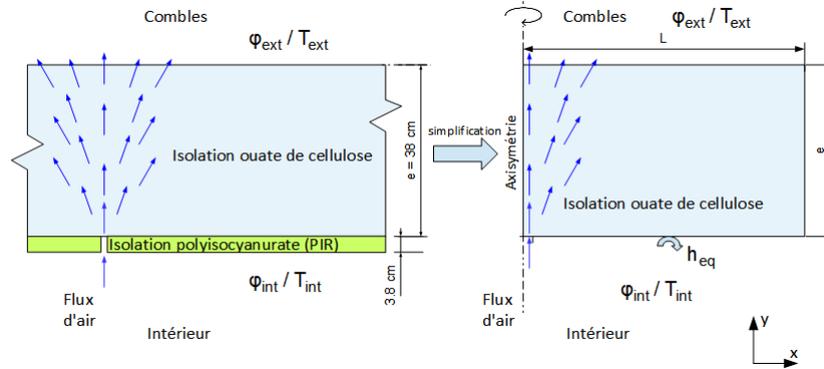


FIGURE 2. Défaut d'étanchéité à l'air à travers un isolant en ouate de cellulose, en situation d'exfiltration d'air. Configuration réelle (gauche) et modèle 2D axisymétrique (droite)

La géométrie consiste en une plaque de polyisocyanurate (PIR) de 3,8 cm d'épaisseur, surmontée d'une couche de 38 cm de ouate de cellulose insufflée par voie sèche. La plaque de PIR, étanche à l'air et à la vapeur, est percée d'un orifice de 6,4 mm de diamètre. Cet assemblage sépare une ambiance chauffée (sous la plaque de polyisocyanurate), d'une ambiance non chauffée (au dessus de la ouate de cellulose). Les paramètres physiques des matériaux sont donnés dans (Belleudy et al., 2015). Cette géométrie est considérée comme axisymétrique par rapport à l'axe de l'orifice, et la couche de PIR est prise en compte via un coefficient d'échange thermique surfacique équivalent.

Dans cet article, nous allons étudier les phénomènes thermo-aérauliques (HA) sans prendre en compte l'humidité, et mettre en place l'approche simplifiée dans ce cadre. On définit les coefficients de perte thermique ponctuels, χ_{HA}^{inf} et χ_{HA}^{exf} [W/(Pa.K)] caractérisant la perte thermique supplémentaire induite par ce défaut d'étanchéité à l'air, respectivement en infiltration et en exfiltration d'air. L'expression générique de χ_{HA} est :

$$\chi_{HA} \Delta P \Delta T = \Phi_{HA}^{2D} - \Phi_H^{1D} \quad (3)$$

3.2 APPROCHE THERMO-AÉRAULIQUE

3.2.1 VÉRIFICATIONS PRÉLIMINAIRES DU MODÈLE

En premier lieu, il faut s'assurer de la robustesse du modèle de référence vis-à-vis des paramètres numériques. Ainsi, le maillage de la géométrie est raffiné jusqu'à ce que les flux thermiques

calculés restent stables. A l'issue de cette étude de sensibilité au maillage, la géométrie comporte 23600 mailles.

Ensuite, pour évaluer les flux qui permettront de calculer les coefficients χ_{HA}^{inf} et χ_{HA}^{exf} , il est important de considérer une géométrie qui inclut une surface suffisamment étendue autour de ce défaut, pour retrouver un flux non perturbé 1D aux bords. Cette précaution se traduit dans le calcul des ponts thermiques en travaillant sur une géométrie incluant des tronçons de paroi d'au moins 1 m autour du point singulier. Pour examiner ce phénomène dans le calcul du CTDE, nous imposons un fort écart de pression et de température ($\Delta P = 20$ Pa, $\Delta T = 20$ K), pour avoir un impact étendu du défaut sur la paroi avoisinante, et nous faisons varier la longueur L , qui correspond au rayon du cylindre considéré (se reporter à la géométrie axisymétrique fig. 2). La variation du CTDE χ_{HA} est tracée en fonction de la longueur L choisie, en exfiltration et en infiltration (fig. 3).

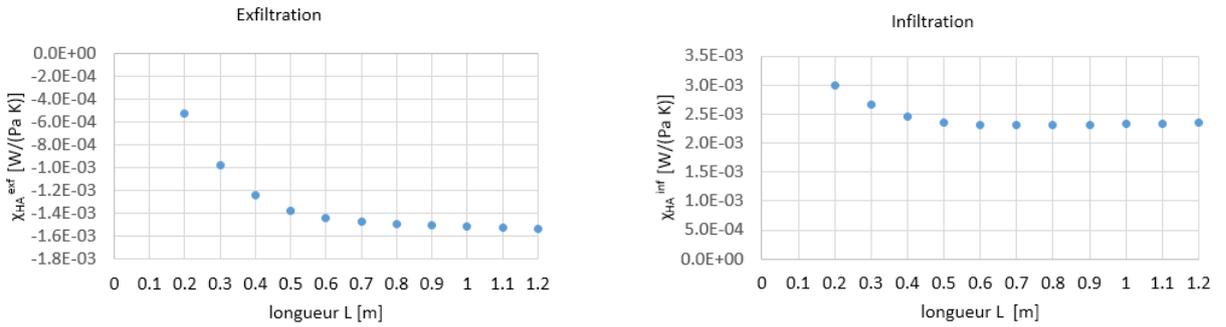


FIGURE 3. Influence de la taille de la géométrie sur le coefficient de perte thermique convectif du défaut.

Ces graphes montrent que les coefficients χ_{HA}^{inf} et χ_{HA}^{exf} se stabilisent à partir de $L = 0,7$ m, ce qui traduit le fait que l'impact de la perturbation sur le champ de température avoisinant a été capturé en totalité. Choisir $L = 1$ m est donc suffisant pour calculer les coefficients χ_{HA}^{inf} et χ_{HA}^{exf} .

3.2.2 CALCUL DU COEFFICIENT DE PERTE THERMIQUE CONVECTIF

Dans une première approche, on considère la géométrie présentée (fig. 2), implémentée dans HA-Lea. Le CDTE ponctuel à ΔP fixé, peut se définir de la manière suivante :

$$\chi_{HA,\Delta P} = \frac{\Phi_{HA}^{2D} - \Phi_H^{1D}}{\Delta T} \quad (4)$$

Le flux Φ_{HA}^{2D} désigne le flux thermique total calculé avec HA-Lea en intégrant la composante normale de la densité de flux total sur la surface inférieure S du cylindre représentant la géométrie. Dans une approche HA, le flux total inclut une composante conductive et une composante convective. Ce flux convectif est évalué en prenant comme référence la température intérieure. Par conséquent, en infiltration d'air, ce flux s'exprime :

$$\Phi_{HA,inf}^{2D} = \iint_S n \cdot [q_{cond} + q_{conv}] d\Sigma = \iint_S n \cdot [-\lambda_{cellulose} \nabla T + \rho_{air} c_{pair} u (T - T_{int})] d\Sigma \quad (5)$$

tandis qu'en exfiltration d'air, la composante convective est nulle, car la température de l'air en entrée de défaut vaut $T = T_{int}$:

$$\Phi_{HA,exf}^{2D} = \iint_S n \cdot q_{cond} d\Sigma = \iint_S n \cdot [-\lambda_{cellulose} \nabla T] d\Sigma \quad (6)$$

Le flux Φ_H^{1D} est quant à lui calculé de manière analytique :

$$\Phi_H^{1D} = \frac{S \Delta T}{R_{int} + R_{cellulose} + R_{polyiso} + R_{ext}} \quad (7)$$

La différence entre Φ_{HA}^{2D} , prenant en compte l'impact de la fuite d'air en 2D, et Φ_H^{1D} ne prenant en compte que la conduction thermique sans fuite d'air, correspond à l'augmentation du flux thermique due à la fuite d'air.

Pour calculer $\chi_{HA,10Pa}$ selon (eq. 4), nous évaluons Φ_{HA}^{2D} avec HA-Lea pour $\Delta P = 10$ Pa et $\Delta T = \{0, 10, 20^\circ C\}$, et calculons Φ_H^{1D} avec (eq. 7). Les résultats obtenus en infiltration et en exfiltration sont présentés dans le tableau (1).

TABLE 1: Calcul du coefficient de perte thermique convectif pour $\Delta P = 10$ Pa en exfiltration et en infiltration

Exfiltration			
ΔT [°C]	$\Phi_{HA,exf}^{2D}$ [W]	Φ_H^{1D} [W]	$\chi_{HA,10Pa}^{exf}$ [W/K]
0	0	0	-
10	2,45	2,62	-0,0171
20	4,90	5,24	-0,0171
Infiltration			
ΔT [°C]	$\Phi_{HA,inf}^{2D}$ [W]	Φ_H^{1D} [W]	$\chi_{HA,10Pa}^{inf}$ [W/K]
0	0	0	-
10	2,85	2,62	0,0228
20	5,70	5,24	0,0228

A travers ce tableau, on confirme qu'à ΔP fixée, la perte thermique due au défaut d'étanchéité à l'air $\Phi_{HA}^{2D} - \Phi_H^{1D}$ est proportionnelle à ΔT . Il est donc légitime de définir un CTDE ponctuel $\chi_{HA,10Pa}$ qui vaut $\chi_{HA,10Pa}^{exf} = -0,0171$ W/K en exfiltration et $\chi_{HA,10Pa}^{inf} = 0,0228$ W/K en infiltration. En évaluant les flux sur la surface intérieure de la paroi, on remarque que le flux thermique total par exfiltration est inférieur à celui sans transfert d'air (car $\chi_{HA,10Pa}^{exf}$ est négatif) tandis que le flux thermique total par infiltration est supérieur à celui sans transfert d'air (car $\chi_{HA,10Pa}^{inf}$ est positif).

Pour tenter de généraliser la première approche, nous allons maintenant étudier la variation du coefficient $\chi_{HA,\Delta P}$ en fonction de l'écart de pression algébrique $\Delta P = P_{int} - P_{ext}$, comme cela est représenté par la courbe noire sur (fig. 4). Une infiltration d'air correspond à ΔP négatif et une exfiltration d'air à un ΔP positif.

Le coefficient $\chi_{HA,\Delta P}$ varie linéairement avec ΔP mais la pente de la droite diffère en infiltration et en exfiltration. Autrement dit, la perte thermique supplémentaire due au passage de l'air à travers le défaut d'étanchéité est proportionnelle à l'écart de température et à l'écart de pression d'air, cependant la valeur du coefficient varie en fonction du sens de l'écoulement.

En gardant l'expression de l'écart de pression en valeur absolue, on peut donc définir pour ce défaut deux CTDE, ramenés à l'écart de pression et de température :

- en infiltration $\chi_{HA}^{inf} = 0.00231$ W/(Pa.K)
- en exfiltration $\chi_{HA}^{exf} = -0,00158$ W/(Pa.K)

3.2.3 ANALYSE DE L'IMPACT DES COUPLAGES THERMO-AÉRAULIQUES

Dans ce paragraphe, nous allons évaluer l'impact de la prise en compte du couplage entre et les transferts de chaleur et d'air sur l'évaluation du flux thermique total. En somme, il s'agit de déterminer si une approche couplée (CTDE) apporte un gain de précision par rapport à une approche classique découplée.

Comme nous l'avons évoqué au début de ce chapitre, la manière conventionnelle de prendre en compte l'impact des défauts d'étanchéité dans le calcul du flux déperditif total est d'ajouter au flux conductif Φ_H^{1D} un flux enthalpique découplé Φ_A^{0D} proportionnel au débit d'air traversant

et à la différence de température entre les deux ambiances. On a alors :

$$\Phi_{HA}^{decouple} = \Phi_H^{1D} + \Phi_A^{0D} \quad (8)$$

où Φ_H^{1D} est défini selon (eq. 7) et Φ_A^{0D} est défini comme suit (eq. 9). Selon les conventions choisies, le flux enthalpique découplé Φ_A^{0D} est nul en exfiltration, et vaut en infiltration :

$$\Phi_A^{0D} = \rho_{air} c_{p,air} Q_v (T_{int} - T_{ext}) \quad (9)$$

Avec Q_v le débit volumique d'air à travers le défaut. En réalité, l'air qui transite par un défaut d'étanchéité échange de la chaleur avec la paroi environnante, ce qui modifie le champ de température dans celle-ci ; en infiltration, l'air est réchauffé tandis qu'en exfiltration il est refroidi. Le flux Φ_{HA}^{2D} qui en résulte, n'est en général pas égal à $\Phi_{HA}^{decouple}$. Ainsi nous pouvons comparer le CTDE $\chi_{HA,\Delta P}$ (calculé avec l'approche couplée), avec son « équivalent » calculé avec l'approche découplée. Par ailleurs, conformément aux conventions retenues, ce coefficient découplé revient à calculer simplement le rapport $\Phi_A^{0D}/\Delta T$, ou encore $\rho_{air} c_{p,air} Q_v$.

Les résultats présentés dans la (fig. 4) permettent de constater qu'en infiltration et en exfiltration d'air, le couplage thermo-aéraulique impacte fortement les flux traversant l'enveloppe. L'approche découplée surestime les déperditions. Notons que ce dernier point a déjà été soulevé

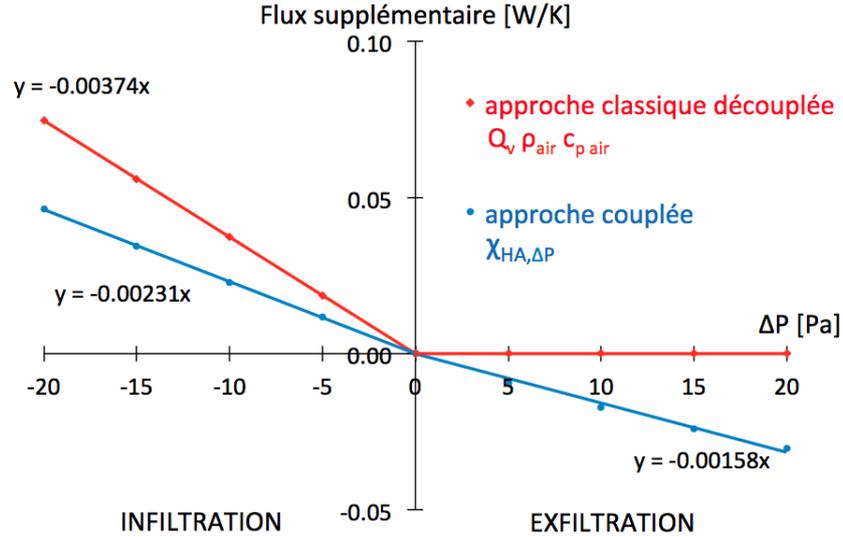


FIGURE 4. Comparaison de l'évolution en fonction de l'écart de pression des flux supplémentaires dus à la fuite d'air entre une approche couplée et découplée

par plusieurs auteurs (Babin et Inard, 2010; Buchanan et Sherman, 2000). Le terme 'recouvrement', introduit par (Bhattacharyya et Clardige, 1995), est souvent utilisé pour le désigner. Ce phénomène est valorisé dans les techniques dites de "l'isolation dynamique" étudiées par exemple par (Taylor et Imbabi, 1998; Qiu et Haghghat, 2007). Effectivement, nous pouvons ainsi obtenir une réduction globale des besoins du bâtiment. Cependant des problèmes de durabilité, liés notamment à l'humidité, sont un frein important à l'application pratique.

4 CONCLUSION

Dans cet article, nous avons cherché ici à simplifier la modélisation thermo-aéraulique fine à l'échelle des défauts d'étanchéité à l'air, pour la rendre compatible avec la simulation annuelle des bâtiments. Une méthodologie de simplification, inspirée de la modélisation des "ponts thermiques" a été proposée. La perte thermique supplémentaire due à un défaut d'étanchéité peut être prise en compte de manière simplifiée via une approche thermo-aéraulique, en définissant

un coefficient de perte thermique linéique ou ponctuel du défaut, ramené à un écart de température et de pression entre les ambiances de part et d'autre de l'enveloppe. L'approche classique découplée a tendance à surestimer les flux par rapport à l'approche couplée faisant intervenir les coefficients de perte thermique du défaut. L'approche proposée présente des limites car elle fait l'hypothèse du régime permanent : la contribution en régime dynamique n'est donc pas capturée.

5 BIBLIOGRAPHIE

RÉFÉRENCES

- Abadie, M. O., Finlayson, E. U., et Gadgil, A. J. (2002). Infiltration heat recovery in building walls : Computational fluid dynamics investigations results. Technical report, Lawrence Berkeley National Laboratory.
- Babin, H. et Inard, C. (2010). Étude numérique du taux de recouvrement thermique des débits d'air d'infiltration au sein de parois de bâtiments. *Annales du bâtiment et des travaux publics*, pages 31–38.
- Belleudy, C., Kayello, A., Woloszyn, M., et Ge, H. (2015). Experimental and numerical investigations of the effects of air leakage on temperature and moisture fields in porous insulation. *Building and Environment*, 94 :457–466.
- Belleudy, C., Woloszyn, M., Chhay, M., et Cosnier, M. (2016). A 2d model for coupled heat, air, and moisture transfer through porous media in contact with air channels. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 95 :453–465.
- Bhattacharyya, S. et Clardige, D. E. (1995). The energy impact of air leakage through insulated walls. *Journal of Solar Engineering*, 117(3) :167–172.
- Buchanan, C. R. et Sherman, M. H. (2000). A mathematical model for infiltration heat recovery. Report LBNL-44294, Lawrence Berkeley National Laboratory.
- CSTB (2012). Règles Th U Ponts Thermiques. In *Règlementation Thermique 2012*. CSTB Editions.
- Gao, Y., Roux, J., Zhao, L., et Jiang, Y. (2008). Dynamical building simulation : A low order model for thermal bridges losses. *Energy and Buildings*, 40(12) :2236–2243.
- Janssens, A. et Hens, H. (2003). Interstitial Condensation Due to Air Leakage : A Sensitivity Analysis. *Journal of Building Physics*, 27(1) :15–19.
- Jokisalo, J., Kurnitski, J., Korpi, M., Kalamees, T., et Vinha, J. (2009). Building leakage, infiltration, and energy performance analyses for Finnish detached houses. *Building and Environment*, 44(2) :377–387.
- Qiu, K. et Haghighat, F. (2007). Modeling the combined conduction—Air infiltration through diffusive building envelope. *Energy and Buildings*, 39(11) :1140–1150.
- Svoboda, Z. (1999). The analysis of the convective-conductive heat transfert in the building constructions. volume 1, pages 329–335, Kyoto.
- Taylor, B. et Imbabi, M. (1998). The application of dynamic insulation in buildings. *Renewable Energy Efficiency, Policy and the Environment*, 15(1-4) :377–382.

Comparaison des bibliothèques libres de Modelica pour la simulation thermique dynamique du bâtiment.

Pierre Tittlein*¹, Enghok Leang¹, Laurent Zalewski¹, Stéphane Lassue¹

¹ Laboratoire Génie Civil et géo-Environnement (EA-4515), Faculté des Sciences Appliquées - Université d'Artois, Technoparc Futura 62400 Béthune
[*Pierre.Tittlein@univ-artois.fr](mailto: Pierre.Tittlein@univ-artois.fr)

RESUME. Le langage Modelica est de plus en plus utilisé dans de nombreux domaines scientifiques pour la modélisation physique. Il s'agit d'un langage orienté objet basé sur les équations et donc fait pour les physiciens. Dans le domaine du bâtiment, il commence également à se développer et plusieurs bibliothèques de modèles sont maintenant disponibles gratuitement.

L'objectif de cet article est d'aider les personnes qui souhaitent réaliser des modèles de systèmes ou de composants de bâtiments dans le langage modelica et qui ne savent pas dans quelle bibliothèque l'intégrer. Pour cela, l'idée est de comparer les bibliothèques libres de Modelica pouvant servir à la simulation thermique dynamique des bâtiments. La comparaison ne porte pas sur les performances des modèles mais plutôt sur leurs fonctionnalités et les grands choix de développement réalisés. Nous utilisons l'exemple de l'intégration d'un modèle de fenêtre pariétodynamique pour étayer nos propos.

Les bibliothèques comparées ici sont : Aixlib, Annex60, ATPlus, Buildings, BuildingSystem, BuildSysPro, IDEAS.

MOTS-CLÉS : Bibliothèque bâtiment, Langage Modelica, simulation thermique dynamique, code source libre, opensource.

ABSTRACT. Modelica language is more and more used in many field for physical models. It is an object-oriented equations-based language made for physicists. In the field of buildings it also begins to be developed and several free libraries are now available.

The objective of this article is to help those who want to implement building system or component in modelica language and don't know which library to use. On this purpose, the idea is to compare modelica opensource libraries that are made for dynamic thermal simulation. The comparison is not carried on model performances but more on their functionalities and the choices of design. The example of a supply-air-window model is used to illustrate our ideas.

The libraries compared here are : Aixlib, Annex60, ATPlus, Buildings, BuildingSystem, BuildSysPro, IDEAS.

KEYWORDS : Building library, Modelica Language, Dynamic thermal simulation, opensource

1. INTRODUCTION

Modelica est un langage de modélisation multi-physique utilisé dans de nombreux domaines (électronique, mécanique, chimie, etc.). Contrairement à d'autres langages informatiques, il a été développé pour être utilisé par des physiciens et non des informaticiens. C'est un environnement orienté objet basé sur les systèmes d'équations et acausal. Les équations sont donc écrites dans un ordre différent de celui qui servira finalement à la résolution du système, un agenceur d'équation doit donc lui être associé afin de savoir quel est le schéma de résolution optimal. Ce type de langage a de

nombreux intérêts dans le domaine du bâtiment où il est depuis longtemps utilisé (Wetter, Bonvini, et Nouidui 2016; Tittlein 2008). Pour utiliser le langage modelica, plusieurs logiciels sont disponibles. Certains sont gratuits (*OpenModelica*, *JModelica* etc.), d'autres sont payants (*Dymola*). Le logiciel le plus utilisé actuellement par les développeurs de bibliothèques Modelica de bâtiment est *Dymola*. La compatibilité avec les logiciels gratuits n'est donc pas souvent assurée. Ces logiciels proposent une interface graphique permettant entre autres d'écrire dans le langage modelica et de connecter graphiquement les différents modèles, d'agencer les équations pour la résolution, d'utiliser différents solveurs et faire du post-traitement.

Cet article fait le point sur le développement des bibliothèques de Modelica dans le domaine de la thermique et de l'énergétique du bâtiment et compare ces bibliothèques d'un point de vue de leurs fonctionnalités. La performance des simulations réalisées avec ces bibliothèques ne sera pas testée ici. Nous ne parlerons pas non plus ici d'interopérabilité des modèles avec d'autres logiciels (FMI, FMU etc.) qui sont plutôt des questions à l'échelle du logiciel qu'à celle de la bibliothèque. A la base, cette revue des différentes bibliothèques a été réalisée dans le cadre du démarrage d'une thèse sur les murs ventilés intégrant des matériaux à changement de phase dont un modèle doit être réalisé dans le langage modelica. Nous voulions savoir quelle était la meilleure façon de coupler ce modèle à un modèle complet de bâtiment. L'objectif de cette communication est donc de partager les fruits de cette réflexion et d'aider les personnes qui souhaitent réaliser des modèles de systèmes ou de composants de bâtiments dans le langage modelica et qui ne savent pas dans quelle bibliothèque l'intégrer.

Les informations données dans l'article sont valables au mois de mars 2016 mais bien sûr, les bibliothèques étudiées étant en code source libre, elles évoluent très vite. Nous chercherons donc plus à nous attarder sur la philosophie générale des bibliothèques plutôt qu'à des points de détails concernant des modèles qui peuvent rapidement être modifiés.

2. PRESENTATION DES BIBLIOTHEQUES EXISTANTES

Dans le domaine de la thermique et de l'énergétique du bâtiment, de plus en plus de chercheurs utilisent Modelica et de nouvelles bibliothèques voient le jour. Une annexe de l'agence internationale de l'énergie est d'ailleurs en cours sur le sujet¹. Dans le cadre de cette annexe, la tâche 1.1 a été prévue pour développer une bibliothèque commune de modélisation pour le bâtiment. Cette tâche s'est finalement un peu transformée pour aboutir à la création d'un noyau commun de modèles appelé "Annex60" à utiliser dans différentes bibliothèques de bâtiment. Il est utilisé actuellement par 4 bibliothèques. Le Tableau 1 présente les 7 bibliothèques étudiées ici et qui seront présentées dans ce paragraphe par ordre chronologique de leur mise en code source libre.

La première bibliothèque à apparaître était *ATPlus* développée à Kaiserslautern en Allemagne (Felgner et al. 2002). Cette bibliothèque n'est plus développée depuis une dizaine d'années mais il nous a semblé intéressant de la présenter car elle est déjà assez complète et permet de réaliser des simulations complètes de bâtiments en multizone prenant en compte tous les modes de transfert de chaleur et proposant une panoplie de systèmes tels que des pompes, des convecteurs, des radiateurs, des planchers chauffants, des climatiseurs etc. Une panoplie de contrôleurs est également disponible. Les principaux connecteurs utilisés pour la connexion des modèles thermiques sont du même type que

¹ IEA EBC Annex 60 : New generation computational tools for building and community energy systems based on the Modelica and Functional Mockup Interface standards

les "heatPort" de la bibliothèque standard actuelle (un port température + un port flux de chaleur) mais les notations ne sont pas les mêmes ce qui les rend incompatibles. La grosse lacune de cette bibliothèque est qu'elle n'est pas du tout documentée si ce n'est quelques annotations (rares) à côté des noms des classes.

Nom de la bibliothèque	Principal développeur	Site Web	Site de développement (et de téléchargement)	Date de la dernière version au 1 ^{er} février 2016	Date de la première version Opensource	version étudiée dans cet article	Utilisation de la bibliothèque Annex60
Aixlib	RWTH Aachen, Allemagne	-	https://github.com/RWTH-EBC/AixLib	Déc. 2015	2013	v0.2.1	Oui
Annex60	participants de la tâche 1.1 de l'annexe 60 de l'AIE	https://simulationresearch.lbl.gov/iea-annex60/	https://github.com/iea-annex60/modelica-annex60	Sept 2013	2013	v0.1	-
ATPlus	EIT Kaiserslautern, Allemagne	https://www.eit-uni-kl.de/atplus/home/	https://github.com/modelica-3rdparty/Atplus	Sept. 2005	2002	v2.1	Non
Buildings	LBNL Berkeley, USA	http://simulationresearch.lbl.gov/modelica/	https://github.com/lbl-srg/modelica-buildings	Juil. 2015	2008	v2.1.0	Oui
Building-System	UdK Berlin, Allemagne	http://modelica-buildingsystems.de	https://github.com/UdK-VPT/BuildingSystems	Oct. 2014	2012	v0.1	Oui
BuildSys-Pro	EdF, Les Renardières, France	-	https://github.com/edf-enerbat/buildsyspro	Déc. 2015	2016	v2015.12	Non
IDEAS	KU Leuven, Belgique	-	https://github.com/open-ideas/IDEAS	Sept. 2015	2013	v0.3	Oui

Tableau 1 : Liste des bibliothèques de thermique du bâtiment sur Modelica

La deuxième bibliothèque en code source libre dans le domaine est sortie en 2008. C'est la bibliothèque **Buildings** (Wetter 2009; Wetter et al. 2014; Wetter, Bonvini, et al. 2015) développée au LBNL aux Etats Unis. Il s'agit de la bibliothèque la plus aboutie actuellement dans le domaine du bâtiment. Elle permet de faire de la modélisation multizone de bâtiments mais aussi de coupler la simulation multizone à un modèle de mécanique des fluides numériques de type FFD (Zuo et al. 2015). Elle intègre des modèles de qualité de l'air et de transferts aérauliques issus du logiciel *CONTAM* (Dols et Polidoro 2015). Les équations de transfert thermique au travers des fenêtres sont reprises du logiciel *WINDOW 6* (Tarcog 2006) prenant ainsi en compte les phénomènes dans chaque vitrage de façon indépendante. Elle présente un nombre très important de modèles de systèmes et de contrôleurs. Elle utilise les connecteurs "fluidPort" et "heatPort" de la bibliothèque standard de Modelica. Les "fluidPort" sont mal gérés actuellement par les logiciels gratuits ce qui fait qu'elle n'est utilisable que sous Dymola. L'un des gros avantages de cette bibliothèque est la documentation qui est très complète avec une revue des versions des modèles systématique et une réactivité des développeurs très impressionnante pour répondre aux questions des utilisateurs et corriger les bugs éventuels.

Attardons-nous maintenant sur la bibliothèque **Annex60** qui, comme précisé précédemment est issue du travail de l'annexe 60 de l'agence internationale de l'énergie et qui est incluse actuellement

dans quatre autres bibliothèques. Elle est sortie en 2013 au moment de la dynamique de mise en code source libre de 3 des bibliothèques qui la contiennent (*BuildingSystem*, *IDEAS* et *AixLib*). Une description détaillée de cette bibliothèque a été présentée à la dernière conférence internationale d'IBPSA (Wetter, Fuchs, et al. 2015). Le but était de développer, dans le cadre de l'annexe 60, une base commune servant de noyau aux bibliothèques existantes de physique du bâtiment et à l'échelle de quartiers. Un contrôle de qualité très organisé a été mis en place pour assurer la compatibilité de la bibliothèque et la robustesse de traitement des problèmes, basé sur une batterie de tests automatisés à chaque nouvelle version proposée. La bibliothèque est particulièrement bien documentée. Elle utilise le package *Media* ainsi que les connecteurs "fluidPort" de la bibliothèque standard de *Modelica*. Elle comprend à la fois des modèles de conditions aux limites (lecture de fichiers météo, calcul de température de ciel etc.), des modèles de transport de fluide (bouche d'aération, porte, etc.), des modèles de systèmes (pompes, échangeurs, émetteurs, etc.), des modèles de "Media" (air, eau), des modèles de contrôleurs ainsi que des utilitaires (mathématiques, calculs psychrométriques, etc.). Notons que cette bibliothèque est compatible avec les logiciels gratuits *JModelica* et *OpenModelica*.

La bibliothèque *BuildingSystem* développée à l'UDK de Berlin a été mise en code source libre en 2012 (Nytsch-Geusen et al. 2012) mais elle est basée sur des développements qui datent de plus de dix ans issus de la bibliothèque *BuildingPhysicsLibrary* (Nytsch-Geusen et al. 2005). Cette bibliothèque très fournie contient, en plus du cœur *Annex60*, des modèles de systèmes diversifiés (stockage de chaleur ou électrique, panneaux solaires, cogénération etc.). Elle propose également une variété importante de modèles de bâtiment avec de la modélisation 0D (permettant de réaliser des simulations à l'échelle du quartier), 1D et même 3D utilisant la méthode zonale. Un travail de visualisation 3D a également été réalisé pour observer à la fois les données d'entrée des modèles (visualisation 3D de la forme du bâtiment) et ses données de sortie (par exemple les températures dans des conduites) en utilisant des environnements de visualisation tels que *Blender* ou *OpenSceneGraph*. Une des fonctionnalités importante et originale par rapport aux autres bibliothèques est la prise en compte des transferts d'humidité au sein des parois. Actuellement, la grosse lacune de cette bibliothèque est son manque de documentation. Certaines variables sont commentées mais la plupart des modèles ne le sont pas du tout ce qui la rend difficile d'accès aux novices.

La bibliothèque *Aixlib*, dont on trouve une description précise dans (Fuchs et al. 2015), a été créée à la fois pour des besoins de recherche et d'enseignement à la RWTH Aachen University (Allemagne). Deux types de modèles d'enveloppe de bâtiment y sont disponibles : des modèles détaillés issus d'une bibliothèque qui s'appelait auparavant *HouseModels* (Constantin, Streblow, et Müller 2014) et des modèles de niveau de détail moindre transcrivant une réglementation allemande basée sur une analogie électrique (Lauster et al. 2014) qui sont particulièrement utiles pour réaliser des simulations à l'échelle de quartiers. Le modèle détaillé, réalisé à la base pour l'enseignement, a été pensé pour permettre une prise en main la plus rapide possible en présentant des exemples de bâtiments dont il suffit d'adapter les paramètres pour en simuler d'autres. L'intégration récente de la bibliothèque *Annex60* a introduit l'utilisation de modèles de composants qui existaient déjà dans *Aixlib* mais qui utilisent des "fluidPort" même si le modèle d'enveloppe du bâtiment n'utilise que des "heatPort". La partie existante contenant des systèmes HVAC a été conservée avec des connecteurs spécifiques appelés "PortMoistAir" qui utilise les "stream" mais qui n'est pas compatible avec les "fluidPort"; elle est donc amenée à être supprimée à moyen terme. La bibliothèque est assez bien documentée avec un système d'icônes spécifiant le niveau de développement du modèle avec une ou plusieurs étoiles.

La bibliothèque *IDEAS* a été développée à l'université catholique de Louvain et mise en sources libres en 2013. Une présentation en a été faite à la dernière école d'été Simurex (Reynders 2015). Elle est prévue à la base pour faire de la simulation à l'échelle du quartier avec un accent particulier mis sur la gestion des réseaux de chaleur urbains et électriques. Le modèle de bâtiment proposé est très détaillé et très bien documenté. La bibliothèque *Annex60* y est intégrée. Des connecteurs fluides spécifiques ont été développés mais ils sont compatibles avec ceux de la bibliothèque standard de Modelica. Pour la connexion entre les murs et les zones thermiques, un connecteur de type "bus" embarquant de multiples connecteurs est utilisé. Un modèle de comportement stochastiques des occupants a été implémenté sur Python pour interagir avec le modèle de bâtiment. Une deuxième bibliothèque contenant des modèles de bâtiments à un niveau de détail plus faible appelée *FastBuildings*, fonctionnant avec les logiciels gratuits *JModelica* et *OpenModelica*, a également été développée par la même équipe. Ces deux bibliothèques sont intégrées dans un ensemble logiciel plus large appelé *OpenIDEAS* (Baetens et al. 2015).

La dernière bibliothèque mise en sources libres très récemment (février 2016) est *BuildSysPro* (Plessis, Kaemmerlen, et Lindsay 2014) développée par l'équipe EnerBaT de EdF (Les Renardières, France). Cette bibliothèque développée depuis plus d'une dizaine d'années par l'équipe a été également présentée lors de la dernière école d'été Simurex (Schumann 2015) avec la volonté de fédérer les équipes de recherche françaises autour de cet outil. La prise en main de la bibliothèque est assez simple. Elle est très bien documentée (pour l'instant, une partie de la documentation est encore en français) et des documents d'autoformation sont disponibles sur son site de développement (voir Tableau 1). Un des parti-pris de cette bibliothèque était de ne pas utiliser les connecteurs de type "stream" qui peuvent poser des problèmes de convergence (Bouskela et El Hefni 2014). Les modèles sont donc utilisables avec *OpenModelica*. La bibliothèque libre ne contient pas actuellement de connecteur de type fluide ce qui peut rendre assez compliqué l'intégration de certains modèles. Les prochains développements prévus de la bibliothèque consistent à intégrer la bibliothèque *Annex60*.

3. DISCUSSION SUR L'INTEGRATION DE MODELES DANS UNE BIBLIOTHEQUE

Le choix d'une bibliothèque pour intégrer un modèle est délicat. Pour bien comprendre la démarche, nous partirons d'un exemple pour mettre en lumière les problématiques qui se posent. Il s'agira ici du modèle existant d'une fenêtre pariétodynamique (Gloriant et al. 2013) dont les caractéristiques sont proches de celui d'un modèle de mur Trombe. Le principe d'une fenêtre de ce type est de préchauffer l'air entrant dans une pièce en le faisant circuler entre les vitrages, récupérant ainsi une partie des pertes de chaleur d'un local. L'intégration de ce modèle dans une bibliothèque existante est intéressante car il fait intervenir l'ensemble des modes de transfert de chaleur et il nécessite la prise en compte d'un mouvement de fluide en son sein. Les modèles de systèmes classiques (PAC, régulation, émetteurs, etc.) posent peu de problème d'intégration si ce n'est la gestion des connecteurs, par contre, dès qu'un composant est couplé directement à l'enveloppe du bâtiment (cas de nombreux composants bioclimatiques), l'intégration est beaucoup plus complexe. Nous allons donc balayer ici, les freins qui se posent à l'intégration d'un modèle par le biais de l'exemple du modèle de fenêtre pariétodynamique

La première condition pour pouvoir intégrer un modèle est de le coder en utilisant les mêmes connecteurs que la bibliothèque qui l'accueille. Dans notre cas, le modèle doit se substituer dans le

modèle de bâtiment au modèle de la fenêtre classique mais il doit aussi se connecter à la partie du modèle qui gère le renouvellement d'air. L'idéal serait donc d'avoir un modèle de fenêtre dans la bibliothèque possédant des connecteurs qui peuvent être utilisés directement pour le modèle de fenêtre pariétodynamique. On comprend alors qu'il est plus simple d'utiliser un modèle pour lequel il est prévu à la base que la fenêtre sert au renouvellement d'air (ce qui est souvent le cas dans la réalité)

	intégration des fenêtres dans modèle de mur	Intégration des murs dans le modèle de zone thermique	Intégration directe de la fenêtre dans le modèle de zone thermique	Possibilité de renouvellement d'air par les fenêtres	Type de connecteur pour la fenêtre
Aixlib	oui	non	non (mais intégrée via la paroi avec fenêtre)	non	heatPort + conn. spéc. rayonnement
ATPlus	non	à moitié à l'intérieur, à moitié à l'extérieur	oui	non	conn. spéc. thermique + conn. spéc. rayonnement
Buildings	oui	les deux solutions sont possibles	non	non	heatPort + input/output radiosité + input gains solaires vitrages
BuildingSystem	non	non	non	oui, par l'intermédiaire de "fluidPort"	conn. Spéc. Multifonction + fluidPort
BuildSysPro	non	non	non (mais intégrée via la paroi avec fenêtre)	oui, par l'intermédiaire du "heatPort" connecté au nœud d'air intérieur	heatPort + nombreux input
IDEAS	non	non	non	non	Bus multiconnexion

Tableau 2 : Méthode d'intégration des fenêtres et de gestion du renouvellement d'air dans les différentes bibliothèques

On peut voir dans le Tableau 2, que seules les bibliothèques *BuildSysPro* et *BuildingSystem* intègrent le renouvellement d'air à leurs fenêtres. Les autres le prennent en charge autrement qu'au sein même du modèle de fenêtre. Par contre, la bibliothèque *BuildSysPro* n'utilise que des connecteurs "heatPort" ce qui va nécessiter de trouver une astuce de codage dans le modèle pour prendre en compte les apports de chaleur sur le renouvellement d'air et donc de s'éloigner un peu de la modélisation proche de la physique qui est intéressante dans le langage Modelica. Dans les autres bibliothèques, on voit que l'intégration sera moins aisée en particulier dans celles pour lesquelles le modèle de fenêtre est encapsulé dans d'autres modèles. Prenons l'exemple de *Buildings*. Pour intégrer notre modèle dans une simulation de bâtiment, il faut d'abord créer le modèle de fenêtre pariétodynamique avec les mêmes ports que le modèle "Window" et en ajoutant deux *fluidPort* (pour le flux d'air au travers de la fenêtre). Il faut ensuite créer un modèle spécifique de paroi intégrant cette nouvelle fenêtre en utilisant le modèle de paroi existant et donc en recopiant du code. Puis il faut créer un modèle spécifique de zone thermique intégrant cette paroi spécifique. On voit que ce n'est pas optimal et que ça peut poser des problèmes en termes de maintenance du code si une partie du code recopié a été modifié. L'autre solution est de modifier la bibliothèque de base avec les développeurs de celle-ci pour intégrer la possibilité d'avoir un modèle de fenêtre qui permette de sélectionner soit une fenêtre pariétodynamique, soit une fenêtre classique et de faire tous les changements nécessaires dans les classes pour l'intégrer. C'est l'option qui a été choisie par exemple pour intégrer les matériaux à changements de phase dans *Buildings*. Le souci étant que ça complexifie les codes qui sont plus difficiles à comprendre pour les futurs développeurs (ça peut rester assez simple quand même pour

l'utilisateur final). Par ailleurs, dans notre modèle, il est important de prendre en compte le rayonnement solaire qui est absorbé par chacun des vitrages de la fenêtre. Certaines bibliothèques (*Buildings, IDEAS*) prennent déjà en charge ce calcul en intégrant les équations du logiciel *WINDOW* (Tarcog 2006), les autres prennent en compte uniquement les valeurs globales du facteur solaire. Dans notre cas, il sera plus facile d'utiliser des bibliothèques intégrant ce modèle spécifique.

4. CONCLUSION

L'objectif de cet article était d'aider les développeurs de modèles dans modelica à y voir un peu plus clair dans l'ensemble des bibliothèques de bâtiment disponibles en code source libre. Nous avons donc décrit ces bibliothèques puis pointé les freins à l'intégration de modèles dans une bibliothèque en prenant l'exemple d'un modèle de fenêtre pariétodynamique.

A partir de cet exemple, on peut conclure qu'il est plus facile de s'intégrer à une bibliothèque dont les modèles sont proches de la réalité physique (un modèle de fenêtre devrait contenir des ports fluide car une fenêtre sert souvent au renouvellement d'air). On peut dire également que l'encapsulation de sous-modèles peut rendre compliquée l'implémentation d'un nouveau modèle de bas niveau car il faut parfois modifier toutes les classes de niveaux supérieurs en recopiant du code pour les intégrer (cas de la fenêtre intégrée dans la paroi, elle-même intégrée dans la zone thermique). L'utilisation de ports de la bibliothèque standard facilite également l'implémentation. Enfin, les bibliothèques existantes possèdent un panel très large de modèles que l'on peut récupérer pour servir de base à un nouveau modèle à développer (cas du modèle d'absorption solaire dans les vitrages)

5. BIBLIOGRAPHIE

- Baetens, Ruben, Roel de Coninck, Filip Jorissen, Damien Picard, Lieve Helsen, et Dirk Saelens. 2015. « OPENIDEAS -- An open framework for integrated district energy simulations. » In *Proceedings of Building Simulation 2015*. Hyderabad, India. <http://www.ibpsa.org/proceedings/BS2015/p2243.pdf>.
- Bouskela, Daniel, et Baligh El Hefni. 2014. « A physical solution for solving the zero-flow singularity in static thermohydraulics mixing models ». In *Proceedings of the 10 th International ModelicaConference*. Lund, Sweden. https://modelica.org/events/modelica2014/proceedings/html/submissions/ECP14096847_BouskelaElhefni.pdf.
- Constantin, Ana, Rita Streblow, et Dirk Müller. 2014. « The Modelica HouseModels Library: Presentation and Evaluation of a Room Model with the ASHRAE Standard 140 ». In *Proceedings of the 10 th International ModelicaConference*. Lund, Sweden. https://modelica.org/events/modelica2014/proceedings/html/submissions/ECP14096293_ConstantinStreblowMuller.pdf.
- Dols, W. Stuart, et Brian J. Polidoro. 2015. « CONTAM User Guide and Program Documentation Version 3.2 ». NIST TN - 1887. NIST. http://www.nist.gov/manuscript-publication-search.cfm?pub_id=918910.
- Felgner, F, S. Agustina, R. Cladera Bohigas, R. Merz, et L. Litz. 2002. « Simulation of Thermal Building Behaviour in Modelica ». In *Proceedings of the 2nd International Modelica Conference*. Oberpfaffenhofen (Germany).
- Fuchs, Marcus, Ana Constantin, Moritz Lauster, Peter Remmen, Rita Streblow, et Dirk Muller. 2015. « Structuring the building performance modelica library Aixlib for open collaborative development ». In *Proceedings of Building Simulation 2015*. Hyderabad, India. <http://www.ibpsa.org/proceedings/BS2015/p2202.pdf>.

- Gloriant, François, Pierre Tittlein, Annabelle Joulin, et Stéphane Lassue. 2013. « Modélisation d'une fenêtre parieto-dynamique dans la simulation thermique d'un bâtiment. » In *CIFQ 2013*. Reims (France).
- Lauster, M., J. Teichmann, M. Fuchs, R. Streblow, et D. Mueller. 2014. « Low order thermal network models for dynamic simulations of buildings on city district scale ». *Building and Environment* 73 (mars): 223-31. doi:10.1016/j.buildenv.2013.12.016.
- Nytsch-Geusen, Christoph, Jörg Huber, Manuel Ljubijankic, et Jörg Rädler. 2012. « Modelica buildingsystems - eine modellbibliothek zur simulation komplexer energietechnischer gebäudesysteme ». In *Proceeding of the Fourth German-Austrian IBPSA Conference*. Berlin (Germany). http://www.ibpsa.org/proceedings/bausimPapers/2012/BauSIM2012_149.pdf.
- Nytsch-Geusen, Christoph, Thierry S. Nouidui, Andreas Holm, et Wolfram Haupt. 2005. « A hygrothermal building model based on the object-oriented modeling language Modelica ». In *Proceedings of Building Simulation 2005*. Montréal, Québec, Canada. http://www.ibpsa.org/proceedings/BS2005/BS05_0867_874.pdf.
- Plessis, Gilles, Aurelie Kaemmerlen, et Amy Lindsay. 2014. « BuildSysPro: a Modelica library for modelling buildings and energy systems ». In *Proceedings of the 10th International Modelica Conference*, 1161-69. Lund (Sweden). https://modelica.org/events/modelica2014/proceedings/html/submissions/ECP140961161_PlessisKaemmerlenLindsay.pdf.
- Reynders, Glenn. 2015. « Towards zero-energy districts, From modelling to optimisation ». présenté à Simurex 2015, Porticcio (France), octobre 26. http://simurex.ibpsa.fr/index.php?option=com_jdownloads&Itemid=53&view=finish&cid=481&catid=68.
- Schumann, Mathieu. 2015. « Vers une plate-forme de modélisation du bâtiment au quartier multi-physiques avec Modelica et BuildSysPro ». présenté à Simurex 2015, Porticcio (France), octobre 26. http://simurex.ibpsa.fr/index.php?option=com_jdownloads&Itemid=53&view=finish&cid=481&catid=68.
- Tarcog, (Carli, Inc.). 2006. « TARCOG : Mathematical models for calculation of thermal performance of glazing systems with or without shading devices ».
- Tittlein, Pierre. 2008. « Environnements de simulation adaptés à l'étude du comportement énergétique des bâtiments basse consommation ». Thèse de doctorat, Université de Savoie. <http://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00350664>.
- Wetter, Michael. 2009. « Modelica-based modelling and simulation to support research and development in building energy and control systems ». *Journal of Building Performance Simulation* 2 (2): 143-61. doi:10.1080/19401490902818259.
- Wetter, Michael, Marco Bonvini, Thierry-Stéphane Nouidi, Wei Tian, et Wangda Zuo. 2015. « Modelica Buildings library 2.0 ». In *Proceedings of Building Simulation 2015*. Hyderabad, India. <http://www.ibpsa.org/proceedings/BS2015/p2405.pdf>.
- Wetter, Michael, Marco Bonvini, et Thierry S. Nouidui. 2016. « Equation-based languages – A new paradigm for building energy modeling, simulation and optimization ». *Energy and Buildings*. Consulté le mars 14. doi:10.1016/j.enbuild.2015.10.017.
- Wetter, Michael, Marcus Fuchs, Pavel Grozman, Lieve Helsen, Filip Jorissen, Moritz Lauster, Dirk Müller, et al. 2015. « IEA EBC Annex 60 Modelica Library – An International Collaboration to Develop a Free Open-Source Model Library for Buildings and Community Energy Systems ». In *Proceedings of Building Simulation 2015*. Hyderabad, India. <http://www.ibpsa.org/proceedings/BS2015/p2414.pdf>.
- Wetter, Michael, Wangda Zuo, Thierry S. Nouidui, et Xiufeng Pang. 2014. « Modelica Buildings library ». *Journal of Building Performance Simulation* 7 (4): 253-70. doi:10.1080/19401493.2013.765506.
- Zuo, Wangda, Michael Wetter, Wei Tian, Dan Li, Mingang Jin, et Qingyan Chen. 2015. « Coupling indoor airflow, HVAC, control and building envelope heat transfer in the Modelica Buildings library ». *Journal of Building Performance Simulation*, juillet, 1-16. doi:10.1080/19401493.2015.1062557.

Vers les simulations plus précises des transferts hygrothermiques dans les matériaux fortement hygroscopiques

Thomas Busser*¹, Mickael Pailha¹, Amandine Piot², Monika Woloszyn¹

¹ LOCIE, Université Savoie Mont Blanc - CNRS, UMR5271, F-73375 Le Bourget du Lac, France

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

CEA-LITEN F-38054 Grenoble, France

* thomas.busser@univ-savoie.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. La caractérisation des matériaux se fait habituellement avec des mesures en régime permanent ce qui n'est pas en accord avec les charges hydriques d'un bâtiment. Ce point pourrait fournir des éléments d'interprétation des différences entre les simulations et les mesures décrites dans la littérature. La méthode expérimentale présentée ici propose une caractérisation dynamique d'échantillon à l'échelle du matériau. Les résultats expérimentaux sont ensuite comparés aux des simulations hygrothermiques.

MOTS-CLÉS : Matériaux hygroscopiques, modèle hygrothermique, comparaison expérimentale.

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. Their characterization is usually made using steady-state measurements, while real hygrothermal loads in buildings are always dynamic. This could be one of the reasons explaining the differences between measurements and simulations reported in the literature. The experimental approach presented here, provides a dynamic characterization of samples at the materials scale. The measurements are then compared with hygrothermal simulations.

KEYWORDS : hygroscopic material, hygrothermal modelling, experiments

1. INTRODUCTION

Dans un contexte de durcissement des réglementations thermiques, et de l'objectif de la limitation de l'échauffement de l'atmosphère à 1.5°C, la prise en compte de l'humidité et des transferts couplés chaleur/humidité négligés jusqu'à maintenant peut devenir important. En effet le niveau de l'humidité relative peut influencer la performance énergétique du bâtiment, l'ambiance intérieure (confort hygrothermique et qualité de l'air intérieur) et la durabilité des matériaux. Il apparaît donc nécessaire de pouvoir prédire le comportement hygrothermique des parois.

Ainsi l'utilisation de matériaux hygroscopiques devient importante de par leur capacité à améliorer le confort thermique, la qualité de l'air intérieur [Hameury 2005], la consommation énergétique [Raji, 2006] et surtout la régulation de l'humidité intérieure dans les bâtiments [Rafidiarison, 2012]. Cet effet « tampon » hydrique des matériaux hygroscopiques a fait l'objet de nombreuses études, surtout sur les matériaux bois ou à base de bois [Hameury 2005] [Medjelekh et al, 2014].

Les études numériques du comportement hygroscopique de matériaux et de parois sont de plus en plus utilisées par les chercheurs pour prédire le transport d'humidité et étudier l'influence à l'échelle du bâtiment. Afin d'être validé les modèles doivent être comparés à des mesures expérimentales. Actuellement cette comparaison semble incomplète car des différences subsistent, notamment pour les matériaux fortement hygroscopiques. Cet article présente une première étape vers l'amélioration de cette confrontation en proposant une méthode de mesure dynamique des propriétés des matériaux à comparer avec un logiciel commercial.

2. ETAT DE L'ART DE LA MODELISATION DU COMPORTEMENT HYGROTHERMIQUE

2.1. EQUATIONS DES TRANSFERTS COUPLES

Pour décrire les transferts de chaleur et d'humidité, le matériau est supposé homogène, continu et indéformable. Les effets liés à la gravité sont négligés et nous supposons l'équilibre thermodynamique local entre les phases liquide, gazeuse et solide. Nous utiliserons la température (T[K]) et l'humidité relative (ϕ [%]) comme variables des équations.

L'équation de conservation de la masse d'eau (liquide/vapeur) dans le matériau s'écrit :

$$\frac{\partial w}{\partial \phi} \frac{\partial \phi}{\partial t} = -\text{div}(\vec{g}_l + \vec{g}_v) \quad (1)$$

La conservation d'énergie (enthalpie H[J]) s'exprime sous la forme :

$$\frac{1}{V} \frac{\partial H}{\partial t} = \frac{\partial (H_{solide} + H_{eau})}{\partial t} = -\text{div}(\vec{q}_{cond}) + \text{div}(\vec{g}_l \cdot C_{p,l} \cdot T + \vec{g}_v \cdot (C_{p,v} \cdot T + L)) \quad (2)$$

Avec $\vec{q}_{cond} = -\lambda(w, T) \cdot \vec{grad}(T)$ (loi de Fick/Fourier) le flux de chaleur, $\lambda(w, T)$ [W/m/K] la conductivité thermique du matériau et w [kg/m³] la teneur en eau

$\vec{g}_l = K(w) \cdot \vec{grad}(P_{succ}) + \rho_{eau} \cdot \vec{g}$ le flux de liquide avec K [s] la conductivité liquide

$\vec{g}_v = -\delta_v(w) \cdot \vec{grad}(p_v)$ le flux de vapeur d'eau avec $\delta_v(w)$ [s] la perméabilité à la vapeur

Le couplage entre transferts de chaleur et de masse peut intervenir de plusieurs manières : la température et le taux d'humidité modifient certaines propriétés du matériau : conductivité thermique et capacité calorifique, l'enthalpie de l'eau contenue dans le matériau s'ajoute au bilan énergétique d'un élément de volume (Eq. 2), on voit aussi apparaître la chaleur latente de vaporisation L .

2.2. DIFFERENTS OUTILS

Depuis plusieurs années de nombreux modèles de simulation des transferts couplés de chaleur et de masse ont été développés, certains le sont encore, afin d'optimiser au mieux les performances des parois avec des matériaux hygroscopiques. Ces outils sont de plus en plus importants dans la pratique, en fournissant des indications précieuses pour des parois de plus en plus isolées et étanches à l'air.

Les principaux outils pour l'étude des transferts HAM (Chaleur, Air, Masse) dans les parois, sont les suivants : WUFI (Fraunhofer IBP en Allemagne); DELPHIN (Institut de la Climatologie du Bâtiment en Allemagne) ; BuildingPore (Université de Lorraine-France) ; HygIRC (CNRC au Canada).

Une autre stratégie d'étude des transferts couplés consiste à développer son propre code ce qui est impossible avec les logiciels précédents, pour cela les logiciels utilisés sont : Logiciel CFD [Steman,

2009], Dymola (langage Modelica) [Kedowidé, 2015], Comsol (HAMFitPlus, HAM-Lea) et Matlab/Simulink (HAMTools) [Piot, 2009].

2.3. VALIDATION EXPERIMENTALE

Ces outils ont été utilisés pour des comparaisons entre modèles [Woloszyn et Rode, 2007], qui montrent des résultats relativement proches, malgré une diversité des formulations, ou, comme nous allons l'étudier ici, validés dans des campagnes de confrontation avec des résultats expérimentaux.

L'expérience mise en place par [Rafidiarison, 2012] en conditions dynamiques contrôlées dans des enceintes climatiques pour des parois en bois, a permis de comparer le comportement de 2 modèles, Wufi et BuildingPore, vis-à-vis des résultats expérimentaux. Les 2 logiciels ont tendance à sous-estimer les transferts d'humidité par rapport à la réalité. On remarque aussi l'importance de la prise en compte de l'hystérésis pour améliorer la comparaison surtout en désorption. D'autres études sur le bois donnent les mêmes conclusions avec d'autres logiciels (Comsol, HygIRC et Wufi par exemple).

Ces difficultés de reproduction du comportement hygrothermique ont été observées pour d'autres matériaux que le bois. La confrontation des résultats de 1D-HAM, MATCH, and WUFI 2D avec les résultats expérimentaux sur des murs en ossature bois avec différents isolants (laine minérale - ouate de cellulose – sciure) obtenus par [Kalamees et Vinha, 2003] ont mis en évidence les mêmes difficultés que précédemment pour des sollicitations dynamiques.

D'autres études avec d'autres matériaux hygroscopiques (laine de verre + OSB [Piot, 2009], fibre de bois [Labat, 2012] [Kedowidé, 2015], paille, béton de chanvre, béton de bois, plâtre [Steeman et al, 2009]) ont abouti aux mêmes conclusions malgré la diversité des logiciels et des types de conditions aux limites (réelles, contrôlées, séchage, cyclique, évolution libre...)

La comparaison entre mesure et simulation pour des parois en béton [Tariku et Kumaran, 2006] et en brique montre une meilleure concordance, par rapport à aux matériaux cités précédemment.

Bien que très avancés, les modèles actuels présentent donc certaines difficultés à reproduire correctement le comportement hygrothermique des parois contenant des matériaux hygroscopiques, notamment lors de la mise en régime ou avec des sollicitations dynamiques rapides. Plusieurs interprétations sont avancées pour expliquer cela :

- la difficulté à mesurer et à prendre en compte les propriétés de transfert des matériaux (isothermes de sorption, perméabilité), ainsi que la dépendance avec la température et l'humidité [Kedowidé, 2015]
- la remise en cause de l'hypothèse de l'équilibre locale [Slimani, 2015]
- l'inhomogénéité des matériaux et des propriétés

Dans le but d'aboutir et d'implémenter des codes de simulation plus précis, une caractérisation dynamique des propriétés de transfert des matériaux est proposée ici.

3. MISE EN PLACE D'UNE ETUDE EXPERIMENTALE A L'ECHELLE MATERIAU

3.1. CONTEXTE ET POSITIONNEMENT

Des travaux précédents à l'échelle de la paroi ont permis de quantifier ces écarts, sans fournir cependant d'interprétation consensuelle. En effet, [Slimani, 2015] évoque le non-équilibre local, alors que [Kedowidé, 2015] avance l'hypothèse de la mauvaise caractérisation des matériaux en montrant

qu'une modification artificielle des propriétés permet d'améliorer la concordance entre mesure et simulation (voir figure 1). Les données expérimentales sont confrontées à un modèle numérique avec 2 types de propriétés des matériaux :

- « consensus » résultant des mesures expérimentales menées par les laboratoires partenaires. Les résultats obtenus (courbe rouge), ne reproduisent pas la dynamique de manière satisfaisante.
- « adaptés », qui donnent le meilleur accord mesure-simulation (courbe bleu clair).

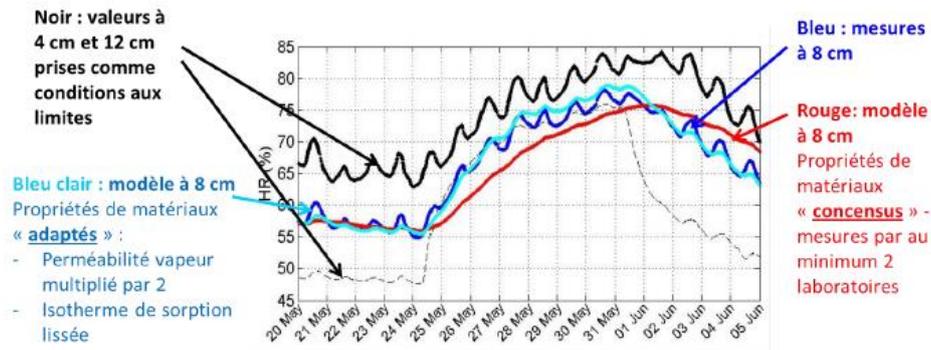


Figure 1 : Comparaison mesure-simulation effectuée dans le projet Hygro-bat, sur une paroi en fibre de bois [Kedowidé, 2015][Hygrobat, 2015]

Ceci nous conduit donc à remettre en cause les méthodes habituelles de caractérisation des matériaux en régime stationnaire. En effet, cela semble contradictoire avec le fait que les parois de bâtiments sont soumises à des sollicitations dynamiques. C'est pourquoi nous proposons ici une étude à l'échelle matériau associant simulation hygrothermique et mesure expérimentale en régime dynamique permettant la mesure simultanée de l'humidité relative et de la teneur en eau massique de l'échantillon.

3.2. DISPOSITIF EXPERIMENTAL

Le but de l'étude expérimentale présentée ici est d'étudier les transferts d'humidité dans le matériau grâce à une méthode dynamique. Ceci nous servira à extraire les propriétés hygrothermiques afin d'améliorer la comparaison mesure-simulation.

La méthode expérimentale utilisée est une expérience de laboratoire à l'échelle matériau qui doit être suffisamment précise, facilement interprétable, répétable. L'expérience présentée sera utilisée pour étudier du bois massif, et dans un premier temps, la méthode sera testée sur la fibre de bois qui permet des transferts d'humidité plus rapides que le bois (quelques semaines contre quelques mois).

3.2.1. Banc expérimental

Pour réaliser cette expérience nous utiliserons une double enceinte climatique du LOCIE, reliée par un sas, que l'on peut contrôler en humidité relative et en température, appelé RH-Box (figure 2). La régulation en température dans les enceintes se fait grâce à un bain thermostaté qui permet de faire circuler l'eau dans un échangeur à l'intérieur de l'enceinte. Sur le bas de l'enceinte se trouvent des bacs de stockage contenant des solutions salines à saturation qui peuvent contrôler l'humidité relative pour une température donnée lorsque le système est à l'équilibre (méthode des solutions salines saturées). Les échantillons sont placés au-dessus des solutions salines sur des grilles. Afin d'évaluer l'évolution de la masse de ces derniers, une balance de précision est disposée à l'extérieur de l'enceinte, la mesure se fait grâce à une pesée par le bas. L'humidité relative et la température seront mesurées à l'intérieur de l'enceinte.

Afin d'éviter tout changement de propriétés hygriques et thermiques de l'atmosphère de l'enceinte, la manutention des différents échantillons se fait par l'intermédiaire des gants de la boîte à gants. Un double sas permet d'introduire ou de retirer les échantillons tout en limitant les perturbations du système.

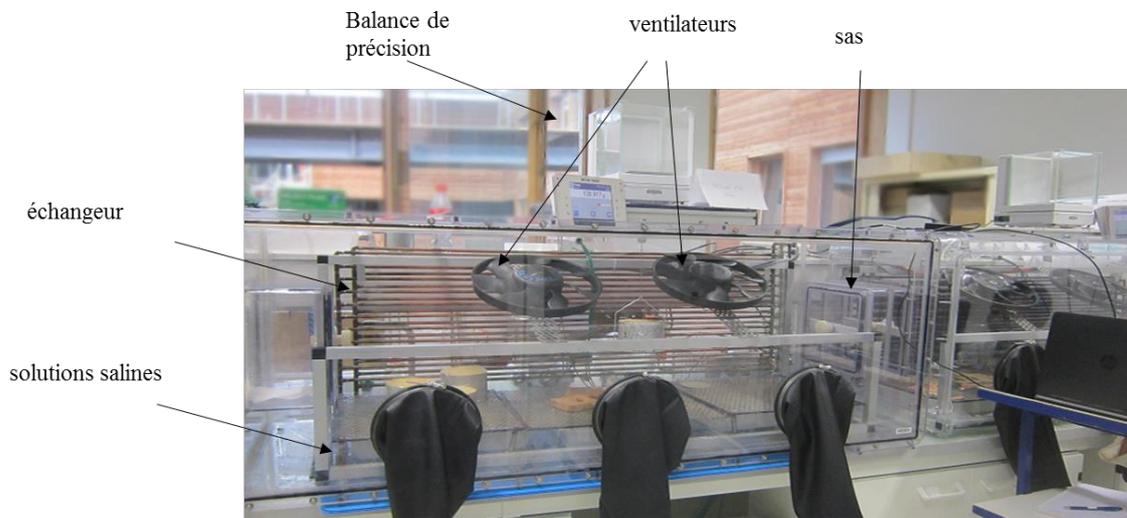


Figure 2 : RH-Box : la double enceinte climatique régulée en température et en humidité relative

3.2.2. Matériau testé

Le matériau choisi pour cette étude est l'isolant en fibre de bois. Les échantillons d'isolant proviennent du même lot de fabrication que ceux utilisés pour le projet Hygro-bat, cité précédemment, afin de bénéficier des étapes de caractérisation du matériau par plusieurs laboratoires.

3.2.3. Échantillons et capteurs

Le capteur permettant la mesure de l'humidité relative et la température à l'intérieur de l'échantillon et de la RH-Box est une HygroPuce de marque Waranet avec une précision de $\pm 2\%HR$ et $\pm 0.5^\circ C$. Ce capteur sans fil, permettant un stockage de données suivant le pas de temps choisi, mesure 0.6cm d'épaisseur et 1.6cm de diamètre. Sa taille est donc non négligeable, nous avons donc dû adapter les dimensions des échantillons à tester afin de limiter la perturbation par le capteur. Pour cela les échantillons testés sont circulaires de diamètre 10 cm et d'épaisseur 8cm.

Nous étudierons les transferts d'humidité qui s'effectuent par le haut du matériau, pour cela les surfaces latérale et du bas seront recouvertes de scotch aluminium, collé sur épaisseur de joint acrylique blanc, pour empêcher les transferts. Afin de mesurer la diffusion dans le matériau, il faut placer des capteurs à l'intérieur des échantillons, pour cela l'épaisseur totale de certains échantillons sera divisée en plusieurs morceaux avec un capteur sur le bas de chaque partie. Nous testerons donc différentes configurations (voir figure 2) : 1 seul capteur en bas, 2 capteurs : 1 au milieu et 1 en bas et 3 capteurs : 1 en bas, 1 à 1/3 et 1 à 2/3 du bas. Nous testerons 7 échantillons en totalité, mais dans la suite les résultats de 3 échantillons seront présentés.



Figure 3 : Fibre de bois : différentes configurations (gauche), avec scotch aluminium (droite)

3.2.4. Protocole expérimental

La méthode expérimentale présentée dans cet article est inspirée des travaux de [Perré et al, 2015]. Cette mesure en régime dynamique consiste à appliquer un échelon d'humidité relative aux échantillons et à mesurer l'humidité relative grâce aux capteurs et la prise de masse des échantillons en effectuant des pesées régulières grâce à la balance précise au milligramme.

Pour cela les échantillons sont d'abord conditionnés et séchés dans une étuve à 70°C pendant 1 semaine. L'humidité relative à l'intérieur de l'étuve (mesurée par une hygropuce) et donc dans le matériau à la fin du séchage, est d'environ 10%. Après cette étape, l'échantillon est soumis à un échelon d'humidité relative dans une enceinte régulée à 33% (solution de MgCl₂). L'échantillon est pesé régulièrement et l'humidité relative mesurée en continu à l'intérieur.

4. SIMULATION

La simulation du comportement hygrothermique sera comparée avec les résultats expérimentaux.

4.1. LOGICIEL UTILISE

Le logiciel utilisé comme benchmark est le logiciel Wufi, largement validé et utilisé pour simuler le comportement hygrothermique de matériaux ([Kalamees&Vinha, 2002] [Rafidiarison, 2012]). L'avantage principal de ce logiciel commercial réside dans sa simplicité d'utilisation. Il permet, à partir des paramètres d'entrée, de simuler en 1D la température et l'humidité en tous points des produits constituant la paroi. Il a été développé par le Fraunhofer IBP, les équations gouvernant le logiciel sont celles développées par [Künzel, 1995], avec la température et l'humidité relative comme potentiels. Le transport d'humidité dans un matériau poreux est dû à la diffusion de vapeur, au transport de liquide et à la conduction capillaire. L'écoulement d'air et l'hystérésis de l'isotherme de sorption, c'est-à-dire une différence entre adsorption et désorption, ne sont pas pris en compte.

4.2. CHOIX DES PARAMETRES

Conditions aux limites et initiales : Les surface latérale et du fond sont supposées imperméables à la vapeur d'eau, pour cela nous ajouterons une épaisseur d'air équivalente de 1000m correspondant à un revêtement métallique dans Wufi. Les conditions initiales sont : HR =10%, et T = 25°C. Du fait de la mauvaise régulation dans l'enceinte, les conditions aux limites ont été choisi en analysant les données expérimentales à l'équilibre des matériaux, nous avons choisi HR = 40% et T = 22.5°C.

Propriétés du matériau : Wufi requiert les données du matériau suivantes : épaisseur de la couche, masse volumique (kg/m³), porosité (m³/m³), (capacité calorifique et variation avec température et teneur en eau (kJ/kg.K), isotherme de sorption (teneur en eau (kg/m³) = f(HR)), conductivité liquide, conductivité thermique (W/m.K) = f(teneur en eau), et perméabilité (s) = f(HR). Toutes ses propriétés ont été mesurées avec des méthodes en régime permanent pendant le projet Hygro-bat.

Position des points de mesure : Les points de mesure dans la simulation sont les mêmes que ceux de l'expérience, c'est-à-dire en bas du matériau, au milieu et à chaque tiers.

5. RESULTATS ET DISCUSSIONS

Prise de masse : Les pesées régulières des échantillons permettent de comparer la prise de masse mesurée, depuis l'état initial, aux simulations, lors de l'adsorption d'eau. La figure 4 montre que le comportement global est bien décrit par la simulation. Néanmoins on peut s'apercevoir que la

dynamique réelle est un peu plus rapide que la simulation, comme la valeur à l'équilibre qui est un peu sous-estimée.

Humidité relative : La figure 5 représente l'évolution de l'humidité relative mesurée et calculée dans 1 échantillon avec 2 capteurs. Nous observons que le logiciel sous-estime le transfert d'humidité dans la mise en régime (la pente de la courbe est plus faible dans les premières heures de l'expérience), mais décrit le bon état d'équilibre. L'écart entre la mesure et la simulation de 2 jours en moyenne. On peut voir que la différence entre les points de mesure est moins marquée qu'en simulation, la diffusion dans le matériau y est donc plus rapide.

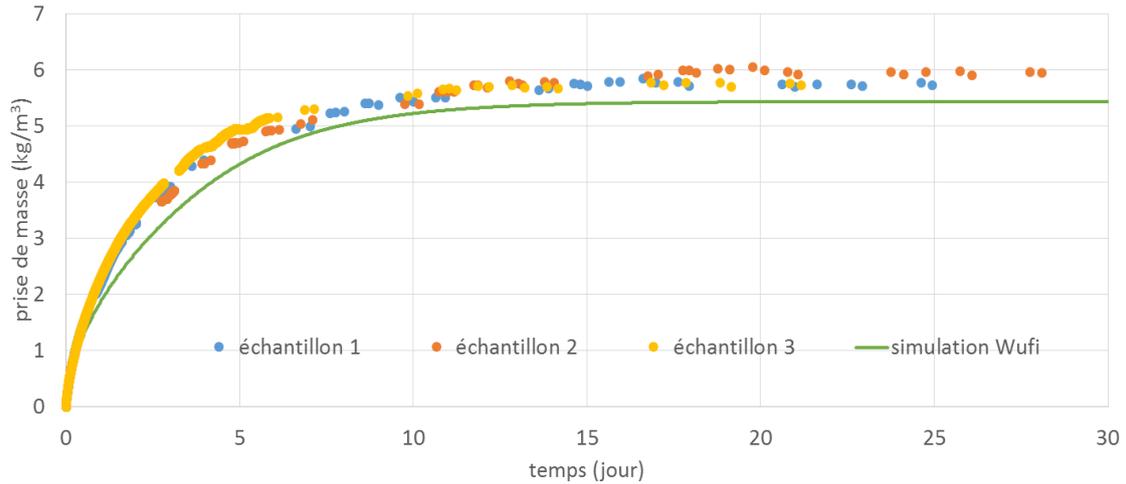


Figure 4 : Comparaison mesure – simulation : prise de masse en fonction du temps

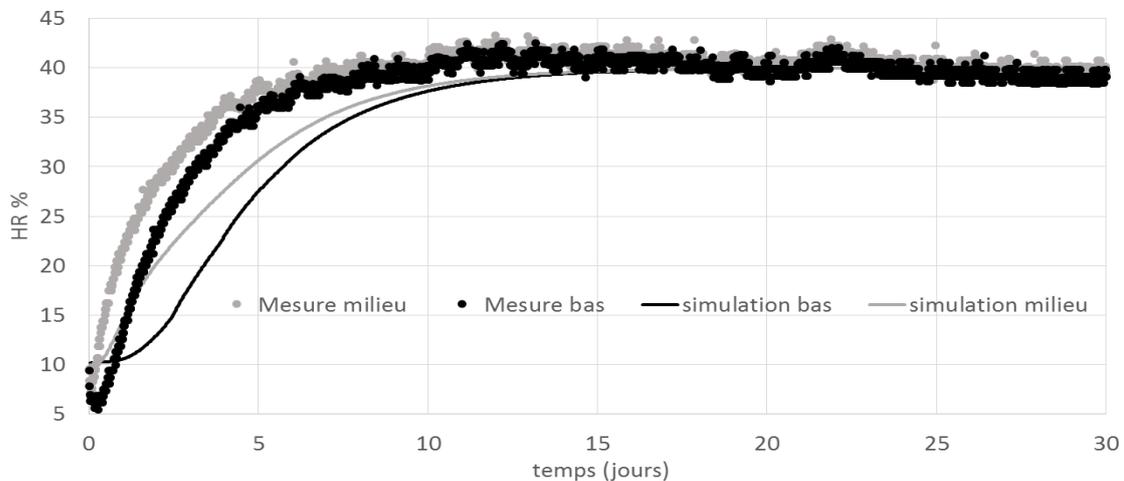


Figure 5 : Comparaison mesure – simulation : humidité relative en fonction du temps

Les résultats pour les autres échantillons donnent la même tendance. Les différences observées sont en accord avec celle observées dans la littérature. Le modèle utilisant une caractérisation du matériau en régime stationnaire n'est pas adapté pour reproduire le comportement réellement observé lors d'une sollicitation dynamique. Les propriétés qui seront déduites de cette méthode expérimentale seront la base pour le développement d'un nouveau code de simulation hygrothermique.

6. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

La méthode expérimentale développée au laboratoire a permis de confirmer les limites de la simulation avec des modèles utilisant les propriétés de matériaux hygroscopique mesurées de manière classique en régime permanent. La simulation, sous-estime la dynamique de la prise de masse et de la diffusion d'humidité à l'intérieur du matériau. Afin d'obtenir des simulations des transferts hygrothermiques dans les matériaux fortement hygroscopiques plus précises, les propriétés de transport (perméabilité, diffusivité, isotherme de sorption) seront déduites de l'expérience dynamique puis implémentées dans un nouveau code adapté à ces matériaux, à base de bois notamment, qui sera développé avec le langage Modelica.

7. REMERCIEMENTS

Ce travail est financé par l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME), l'Assemblée des Pays de Savoie (APS) et l'Université de Savoie Mont Blanc

8. BIBLIOGRAPHIE

Hameury, Stéphane. 2006. *The Hygrothermal Inertia of Massive Timber Constructions*. Stockholm: Division of building materials, Royal Institute of Technology.

Hygro-bât 2015. "Vers une méthode de conception HYGRO-thermique des BATiments performants. Rapport final. ANR-10-HABI-0005. Coord. M. Woloszyn et J. Virgone.

Kalamees, Targo, and Juha Vinha. 2003. "Hygrothermal Calculations and Laboratory Tests on Timber-Framed Wall Structures." *Building and Environment* 38 (5): 689–97.

Kedowide, Yannick-Ariel. 2015. "Analyses Expérimentales et Numériques Du Comportement Hygrothermique D'une Paroi Composée de Matériaux Fortement Hygroscopiques." Grenoble Alpes.

Künzel, H.M., "Simultaneous Heat and Moisture Transport in Building Components: One-and two-dimensional calculation using simple parameters", IRB Verlag, 1995, pp.102.

Labat, Matthieu. 2012. "Chaleur – Humidité – Air Dans Les Maisons à Ossature Bois : Expérimentation et Modélisation." CETHIL Lyon

Perré, Patrick, Florian Pierre, Joël Casalinho, and Mehdi Ayouz. 2015. "Determination of the Mass Diffusion Coefficient Based on the Relative Humidity Measured at the Back Face of the Sample During Unsteady Regimes." *Drying Technology* 33 (9): 1068–75. doi:10.1080/07373937.2014.982253.

Piot, Amandine. 2009. "Hygrothermique Du Bâtiment : Expérimentation Sur Une Maison à Ossature Bois En Conditions Climatiques Naturelles et Modélisation Numérique." INSA de Lyon.

Rafidiarison, Helisoa. 2012. "Etudes Expérimentales Des Transferts de Masse et de Chaleur Dans Les Parois Des Constructions En Bois, En Vue de Leur Modélisation. Applications Aux économies D'énergie et Au Confort Dans L'habitat." ENSTIB Epinal

Raji, Saed. 2006. "Caractérisation Hygro Thermique, Par Une Approche Multi échelle, de Constructions En Bois Massif En Vue D'amélioration énergétique et de Valorisation Environnementale." Univ. de Bordeaux 1.

Slimani, Zakaria, 2015. "Analyse expérimentale et numérique du comportement hygrothermique de parois fortement hygroscopiques", CETHIL Lyon

Steehan, Hendrik Jan, Marnix Van Belleghem, Arnold Janssens, and Michel De Paepe. 2009. "Coupled Simulation of Heat and Moisture Transport in Air and Porous Materials for the Assessment of Moisture Related Damage." *Building and Environment* 44 (10): 2176–84.

Tariku, F., and M. K. Kumaran. 2006. "Hygrothermal Modeling of Aerated Concrete Wall and Comparison with Field Experiment." In *Proceeding of the 3rd International Building Physics/Engineering Conference*, 26–31.

Woloszyn, Monika, and Carsten Rode. 2007. "IEA Annex 41, Modelling Principles and Common Exercises."

Bâtiville : conception d'un îlot urbain optimisé

Francesca CONTRADA*^{1,2}, Yacine ALLAB^{1,2}, Andrea KINDINIS^{1,2}, Christophe GOBIN^{1,2,3}, Armelle LANGLOIS^{1,3}, Eric BLANC^{1,7}, Denis OHLMANN^{1,4}, Giovanna TOGO¹, Alice COLLET^{1,5}, Anita TATTI^{2,6}, Dalila AIT ALI YAHIA^{1,3}

¹ Efficacity, FR-77447

Marne la Vallée Cedex 2,

² Université Paris-Est, Institut de Recherche en Constructibilité, ESTP

F-94230, Cachan,

³ VINCI Construction France

F-92000, Nanterre,

⁴ INGEROP Conseil & ingénierie - Région Nord-Est

F-67031, Oberhausbergen,

⁵ Université Paris-Est, Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB)

F-77420, Champs-sur-Marne,

⁶ Politecnico di Milano, Department of Energy

20156, Milano.

⁷ Setec Bâtiment

Immeuble Central Seine - 42-52, quai de la Rapée CS 71230 - 75583 Paris Cedex 12

* fcontrada@estp-paris.eu

RESUME.

Aujourd'hui, le bâtiment représente l'un des domaines les plus énergivores en Europe avec un tiers des consommations finales d'énergie. Si les bâtiments neufs sont devenus très performants sur les postes réglementaires, la maîtrise de la performance globale et la construction de « bâtiments durables » nécessitent le décodage, l'articulation et la mise en relation de plusieurs dimensions d'un système socio-économique complexe. De plus, l'analyse du potentiel d'économies d'énergie d'un îlot urbain, et d'un bâtiment, démontre que bon nombre d'actions et de décisions sont à réaliser en amont, dès la phase de programmation. Ce qui constitue la problématique du projet « Bâtiville » qui, au sein de l'institut Efficacity, vise à créer un outil d'aide à la décision et d'évaluation des programmes immobiliers. Après la définition des enjeux du système « bâtiment durable », l'article propose un état de l'art sur les méthodes de prise en compte et d'évaluation de la performance globale en amont aussi bien pour le bâtiment que pour l'îlot. Enfin l'article présente le rôle et la contribution du projet Bâtiville dans le contexte des transitions énergétiques.

MOTS-CLÉS : *performance systémique ; bâtiment durable ; optimisation de la phase de programmation.*

ABSTRACT.

Nowadays, the building sector is one of the most energy-consuming in Europe with a third of the final consumptions in energy. While the new buildings became very successful on the buildings services, the control of the systematic performance and the construction of sustainable buildings require the analysis of a complex socioeconomic issue with a number of compromises. Furthermore, the analysis of the energy saving potential of a city block, or a building, shows that a number of actions and decisions are to be realised earlier, in planning stage. This is the main issue of the project "Bâtiville" which, within the Efficacity institute, aims to create an informatics tool for decision-making support and programs evaluation. After the definition of the system "sustainable building" issues, the paper presents a state of the art on the methods which consider its performance. Finally, the present work concerns the integration of the project "Bâtiville" in the context of both energy transition and future constructions.

KEYWORDS: *systemic performance, sustainable building, programming stage optimization.*

1. INTRODUCTION

Le secteur du bâtiment représente l'un des plus gros consommateurs d'énergie : en Europe, environ un tiers des consommations finales d'énergie proviennent des systèmes d'éclairage et Chauffage, Ventilation et Conditionnement de l'air (CVC) dédiés aux bâtiments. Face à la volonté de réduire les consommations énergétiques et les émissions de gaz à effet de serre, le bâtiment constitue ainsi un levier d'action considérable (IEA 2013).

Dans cette perspective, l'intégration des bâtiments dans le cadre du développement durable nécessite (ISO15392 2008) « *l'interprétation et la prise en compte des trois principaux aspects du développement durable — économique, environnemental et social — dans le respect des exigences des performances techniques et fonctionnelles des constructions* ». Si ces conditions sont respectées, on parle alors de Bâtiments Durables ou *Sustainable Buildings*.

Les trois piliers du Développement Durable ont été déclinés suite au Sommet de la Terre de Rio en 1992 (Sommet Planète Terre, Déclaration de Rio, 3-14 juin 1992) : **Environnemental** : cet aspect considère l'impact sur l'environnement, le gaspillage des ressources, la gestion des déchets ; **Social** : les objectifs du développement durable intègrent la lutte contre l'exclusion sociale, l'accès généralisé aux biens et services, les conditions de travail, l'amélioration de la formation des salariés et leur diversité, le développement du commerce équitable et local ; **Économique** : le prix des biens et services doit prendre en compte le coût social et environnemental de leur cycle de vie, à travers la modification des modes de production et de consommation.

Les trois aspects doivent être considérés comme étroitement interconnectés. Très souvent les objectifs du développement durable se réduisent, à tort, à la seule dimension environnementale. Dans le cadre de la conception de bâtiments, une analyse sur 243 études expérimentales, conduites durant la période (1987-2013) a montré un manque d'intégration des trois aspects : 61% concerne l'aspect environnemental contre 10% qui considère les trois aspects (Pan et Ning 2014).

En conséquence, la définition du bâtiment durable est complexe et non univoque et, en général, les trois grandes dimensions du développement durable ne sont pas toujours conciliables. Ju (Ju et al. 2016) propose une lecture des interdépendances, en termes de performance nominale, méthodologie et parties prenantes, qui peuvent amener à un compromis entre les trois grandes dimensions du bâtiment durable. Ainsi se pose la question d'adopter une approche multicritère et systémique : le bâtiment doit être considéré comme un système capable d'interagir avec l'environnement extérieur, un système dans lequel chaque composant est intégré dans un réseau de relations mutuelles. La vision du bâtiment comme un système permet d'intégrer les exigences de performance en prenant en compte les risques liés à sa dégradation. Les exigences d'un projet sont définies en amont par la maîtrise d'ouvrage (MOA) et font l'objet d'un programme fonctionnel détaillé. Selon la Loi n° 85-704 du 12 juillet 1985 (ou loi MOP – maîtrise d'ouvrage publiques) dans le programme sont définis « *les objectifs de l'opération et les besoins qu'elle doit satisfaire ainsi que les contraintes et exigences de qualité sociale, urbanistique, architecturale, fonctionnelle, technique et économique, d'insertion dans le paysage et de protection de l'environnement, relatives à la réalisation et à l'utilisation de l'ouvrage* ». Le programme est chargé de transmettre à la maîtrise d'œuvre (MOE), qui s'occupera de la conception et du suivi de la réalisation de la construction, la description des exigences sous la forme de résultats vérifiables à atteindre. Dans ce cadre la phase de rédaction du programme, revêt un rôle important

dans le processus de construction, en impliquant des conséquences pour les phases suivantes de conception et de réalisation de l'œuvre.

La prise en compte et la définition de la performance en amont demeurent donc essentielles pour la réalisation d'un projet qui vise au développement durable. Cet article a l'objectif de clarifier les enjeux et les verrous de la prise en compte de la performance dans la conception de bâtiments et d'ilots durables. Dans la deuxième section ils seront présentés les outils et les méthodes d'évaluation de la performance à échelle bâtiment et ilot ; la troisième section présente le projet Bâtiville et la méthodologie adoptée.

2. PRISE EN COMPTE DE LA PERFORMANCE A PLUSIEURS ECHELLES

2.1. PERFORMANCE A L'ECHELLE DE L'ILOT ET DU BATIMENT

L'introduction du concept de développement durable est une exigence pour la planification urbaine. Il est donc nécessaire d'appréhender et de maîtriser les impacts environnementaux, sociaux et économiques des projets. Une des difficultés dans le processus de prise de décision visant à la programmation l'échelle de l'ilot, réside dans la définition et l'analyse de l'impact des paramètres qui rentrent dans la conception : les frontières ; la compacité (pour assurer une densité durable et limiter son impact sur le territoire) ; la mixité fonctionnelle (pour limiter les déplacements, faciliter les échanges et améliorer la qualité de vie) ; les connections avec le voisinage et la ville ; la géométrie urbaine et le microclimat (rayonnement solaire, vents et lumière naturelle, par exemple) (Yepez-Salmon 2011). Chaque paramètre influence les trois dimensions du développement durable et génère une difficulté d'interprétation et d'intégration dans des modèles d'évaluation de la performance. D'un point de vue énergétique et environnemental, la prise en compte de l'échelle du quartier est essentielle : en considérant l'ilot dans sa globalité, il est possible de mieux maîtriser et d'améliorer son fonctionnement en réseaux énergétiques intelligents, interconnectés à la ville. Cela pourrait permettre de : a) mieux équilibrer la demande et la production énergétique ; b) utiliser le potentiel énergétique local pour réduire l'exploitation des ressources carbonées et le gaspillage des ressources naturelles ;

Une définition plus concrète des composants et paramètres du projet, à l'échelle du bâtiment, facilite la mise en place d'une approche systémique. L'étude des interactions entre l'enveloppe et le système CVC permet notamment d'optimiser les performances énergétiques en termes de chauffage, climatisation et éclairage pour un lieu donné (Méndez Echenagucia 2015). La problématique est alors de définir l'échelle pertinente pour considérer la performance à la base de la conception d'un bâtiment durable. Selon la NF EN 15643-1, la performance est définie comme : « *l'expression quantifiée d'un aspect particulier de l'objet considéré par rapport à des exigences, objectifs et/ou cibles spécifiés* ». La performance concerne un ensemble d'aspects (énergétique, de confort, économique, sociale, environnementale) qui interagissent entre eux et qui conduisent au concept de performance d'usage de type systémique, dont la maîtrise demeure complexe. L'utilisation de méthodes simplifiées demeure nécessaire pour une évaluation systémique pertinente et cohérente.

2.2. LES OUTILS DE PRISE EN COMPTE DE LA PERFORMANCE

Si on considère que l'approche envisagée dans la conception d'un projet durable est basée sur la garantie de la performance, on a, par rapport à la distinction proposée par Gowri (Gowri 2005), trois

types d'outils basés sur : a) des Règles Expertes (*Knowledge-based tools*); b) l'Évaluation de la Performance (*Performance-based tools*) ; c) des Classifications (*Rating-based tools*)

Les outils basés sur des Règles Expertes comprennent typiquement des manuels qui peuvent être utilisés comme référence pendant les premiers moments de la phase de conception. Gowri nous présente une liste des outils les plus connus de cette famille (Gowri 2005). Il s'agit de recommandations et de prescriptions sur le choix des matériaux ou des composants, et l'indication des stratégies à suivre en fonction de la zone climatique et de l'usage. L'utilisation de ces outils peut réduire les temps et faciliter la prise de décisions concernant le projet mais en même temps elle présente des limites : l'expérience du concepteur joue un rôle important car d'une part, il est difficile d'évaluer quantitativement la durabilité et d'autre part, ces outils n'en permettent pas une évaluation progressive et itérative de la durabilité (Russel et al. 2015).

Les outils basés sur l'Évaluation de la Performance comprennent les outils d'ACV (Analyse Cycle de Vie - qui comprennent des bases de données sur les méthodes et les matériaux pour estimer l'impact environnemental pendant le cycle de vie) et les outils de simulation énergétique et d'environnement intérieur. Ces types d'outils permettent d'évaluer plus finement la performance de plusieurs solutions de conception à travers un processus itératif. Ils présentent des limites au plan des bases de données, de la définition des frontières du système, de maîtrise d'une performance spécifique (énergie, économie, environnement, confort) et par rapport aux compétences en jeu. Les utilisateurs non spécialisés peuvent rencontrer des difficultés d'intégration des outils de simulation dans le processus de conception ; Attia définit les barrières possibles à cette intégration (Attia et al 2012). Negendhal souligne le problème d'interopérabilité (conflits, compromis, objectifs) entre différents corps de métiers (architectes et ingénieurs) et l'intégration des deux approches et de modèles de nature différente (géométrique et de simulation) au début de la conception (Negendhal 2015). En général, la finesse des résultats de ces outils, impose la claire définition des composants du projet (aussi en termes de matériau) et une bonne maîtrise des données d'entrées (extérieures et d'usage). L'utilisation de ces outils est plutôt prévue dans une phase avancée de la conception comme outils de validation ou de correction du projet en fonction de la performance (Harputlugil et Hensen 2006).

La dernière famille d'outils, déclinés par Gowri (Gowri 2005), comprend plusieurs méthodes de Classification présentes au niveau international. Il s'agit d'une matrice ou une feuille de calcul pour identifier des critères de conception permettant d'avoir des notes pour chaque critère et un poids total ainsi qu'une quantification de la durabilité du projet. Un bon nombre de ces outils ont aussi une valeur de certification en ayant un impact sur le marché de la construction et une valence économique. Un des problèmes est, en fait, la compréhension et la justification des avantages économiques, en termes de consommations et d'impact environnemental, vis-à-vis des coûts d'investissement et de certification (Giama et Papadopoulos 2012). Giama et Papadopoulos passent en revue les principaux outils de certification comme le *LEED (Leadership in Energy and Environmental Design)* développé en Amérique du Nord en 1998, le *BREEAM (Building Research Establishment Environmental Assessment Method)*, conçu en Royaume-Uni en 1990, et l'*HQE (Haute Qualité Environnementale)* français du 1994 ; ils en soulignent les aspects, la structure et le domaine d'application. De manière générale ces outils présentent des approches et des buts communs par rapport aux piliers du DD ; par rapport aux références normatives utilisées par les outils, on retrouve la tendance, selon les pays, à

utiliser son propre outil de certification et un manque d'homogénéité au niveau international (Wei et al 2015, Giama et Papadopoulos 2012, Harputlugil et Hensen 2006, Rezaallah et al. 2012).

2.3. LES METHODES SIMPLIFIEES D'EVALUATION DE LA PERFORMANCE

Dans le cadre des outils disponibles, l'évaluation de la performance systémique d'un projet durable recourt à des méthodes simplifiées, plus ou moins complètes, intégrant les informations venant des trois familles d'outils. Ratti (Ratti et al. 2005) analyse les enjeux et les problèmes relatifs à la géométrie urbaine pour intégrer les informations et les contraintes du site de manière très fine. Il propose une approche de modélisation rapide qui se base sur un modèle DEM (*Digital Elevation Model*) qui lie une image du site 2D à des informations altimétriques pour obtenir rapidement un modèle 3D. Ce modèle peut être couplé à des méthodes de simulation énergétique des aires urbaines pour en évaluer la consommation. Lotteau (Lotteau et al. 2015) propose un outil d'ACV à l'échelle du quartier : NEST (*Neighbourhood Evaluation for Sustainable Territories*). Il s'agit d'un "plug-in" de *Trimble SketchUp*, un logiciel de modélisation 3D utilisé par les architectes et les urbanistes. Le "plug-in" permet, à travers des indicateurs environnementaux (énergie, CO₂, perte de biodiversité, déchet, qualité de l'air et eau) et socio-économiques (satisfaction des usagers et coûts d'investissement du projet), d'obtenir des résultats quantitatives en termes d'ACV de l'ilot sur un plan de masse 3D. Moschetti (Moschetti et al. 2015) propose une méthodologie pour l'évaluation de l'énergie totale, de l'impact sur l'environnement et des coûts globaux d'un bâtiment durable en couplant outils d'ACV, d'ACCV et simulation énergétique dynamique, en soulignant aussi des problèmes de standardisation de paramètres et de critères considérables. Markelj (Markelj et al. 2014) a élaboré une méthode simplifiée pour l'évaluation de la durabilité d'un bâtiment (SMEBS), à travers des critères qui intègrent les méthodes existantes (BREEAM et LEED) hiérarchisés à travers un processus analytique. Les critères mesurables peuvent être estimés à l'aide de logiciels simples fournis, par exemple, par le fournisseur de produits (Velux Daylight Visualiser ou Isover Multi-Confort House Designer). Finalement l'évaluation est réalisée à travers des notes qui se mettent à jour en cas de changement des paramètres. Russel (Russel et al. 2015) propose la méthode du *Sustainable Target Value* qui combine les outils d'ACV, d'ACCV (Analyse des Coûts du Cycle de Vie) et de TVD (Target value design) qui se basent sur la conception intégrée et le coût des alternatives possibles. Le modèle NTNU SBP proposé par Bohne (Bohne et al. 2015) part des 5 critères (*Efficiency, Effectiveness, Impact, Relevance, Sustainability*) de l'OECD (Organisation for Economic Co-operation and Development) et développe, pour chaque critère, 7 questionnaires auxquelles il est possible de donner une note de 0 à 2 (0 = minimum demandé au niveau national ; 1 = comme 0 mais avec un potentiel différent ; 2 = le projet a l'ambition de faire la différence). Cette méthode permet d'évaluer la performance des cas d'études et d'identifier des perspectives.

3. LA NECESSITE D'UN NOUVEL OUTIL : LA DEMARCHE DE BATIVILLE

Si la qualité de la construction se base sur des exigences de performance, alors elle est aussi strictement liée à l'interprétation des attentes du programme. La définition de la performance visée en phase de programmation et son évaluation *ex ante* dans les premiers moments de la conception sont donc des étapes essentielles. Cette phase est particulièrement importante car, à travers différents scénarios et proposition de variantes, les avantages et les contraintes, qui concernent les aspects environnementaux, socio-économiques et financiers, sont établis (Nault et al. 2015).

Un programme fonctionnel s'inscrit dans la perspective d'un *commissioning* contractuel, qui permet de vérifier les performances en usage. L'ensemble des spécifications est articulé en deux parties : (1) regroupement de toutes les données contribuant au dimensionnement ultérieur opéré par le MOE (type d'utilisateurs, scénario d'usage, données climatiques et environnementales, contraintes administratives et urbanistiques) (2) spécification des différentes zones d'activités destinées aux différents utilisateurs finaux, avec le niveau des performances requises. Le programme s'accompagne d'un organigramme fonctionnel. Celui-ci articule les différentes zones d'activités et précise les proximités, l'enchaînement de flux ainsi que un budget prévisionnel. Par ailleurs il propose une « signature » du futur projet (mise en perspective du niveau des performances sociétales, économiques et environnementales essentielles et compréhensibles de toutes les parties prenantes) issue d'une Analyse du Cycle de Vie (ACV) (Gobin 2010).

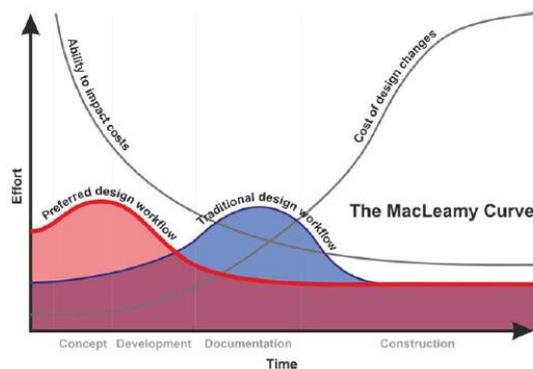


Figure 1 : comparaison entre la capacité de contrôler les coûts par rapport aux coûts d'un changement du projet, adaptation de la courbe de MacLeamy.

Si les attentes du programme ne sont pas souvent bien définies en phase de conception et de réalisation, le projet peut subir des modifications qui génèrent des retards de réalisation, une augmentation des coûts voire une dégradation de qualité de la construction. La figure 1, dite aussi courbe de MacLeamy (CUR 2004), illustre l'effet d'un changement de pratique à travers l'anticipation des risques. Les effets sur les coûts se réduisent en passant d'une approche traditionnelle, où les décisions sont prises dans les dernières phases du processus, à une approche innovante où les actions sont réalisées en amont. Il demeure alors indispensable 1) de définir clairement la performance attendue, de façon quantifiable, en amont : cela permet à toutes les parties prenantes de pouvoir prendre un engagement contractuel sans ambiguïté ; 2) de mettre en place une approche fonctionnelle intégrant les attributs performanciers pour décrire chaque espace, en fonction des besoins de l'utilisateur. (Gobin 2010). Le contexte présenté montre les avantages à l'utilisation de la méthode de l'ingénierie concurrente et, donc, la mise en place d'une approche pluridisciplinaire et de partage de compétences. Cette action peut, en même temps, résoudre les problèmes liés aux coûts de l'ouvrage et des changements en cours de route, mais aussi aider à la réussite de constructions durables et de haute performance.

Le projet Bâtiville a l'ambition de lever les verrous identifiés à travers l'optimisation du programme immobilier. Il répondra à la question du développement durable en se basant sur : les attentes et exigences de l'utilisateur, qui joue un rôle central ; un travail de diagnostic territorial, qui permet le repérage et la maîtrise des contraintes et du potentiel d'un projet ; la formulation de règles expertes provenant d'une approche pluridisciplinaire de compétences impliquées dès l'amont du

processus. A travers une méthodologie d'intégration de compétences, l'équipe de base, formée par des chercheurs, des ingénieurs, des architectes et des sociologues, interroge différents acteurs pour intégrer les règles. D'après l'état de l'art réalisé dans cet article, le projet Bâtiville devra être en mesure de dépasser les limites de : 1) prise en compte en même temps des trois aspects du développement durable ; 2) application de méthodes simplifiées pour l'évaluation de la performance ; 3) prise en compte de l'échelle de l'îlot et des contraintes du site. Cette démarche produira un outil informatique permettant une aide à la décision destinée aux donneurs d'ordres (aménageurs, collectivités, promoteurs) pour conforter un préprogramme et le rendre cohérent dans ses niveaux de performances spécifiées. Il permettra de construire un programme fonctionnel qui sera à la base d'un *commissioning* ultérieur. À partir de l'inscription territoriale du projet et au travers d'un processus itératif, l'outil vérifiera comment les hypothèses de performances peuvent être tenues ou non. Cet outil sera générique et pourra être configuré suivant le contexte particulier de chaque préprogramme (situation géographique, topographie locale, vocation, scénario d'usage, etc.). Il pourra également être utilisé par des ensembliers pour s'assurer de la validité d'un programme de concours.

4. CONCLUSIONS

L'article présente les enjeux et les verrous concernant la maîtrise de la performance des constructions durables à plusieurs échelles : îlot et bâtiment. La déclinaison des outils disponibles souligne les difficultés de prise en compte de la performance pour la pratique d'une bonne conception. Il est nécessaire d'intervenir en amont du processus de programmation, de préciser au plus tôt la définition de la performance et de travailler sur l'engagement des différentes parties prenantes. Enfin les ambitions et la démarche du projet Bâtiville pour l'optimisation des programmes immobiliers sont décrites.

5. BIBLIOGRAPHIE

- Attia, Shady, Elisabeth Gratia, André De Herde, and Jan L M Hensen. 2012. "Simulation-Based Decision Support Tool for Early Stages of Zero-Energy Building Design." *Energy and Buildings* 49. Elsevier B.V.: 2–15.
- Bohne, Rolf André, Ole Jonny Klakegg, and Ola Lædre. 2015. "Evaluating Sustainability of Building Projects in Urban Planning." *Procedia Economics and Finance* 21 (2212). Elsevier B.V.: 306–12.
- CUR - Construction Users Roundtable. 2004. "Collaboration, Integrated Information and the Project Lifecycle in Building Design, Construction and Operation" no. August: 14. <http://codebim.com/wp-content/uploads/2013/06/CurtCollaboration.pdf>.
- Giama, E, and Papadopoulos, A. M. 2012. "Sustainable Building Management: Overview of Certification Schemes and Standards." *Advanced in Building Energy Research* 6 (2): 242–58.
- Gobin, Christophe. 2010. "Reussir une construction en éco-conception. L'anticipation du cycle de vie L'exigence de chacun des acteurs" *Développement Durable*. Paris: les Presses de l'Ecole des Mines.
- Gowri, Krishnan. 2005. "Desktop Tools for Sustainable Design." *ASHRAE Journal* 47 (1): 42–46.
- Harputlugil, Gülsu Ulukavak, and Jan Hensen. 2006. "The Relation Between Building Assessment Systems and Building Performance Simulation." *Proceedings of the 6th Int. Postgraduate Research Conf. in the Built and Human Environment*, 333–43.
- IEA - International Energy Agency. 2013. *Transition to Sustainable Buildings - Strategies and Opportunities to 2050*.

- Ju, Chuanjing, Yan Ning, and Wei Pan. 2016. "A Review of Interdependence of Sustainable Building." *Environmental Impact Assessment Review* 56. Elsevier Inc.: 120–27.
- Loi n° 85-704 du 12 juillet 1985 relative à la maîtrise d'ouvrage publique et à ses rapports avec la maîtrise d'œuvre privée.
- Lotteau, Marc, Grace Yopez-Salmon, and Nicolas Salmon. 2015. "Environmental Assessment of Sustainable Neighborhood Projects through NEST, a Decision Support Tool for Early Stage Urban Planning." In *Procedia Engineering* 115. 69–76.
- Markelj, Jernej, Manja Kitek Kuzman, Petra Grošelj, and Martina Zbašnik-Senegčnik. 2014. "A Simplified Method for Evaluating Building Sustainability in the Early Design Phase for Architects." *Sustainability (Switzerland)* 6 (12): 8775–95.
- Méndez Echenagucia, Tomás, Alfonso Capozzoli, Ylenia Cascone, and Mario Sassone. 2015. "The Early Design Stage of a Building Envelope: Multi-Objective Search through Heating, Cooling and Lighting Energy Performance Analysis." *Applied Energy* 154: 577–91.
- Moschetti, Roberta, Livio Mazzarella, and Natasa Nord. 2015. "An Overall Methodology to Define Reference Values for Building Sustainability Parameters." *Energy and Buildings* 88. Elsevier B.V.: 413–27.
- Nault, Emilie, Giuseppe Peronato, Emmanuel Rey, and Marilyne Andersen. 2015. "Review and Critical Analysis of Early-Design Phase Evaluation Metrics for the Solar Potential of Neighborhood Designs." *Building and Environment* 92. Elsevier Ltd: 679–91.
- Negendahl, Kristoffer. 2015. "Building Performance Simulation in the Early Design Stage: An Introduction to Integrated Dynamic Models." *Automation in Construction* 54. Elsevier B.V.: 39–53.
- NF EN 15643-1/2010. Contribution des ouvrages de construction au développement durable - Évaluation de la contribution au développement durable des bâtiments - Partie 1 : cadre méthodologique général. AFNOR.
- NF ISO 15392/2008. Développement durable dans la construction – principes généraux. AFNOR.
- Pan, Wei, and Yan Ning. 2014. "Dialectics of Sustainable Building: Evidence from Empirical Studies 1987-2013." *Building and Environment* 82. Elsevier Ltd: 666–74.
- Ratti, Carlo, Nick Baker, and Koen Steemers. 2005. "Energy Consumption and Urban Texture." *Energy and Buildings* 37 (7): 762–76.
- Rezaallah, Anahita, Bolognesi, Cecilia, Khoraskani, Roham Afghani. 2012. "LEED and BREEAM ; Comparison between Policies , Assessment Criteria and Calculation Methods," Conference: BSA 2012 – Proceedings of the 1st International Conference on Building Sustainability Assessment, At Porto, Portugal.
- Russell-Smith, Sarah V., Michael D. Lepech, Renate Fruchter, and Allison Littman. 2015. "Impact of Progressive Sustainable Target Value Assessment on Building Design Decisions." *Building and Environment* 85. Elsevier Ltd: 52–60.
- Sommet Planète Terre, "Déclaration de Rio sur l'Environnement et le Développement Principes de Gestion des Forêts" IIIe Conférence des Nations Unies sur l'Environnement et le Développement, Rio de Janeiro, 3-14 juin 1992 Département de l'information, Organisation des Nations Unies, New York, NY 10017, Etats-Unis - DPI/1299 - Mai 1993 <http://www.un.org/french/events/rio92/rio-fp.htm>
- Wei, Wenjuan, Olivier Ramalho, and Corinne Mandin. 2015. "Indoor Air Quality Requirements in Green Building Certifications." *Building and Environment* 92. Elsevier Ltd: 10–19.
- Yopez-Salmon, Grace. 2011. "Construction D'un Outil D'évaluation Environnementale Des Écoquartiers: Vers Une Méthode Systémique de Mise En Œuvre de La Ville Durable," Thèse de doctorat, Université de Bordeaux, <http://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00011115.464>.

Évaluation des émissions de gaz à effet de serre du mix électrique de territoires insulaires

Vanessa Rakotoson^{*1}, Laetitia Adélard¹, Jean Philippe Praene¹

¹ Laboratoire de Physique et Ingénierie Mathématique pour l’Energie, l’environnement et le bâtiment (PIMENT)

Université de La Réunion, Campus Sud, 117 Avenue du Général Ailleret, 97430 Le Tampon, Réunion – France

*vanessa.rakotoson@univ-reunion.fr

RESUME. Réussir la transition énergétique est un challenge qui revêt une résonance particulière pour les zones non inter-connectées (ZNI), du fait de la forte dépendance aux combustibles fossiles dans leur mix électrique et le transport. Cette étude se focalise sur les impacts générés par la production d’électricité des départements d’outre-mer (DOM) français. L’évaluation des émissions de gaz à effet de serre (GES) a montré la contribution prépondérante de la phase de production du cycle de vie du mix électrique. Une classification a également été effectuée à partir des données socio-économiques et énergétiques afin de mettre en exergue les caractéristiques communes entre les différents territoires étudiés.

MOTS-CLÉS. production électrique, zones non inter-connectées, émissions de gaz à effet de serre

ABSTRACT. Due to the high reliance on fossil fuels in the electricity production and transport sector, to achieve the energy transition holds a particular relevance for the non-interconnected territories. This paper aims to determine the environmental influences through electricity generation of the french overseas departments. The results from the greenhouse gases emission assessment indicated that the operation phase contribution is significant. A classification based on socio-economic and environmental data was also carried out in order to point out the common characteristics among the territories.

KEYWORDS. electricity generation, non-interconnected territories, greenhouse gases emissions

1 INTRODUCTION

La consommation d’énergie dans le monde n’a cessé d’augmenter au cours des dernières décennies. Au niveau européen, la part de 80% d’énergies de combustibles fossiles dans l’approvisionnement totale en énergie primaire est proche de celle observée à l’échelle mondiale, même si la contribution du charbon est beaucoup moins importante que celle de l’essence et du gaz naturel, en faveur de l’énergie nucléaire et les sources d’énergie renouvelables (EnR) (Percebois & Mandil (2012)). Toutefois, cette moyenne masque des disparités importantes entre les pays européens. A propos de la production d’électricité, cette disparité est bien représentée en France : en

2013, le mix électrique de la métropole est dominé par 74% de production d'énergie nucléaire et d'hydraulique, tandis que les DOM français ont une moyenne de contribution de 73% de combustion de charbon et de pétrole (Ministère de L'Ecologie du Développement durable et de l'Energie - France (2015), Notton (2015), Praene et al. (2012)). Cette forte proportion d'énergie fossiles dans le mix électrique est expliquée par les inconvénients généraux auxquels les territoires insulaires sont confrontés, notamment l'éloignement (Briguglio (1995)). Les objectifs de la politique énergétique française sont désormais axés sur la transition verte de la croissance de l'énergie. Cette politique vise à parvenir à une réduction de 40% des émissions de GES par rapport à 1990 et une intégration de 40% d'EnR dans la production d'électricité jusqu'en 2030 (Ministère de L'Ecologie du Développement durable et de l'Energie (2015)).

Par rapport à ces objectifs nationaux, cette étude propose d'analyser le contexte particulier de l'insularité sur les émissions de GES de la production électrique : La Réunion, Guadeloupe, Martinique et Mayotte. A titre de comparaison, d'autres départements français seront également étudiés : La Guyane n'est pas une ZNI, mais c'est un petit territoire isolé qui ne bénéficie pas d'interconnexion au réseau. La Corse est également étudiée, dont la particularité réside sur l'interconnexion avec le continent. La première partie de cet article présentera la composition des mix électriques de chaque département sur la base de l'année 2013. Ensuite seront estimés les impacts potentiels sur l'environnement dus à la production d'électricité dans les DOM, par l'application de l'Analyse de Cycle de Vie (ACV). Les résultats obtenus dans cette section seront également exploités pour classer ces îles, combinés à d'autres variables économiques et géographiques.

2 SITUATION ÉNERGÉTIQUE

Afin d'identifier les émissions de GES, les différentes technologies qui entrent dans la production électrique de chaque territoire seront exposées dans la présente section. Dans l'étude précédente de Notton (2015), la répartition de la puissance installée des îles françaises et l'évolution de la production annuelle moyenne sur la période de 2012 ont été mises en évidence. Dans cette étude, l'année de référence 2013 a été prise en compte afin de travailler sur les données disponibles les plus récentes. La figure 1 représente la situation des îles par rapport à la France métropolitaine. Comme l'éloignement et l'isolement sont les principales caractéristiques des DOM, sauf pour la Guyane et la Corse, l'approvisionnement en combustibles se fait sur de longues distances.

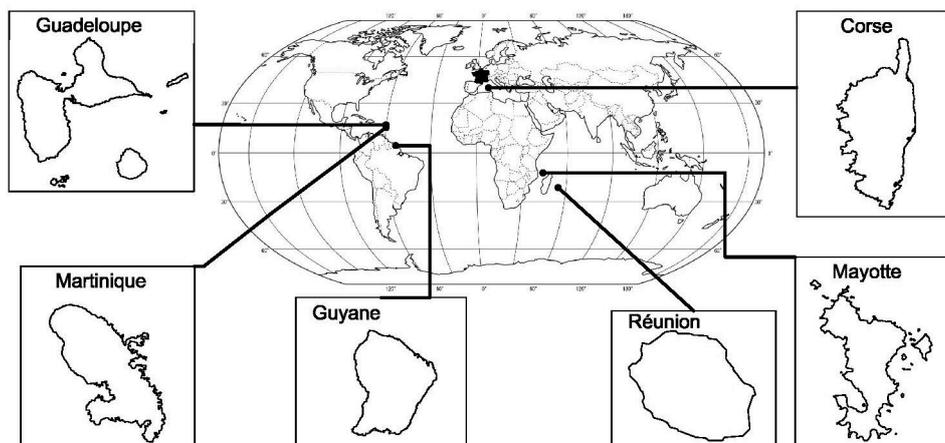


FIGURE 1. Situation géographique des différentes DOM par rapport à La France métropolitaine

Parmi les DOM, seule la Corse bénéficie de l'interconnexion au réseau continental de l'Italie et de la Sardaigne, qui contribue à 29,7% de la production électrique, les EnR et le thermique

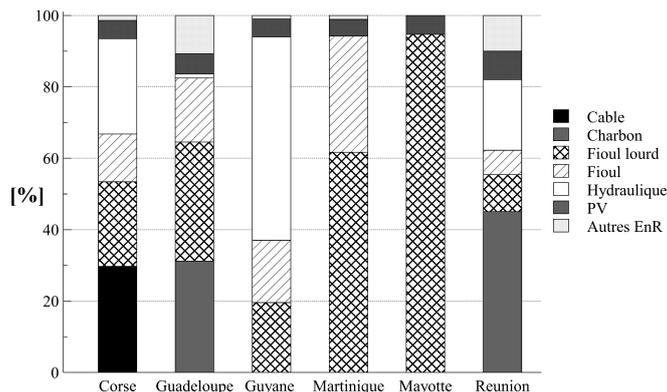


FIGURE 2. Mix électriques des départements d'outre-mers

conventionnel contribuent respectivement à hauteur de 33,2% et 37,1% (EDF-SEI (2014b)). Martinique et Mayotte présentent les mêmes proportions entre énergies fossiles et renouvelables dans leur mix électrique, respectivement environ 95% et 5% (EDF-SEI (2014c), Institution d'Emission des départements d'outre-mer (2015)). La différence entre elles deux réside uniquement sur la contribution de la production éolienne et du biogaz dans le cas de la Martinique, même si les proportions sont faibles. Avec leur fort potentiel en EnR, Guadeloupe et La Réunion diversifient leur mix, en intégrant la bagasse, le biogaz, l'hydraulique et le photovoltaïque ou encore la géothermie (Observatoire Régional de l'énergie et du climat (2014) SPL Energies Réunion (2015), Praene et al. (2012)). Malgré cela, la part d'EnR de la Guadeloupe égale près de la moitié de celle de La Réunion (17,5% et 37,8%). La Guyane reste le seul territoire qui exploite le plus d'EnR avec, notamment l'hydroélectricité qui occupe 57% de la production d'électricité totale (EDF-SEI (2014a)). La figure 2 résume la composition des mix électriques des territoires étudiés, en notant que les autres EnR regroupent la production à base de biomasse, éolien, géothermie. Ces données seront exploitées dans la suite pour l'estimation des émissions de gaz à effet de serre issues de la production électrique.

3 OUTILS ET MÉTHODES

Jusqu'à présent, plusieurs études antérieures ont exposé les résultats d'études d'ACV sur la production d'électricité pour un pays ou un territoire, pour nommer que peu : Nigéria (Gujba et al. (2010)), Mexique (Santoyo-Castelazo et al. (2011)), Tanzanie (Felix & Gheewala (2012)), Royaume-Uni (Stamford & Azapagic (2012)). Pour le cas des études sur les îles et territoires insulaires, les études se portent généralement sur la comparaison des systèmes de production au niveau de ces îles, excepté pour le cas de l'île Maurice (Brizmohun et al. (2014)). Le bilan énergétique de la Réunion (SPL Energies Réunion (2015)) de l'année 2014 propose une comparaison des ZNI français en évoquant notamment les émissions de CO₂ des 2 principaux secteurs de consommation, à savoir l'électricité et le transport. Mais les méthodes d'évaluation ne sont pas explicitement démontrées, de même pour les hypothèses prises. L'intérêt de cette étude sera donc d'apporter une évaluation de la production électrique des DOM français, à partir de notre méthodologie, qui sera applicable à tout autre territoire.

La méthodologie de l'ACV appliquée dans cette étude est basée sur les normes ISO 14040 et 14044 (International Standards Organisation (2006a,b)). Les limites de l'étude sont du berceau à la porte de la centrale : l'acquisition des matières premières, le transport inter-pays, la production d'électricité, la construction des infrastructures. La figure 3 représente les frontières de l'étude considérée pour chaque système de production inclus dans les mix électriques pour comprendre les résultats.

Relatif au cadre défini précédemment, l'unité fonctionnelle (UF) choisie est la production de

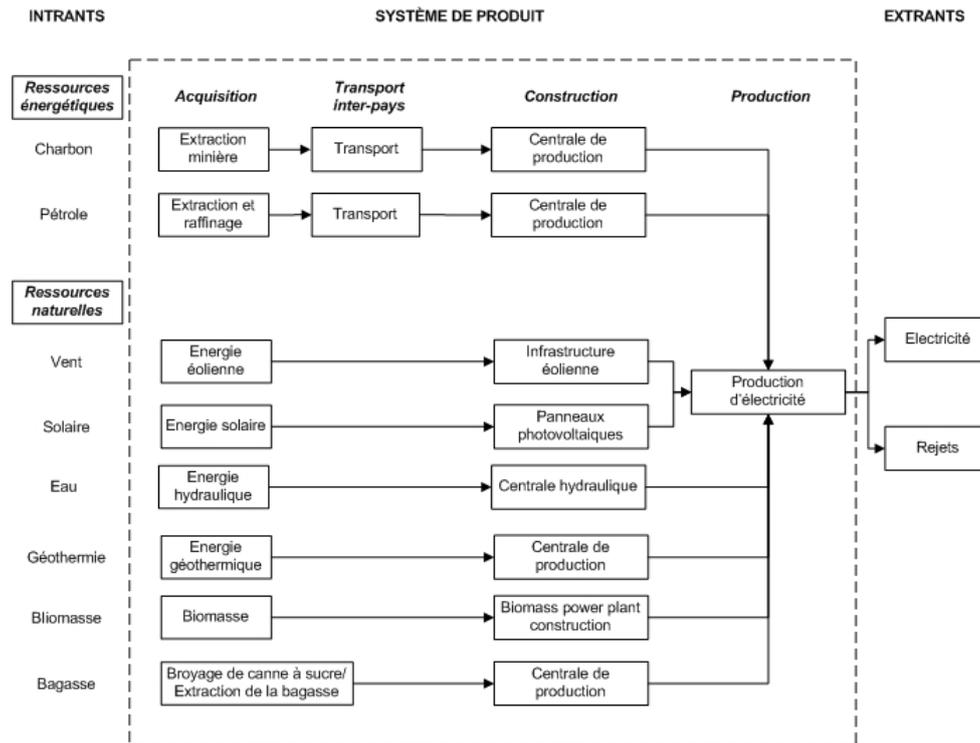


FIGURE 3. Description de la frontière de l'étude pour la production d'électricité (modifié de Gujba et al. (2010) et Brizmohun et al. (2014))

1 kWh_e^{-1} à la porte de la centrale. L'inventaire des rejets émis par la production d'électricité sera mise en relation à chaque étape du système de produit.

Pour l'évaluation de chaque catégorie d'émissions, nous nous sommes référés à la base de données du logiciel GEMIS dans sa version 4.9 (Öko-Institut (2008)) en adaptant les valeurs initiales aux caractéristiques des installations de production rencontrées pour chaque département étudié. Pour mieux représenter les émissions à chaque étape du cycle de vie de la production électrique de tout territoire, nous avons traité cette base de données avec un outil que nous avons développé sous Excel puis sous MATLAB. L'intérêt de ce traitement est d'identifier l'étape du système de production la plus émissive, pour tout territoire à étudier.

Le contexte insulaire induit naturellement une importation des combustibles fossiles pour la production thermique conventionnelle. Dans la suite, l'évaluation des émissions dues au transport se référera uniquement l'importation de ces produits, les données disponibles ne pouvant pas renseigner sur les distances de transport interne. Les données exploitées pour l'évaluation des émissions de GES pour chaque département concernent donc l'énergie produite par chaque centrale à l'intérieur du territoire, avec leur puissance et leur configuration ainsi que la distance d'approvisionnement.

4 RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

4.1 INDICATEURS ENVIRONNEMENTAUX ÉVALUÉS

Il est à remarquer que les émissions et dépenses d'énergies relatives à la consommation d'électricité pourvue par l'interconnexion de la Corse n'ont pas été comptabilisées dans cette étude, car n'a été considérée que l'électricité produite à l'intérieur du territoire corse. Les indicateurs illustrés sur la figure 4, représentent le potentiel de réchauffement global (PRG), l'acidification,

1. Dans la suite, 1 kWh_e représente 1 kWh électrique produit

ainsi que la dépense d'énergie cumulée (DEC) pour la production de 1 kWh_e mis sur le réseau avant la distribution, dans les DOM français.

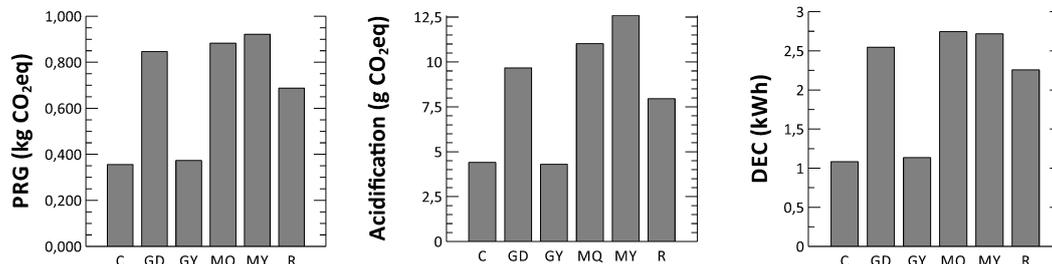


FIGURE 4. Impacts environnementaux générés pour la production de 1 kWh_e [C : Corse, GD : Guadeloupe, GY : Guyane, MQ : Martinique, MY : Mayotte, R : Réunion]

D'après la figure 4, le PRG enregistré au niveau des DOM a une valeur moyenne de 0,678 kg CO₂eq/kWh_e. D'après nos résultats, Mayotte génère la plus haute quantité de PRG avec 0,921 kg CO₂eq/kWh_e, suivi par la Martinique (0,883 kg CO₂eq/kWh_e) et la Guadeloupe (0,846 kg CO₂eq/kWh_e), s'expliquant par la forte proportion d'énergies fossiles dans leur mix électrique, comme illustré dans la figure 5-b. La Réunion enregistre une valeur médiane parmi tous les DOM étudiés avec 0,687 kg CO₂eq/kWh_e. La Corse et Guyane présentent les plus faibles émissions grâce à la contribution massive d'EnR, notamment l'hydraulique pour la Guyane, et dans le cadre de cette étude, d'après les hypothèses prises, l'interconnexion de la Corse explique également son faible taux d'émissions de GES. Elles génèrent, respectivement, 0,355 kg CO₂eq/kWh_e et 0,373 kg CO₂eq/kWh_e. Les émissions contribuant à l'acidification et la DEC présentent la même allure que le PRG, ce qui présente donc la forte corrélation entre les émissions de GES et la consommation de combustibles nécessaires à la production.

Les résultats que nous avons obtenus ne diffèrent que de peu des données que propose la comparaison des ZNI dans le bilan énergétique de La Réunion, mis à part le cas de Mayotte. Le ratio estimé par cette étude étant exprimé en équivalent CO₂, elle prend en compte également les autres types d'émissions telles que le CH₄ ou le N₂O. La différence entre les deux résultats peut également s'expliquer par la frontière de l'étude dont nous avons tenu compte, c'est-à-dire du berceau à la porte de la centrale.

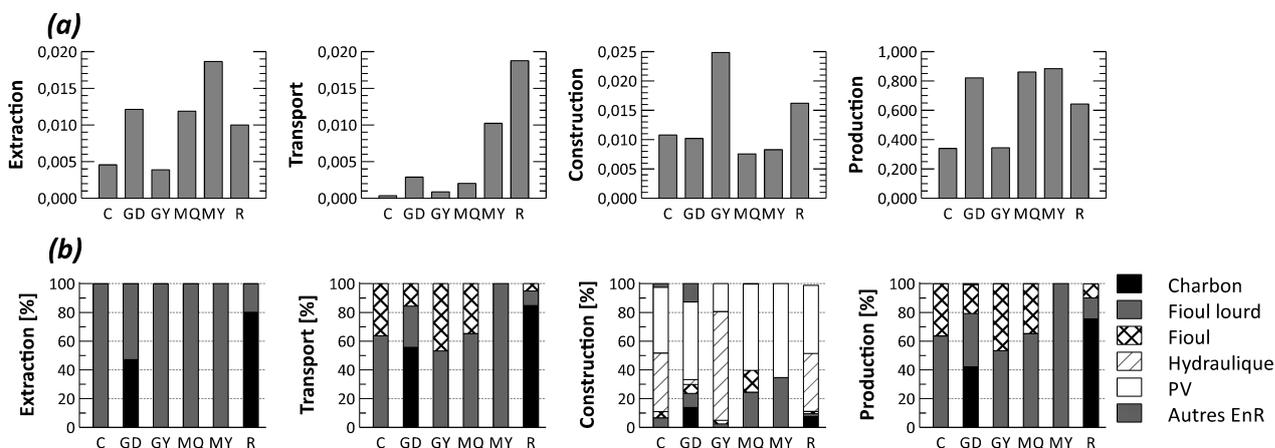


FIGURE 5. (a) PRG généré par chaque étape du cycle de vie pour 1 UF ; (b) Contribution des centrales électriques par phase

D'après la figure 5-a, par UF, on peut constater que les émissions sont imputées essentiel-

lement à la phase de production. En observant les autres étapes du système étudié, les phases d'extraction et de transport représentent principalement les émissions générées par les productions à base d'énergies fossiles. Mayotte enregistre la plus grande valeur pour l'extraction, en rapport au fort taux de produits pétroliers dans son mix électrique. On constate également que la phase de transport des combustibles de La Réunion est la plus conséquente, ce qui s'explique par son approvisionnement au charbon, suivi de Mayotte. On peut en déduire que ces deux îles sont plus isolées, par rapport aux autres départements, compte tenu de l'approvisionnement en besoins de combustibles fossiles. Bien que la Corse fait intervenir 37% de production thermique, son approvisionnement en combustible est assurée par la région PACA, ce qui minimise la part transport.

D'autre part, si pour toutes les autres étapes la Guyane enregistre le plus faible taux d'émissions par UF, nous constatons qu'elle présente le plus fort taux pour la phase de construction. Sachant que 57% de son mix électrique est assurée par la production hydraulique, nous pouvons en déduire que la mise en place de parcs hydroélectriques est plus conséquente et fortement émettrice par rapport aux autres centrales de production (figure 5-b). Les installations photovoltaïques génèrent plus de GES que celles des productions thermiques, d'après les résultats de Mayotte. Ces résultats permettent déjà d'effectuer un premier classement des îles en fonction des émissions qu'elles génèrent pour le secteur électrique. Par ailleurs, ces résultats seront utilisés dans la section suivante, dont l'objet est de regrouper les îles en fonction de leur caractéristiques communes.

4.2 ANALYSE EN COMPOSANTES PRINCIPALES

Afin de mieux appréhender la question de l'insularité, une analyse des données statistiques énergétique et socio-économique a été faite. Pour cela, nous avons eu recours à l'analyse en composantes principales (ACP) avec les variables suivantes, résumées dans le tableau 1 :

- la production électrique totale, à l'année 2013 (GWh) ;
- la densité de population (habitant/km²) ;
- le revenu annuel par habitant, PIB (€/habitant) ;
- la distance par rapport à la métropole (km) ;
- le PRG, obtenu précédemment (kg CO₂éq/kWh_e).

Pays	Densité (hab/km ²)	Distance (km)	Production (GWh)	PIB (€/habitant)	PRG (kg CO ₂ éq/kWh _e)
Corse	37	160	2235	25523	0,355
Guadeloupe	241	6700	1729	20072	0,846
Guyane	3	7000	858	15820	0,373
Martinique	338	6858	1577	22266	0,883
Mayotte	565	8000	262	7896	0,921
Réunion	335	9400	2813,4	19340	0,687

TABLE 1: Données utilisées pour l'ACP

Les résultats de l'ACP, obtenus à partir du package FactoMineR du logiciel R dédié à l'analyse des données (Lê et al. (2008)), sont résumés sur la figure 6 : l'évaluation de la qualité de la projection est représentée sur la figure 6-a, qui montre que les dimensions 1 et 2 expliquent 85% de la variance, cette projection est représentative de toutes les variables. Celles-ci sont bien représentées car elles ont un $\cos^2 > 0,600$ sur la dimension 1, exceptée la production d'électricité qui a une meilleure projection sur la dimension 2 par rapport à la première, 0,550 et 0,362 respectivement (figure 6-b). Cependant, la projection de toutes variables sur les deux dimensions totalise un $\cos^2 > 0,878$, exceptée la distance par rapport à la métropole qui a une valeur finale de 0,673 en \cos^2 . La contribution de chaque variable ou individu est un autre indicateur de la

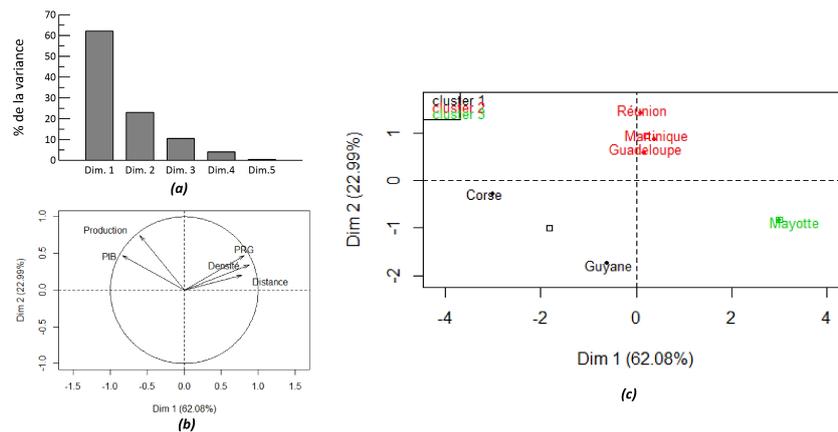


FIGURE 6. Résultats de l'ACP ; (a) Gain d'inertie, (b) Graphe des variables (c) Représentation factorielle des individus

qualité de la projection. D'après les résultats, la production contribue à 47% dans la construction de l'axe 2, par contre, pour la dimension 1, les autres variables contribuent à la même hauteur pour la construction de l'axe, 22% en moyenne. Pour l'analyse des individus, Corse et Mayotte contribuent fortement à la construction de l'axe 1, respectivement 48,81% et 48,11%. Sur le graphe des individus (figure 6-c), nous avons pu classer les îles en trois groupes. Le premier groupe correspond aux îles à forte production d'électricité et dont le PRG est assez élevé. Bien que Mayotte ait le plus fort taux de PRG, elle représente un cas particulier, dû à son faible taux de PIB par habitant par rapport aux autres. La Corse et la Guyane se regroupent par rapport à leur faible densité de population et, un faible taux d'émissions de GES ainsi qu'un PIB assez élevé. Cependant, nous pouvons remarquer que la distance entre ces points et leur barycentre est assez grande. De ce fait, les caractéristiques de cette classe ne représentent pas la Corse et la Guyane de façon pertinente.

5 CONCLUSION

Ce travail a permis à travers l'utilisation de l'ACV de développer un outil d'évaluation des émissions de GES pour la production d'électricité et des ZNI. La méthode a permis de cibler l'étape la plus émissive dans le cycle de production d'électricité. Les résultats de cette étude montrent que 95% des émissions sont imputées à la phase de production dans les centrales électriques, et que l'approvisionnement en produits pétroliers influe également sur la quantité de GES générée. L'augmentation de la part des énergies renouvelables dans le secteur électrique doit être considérée dans l'objectif de réduire les impacts environnementaux. Bien que l'augmentation de la proportion en EnR est préconisée pour réduire la quantité de GES de la production électrique, la phase de construction de chaque type d'EnR à intégrer est également à considérer, d'après les résultats que nous avons obtenus. La classification effectuée dans cette étude, a permis de catégoriser les îles, notamment regrouper La Réunion, Guadeloupe et Martinique, en un groupe auquel on pourra appliquer un même scénario de consommation électrique ; tandis que les autres îles seront traitées individuellement. Dans la suite de nos travaux, l'outil développé sera adjointe à un modèle de prévision et de proposition de scénario de production. De façon dynamique, l'ACV calculée à partir de la méthode de cette étude, sera prise comme contrainte pour l'optimisation des scénarios de production.

RÉFÉRENCES

- Briguglio, L. (1995). Small island developing states and their economic vulnerabilities. *World Development*, 23(9), 1615–1632.
- Brizmohun, R., Ramjeawon, T., & Azapagic, A. (2014). Life cycle assessment of electricity generation in Mauritius. *Journal of Cleaner Production*.
- EDF-SEI (2014a). *Bilan prévisionnel de l'équilibre Offre-Demande d'électricité - Guyane*. Technical report.
- EDF-SEI (2014b). *Bilan Prévisionnel de l'Equilibre Offre/Demande d'électricité - Corse*. Technical report.
- EDF-SEI (2014c). *Bilan prévisionnel de l'équilibre Offre/Demande d'électricité - Martinique*. Technical report.
- Felix, M. & Gheewala, S. H. (2012). Environmental assessment of electricity production in Tanzania. *Energy for Sustainable Development*, 16(4), 439–447.
- Gujba, H., Mulugetta, Y., & Azapagic, a. (2010). Environmental and economic appraisal of power generation capacity expansion plan in Nigeria. *Energy Policy*, 38(10), 5636–5652.
- Institution d'Emission des départements d'outre-mer (2015). *Rapport annuel 2014 - Mayotte*. Technical report.
- International Standards Organisation (2006a). ISO 14040 Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework.
- International Standards Organisation (2006b). ISO 14044 : Environmental management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines.
- Lê, S., Josse, J., & Husson, F. (2008). FactoMineR : An R package for multivariate analysis. *J Stat Softw*, 25(1), 1–18.
- Ministère de L'Ecologie du Développement durable et de l'Energie (2015). *La Transition énergétique pour la croissance verte*. Technical report.
- Ministère de L'Ecologie du Développement durable et de l'Energie - France (2015). *Chiffres clés de l'énergie - Edition 2014*. Technical report.
- Notton, G. (2015). Importance of islands in renewable energy production and storage : The situation of the French islands. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 47, 260–269.
- Observatoire Régional de l'énergie et du climat (2014). *Les chiffres clé de l'énergie en Guadeloupe - Bilan 2013*. Technical report.
- Öko-Institut (2008). *Globale Emissions Model of Integratede Systems (GEMIS), version 4.9*. Number August.
- Percebois, J. & Mandil, C. (2012). Contexte énergétique mondial et européen. In *Commission Energie 2050* (pp. 21–52).
- Praene, J. P., David, M., Sinama, F., Morau, D., & Marc, O. (2012). Renewable energy : Progressing towards a net zero energy island, the case of Reunion Island. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(1), 426–442.

Santoyo-Castelazo, E., Gujba, H., & Azapagic, A. (2011). Life cycle assessment of electricity generation in Mexico. *Energy*, 36(3), 1488–1499.

SPL Energies Réunion (2015). Bilan énergétique - île de La Réunion 2014.

Stamford, L. & Azapagic, A. (2012). Life cycle sustainability assessment of electricity options for the UK. *International journal of energy research*, 31, 135–147.

Éco-conception de maisons à énergie positive assistée par optimisation multicritère

Thomas Recht*¹, Maxime Robillart¹, Charles Garnier¹, Patrick Schalbart¹, Bruno Peuportier¹

¹ MINES ParisTech, PSL Research University
CES - Centre d'efficacité énergétique des systèmes
60 Bd St Michel 75006 Paris, France
[*thomas.recht@mines-paristech.fr](mailto:thomas.recht@mines-paristech.fr)

RESUME. Concevoir des bâtiments à énergie positive, à moindre impact environnemental et à moindre coût, constitue un problème d'optimisation complexe. Dans ce contexte, cette communication présente une démarche d'éco-conception de maisons à énergie positive assistée par optimisation multicritère. Illustrée sur un cas réel, cette démarche utilise un algorithme génétique pour approcher le plus efficacement possible le front de Pareto théorique, c'est-à-dire l'ensemble des solutions présentant les meilleurs compromis du problème formulé. La performance des solutions est évaluée via un modèle de simulation thermique dynamique (COMFIE), un modèle d'analyse de cycle de vie (novaEQUER) et une base de données de coûts de construction. Pour étudier la robustesse des solutions, la diversité du comportement des occupants a été modélisée de manière stochastique. La démarche proposée contribue ainsi à une aide à la décision, au-delà d'une simple évaluation par simulation.

MOTS-CLÉS : bâtiment à énergie positive, optimisation multicritère, robustesse des solutions

ABSTRACT. Designing plus energy buildings, at lower environmental impact and lower cost, is a complex optimisation problem. In this context, this communication presents an ecodesign approach assisted by multicriteria optimisation of plus-energy house. Illustrated by a real case, this approach uses a genetic algorithm to reach as much as possible the theoretical Pareto front, including solutions corresponding to the best compromise for the formulated problem. The solutions' performance is evaluated using a dynamic thermal simulation model (COMFIE), a life cycle analysis mode (novaEQUER), and a cost database. In order to study the solutions' robustness, the diversity of occupants' behaviour was stochastically modelled. The proposed approach is thus contributing to an aid in decision making, beyond simple evaluation by simulation.

KEYWORDS: plus energy building, multicriteria optimisation, robustness of solutions

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 » (BEPOS). Si une définition officielle est encore attendue, « à énergie positive » réfère généralement à un bâtiment produisant davantage d'énergie qu'il n'en consomme sur l'année. Concevoir de tels bâtiments à des coûts maîtrisés pour le marché constitue un véritable défi pour les acteurs de la filière. Une démarche d'éco-conception semble nécessaire afin d'intégrer la dimension environnementale.

L'enjeu en conception est alors d'explorer une vaste palette de solutions dans un temps limité, afin d'optimiser la performance des concepts étudiés selon des critères pouvant être antagonistes. Nous incluons dans cette étude le bilan énergétique, des critères environnementaux évalués par analyse de cycle de vie, et le coût de construction, très important pour les professionnels concernés. Les interactions entre le bâtiment, son environnement et ses occupants constituent un autre élément à étudier avec attention par le concepteur. Dans ce contexte l'approche traditionnelle, visant à appréhender la globalité du problème par de simples variations paramétriques, n'est plus suffisante. Pour répondre à ces nouveaux besoins, une démarche d'éco-conception de maisons à énergie positive assistée par optimisation multicritère est présentée dans cet article. S'inscrivant dans la poursuite de nombreux travaux existants dans cette thématique de recherche en plein essor (Attia et al. 2013 ; Evins 2013), elle utilise la notion de dominance de Pareto pour rechercher efficacement l'ensemble des meilleurs compromis à un problème multicritère (appelée front de Pareto) à l'aide d'un algorithme d'optimisation génétique.

2. METHODOLOGIE

2.1. ALGORITHME D'OPTIMISATION : NSGA-II

Les algorithmes génétiques, et en particulier l'algorithme NSGA-II (Deb et al. 2002), correspondent à une transposition informatique simplifiée de la théorie de l'Évolution de Darwin. Leur objectif est d'imiter les capacités d'une population d'organismes vivants à s'adapter à leur environnement au fil des générations. Le principe consiste à manipuler une population (constituée d'individus correspondant chacun à une solution du problème d'optimisation considéré) par l'intermédiaire d'opérateurs stochastiques pour la faire évoluer, reproduisant sommairement la génétique naturelle. Cette évolution est gérée d'une part par la *sélection*, liée à la performance d'un individu d'une population (et correspondant à la pression de l'environnement sur la population), et d'autre part par les *opérateurs génétiques* (nommés opérateurs de croisement et de mutation) qui génèrent les individus de la génération suivante. Les populations successives ainsi obtenues tendent alors à converger vers la (ou les) meilleure(s) solution(s) du problème (selon le nombre de critères d'optimisation). Dans le cadre des algorithmes génétiques, l'information (ou génome) est classiquement codée en binaire. Cela présente l'avantage de pouvoir effectuer des croisements et des mutations à l'intérieur des gènes pour accentuer le brassage génétique et élargir l'exploration de l'espace de recherche. Ces algorithmes ne reposant sur aucune propriété de continuité ou dérivabilité de la (ou les) fonction(s) à optimiser (car seule l'évaluation de la (des) fonction(s) aux points d'échantillonnage est nécessaire), ils sont particulièrement bien adaptés aux fonctions complexes telles que les logiciels de simulation énergétique dynamique.

Le principe général d'un algorithme génétique repose sur le déroulement d'une boucle générationnelle (Figure 1). Suite à la création d'une population initiale de μ individus, l'étape n° 1 consiste à détecter et sélectionner les λ individus de la population courante qui seront autorisés à se reproduire (les « parents »). À l'étape n° 2, les parents ainsi sélectionnés sont utilisés pour générer les λ descendants (les « enfants ») à partir des opérateurs de croisement et de mutation. Ces opérateurs sont appliqués aléatoirement à l'aide de deux paramètres, la probabilité de croisement p_c et la probabilité de mutation p_m . Les qualités et les performances des λ enfants générés sont évaluées à l'étape n° 3. Enfin, le remplacement (étape n° 4) consiste à engendrer la génération $n+1$ en opérant

une sélection entre les μ individus de la population courante et les λ enfants générés de manière à conserver une taille de population constante. Le processus est généralement stoppé par l'atteinte d'un nombre de générations donné, mais peut également être défini en fonction des performances atteintes par la population courante. Les algorithmes génétiques nécessitent plusieurs paramètres internes, à savoir la taille de la population courante, le critère d'arrêt, le nombre d'individus parents pour la reproduction ainsi que les probabilités de croisement et de mutation. Comme toutes les métaheuristiques, le réglage de ces paramètres est délicat et repose principalement sur des valeurs issues de la littérature ou sur l'expérience acquise progressivement.

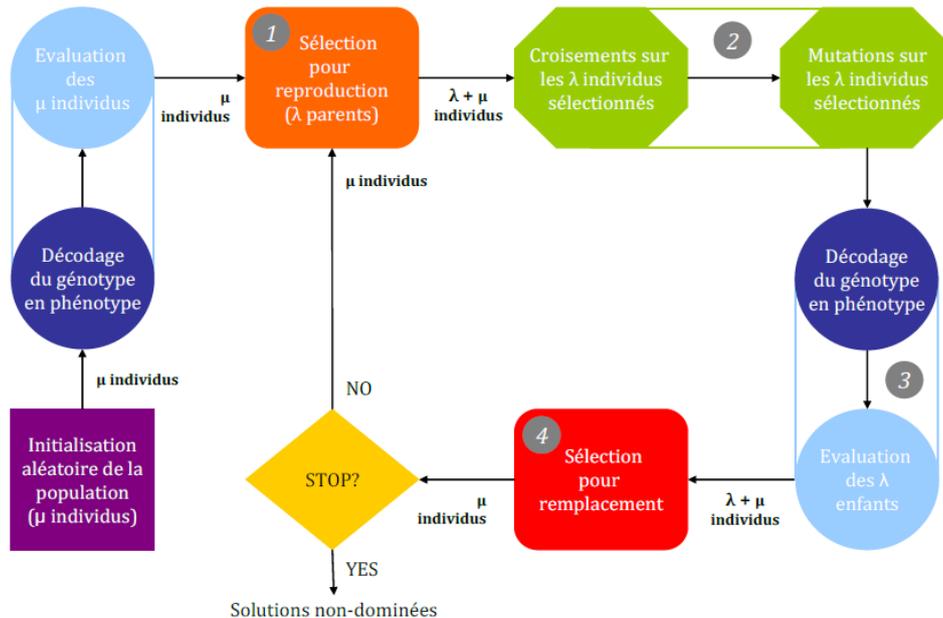


Figure 1 : Schéma de principe d'un algorithme génétique, extrait de Rivallain (2013)

2.2. EVALUATION DES PERFORMANCES

Pour concevoir des bâtiments à énergie positive, à moindre impact environnemental et à moindre coût, plusieurs modèles d'évaluation des performances sont nécessaires.

2.2.1. Modèle thermique dynamique de bâtiment

Le modèle de simulation thermique dynamique COMFIE a été utilisé dans cette étude. Ce modèle repose sur le concept de « zone thermique », sous-ensemble du bâtiment considéré à température homogène (Peuportier et Blanc-Sommereux 1990). Les principales étapes de modélisation mises en œuvre dans cet outil de simulation thermique sont le maillage de l'enveloppe du bâtiment (par la méthode des volumes finis), l'établissement d'un système linéaire continu et invariant pour chaque zone thermique, la réduction du système par analyse modale et enfin le couplage entre les différentes zones thermiques. La simulation de ce modèle nécessite de connaître les sollicitations, en particulier les émissions de chaleur par les occupants et les équipements, mais également les données météorologiques en particulier la température extérieure et le rayonnement solaire. Les phénomènes non linéaires ou impliquant des paramètres variables (ventilation externe, ventilation interne, résistance variable due à l'usage intermittent des occultations, etc.) sont pris en compte dans les sollicitations. La fiabilité du modèle a été étudiée dans le contexte des bâtiments à très haute performance énergétique (Recht et al. 2014).

2.2.2. Analyse de cycle de vie de bâtiment

Pour évaluer les performances environnementales du projet lors du processus de conception, le logiciel novaEQUER, chaîné à COMFIE, a été utilisé dans cette étude. Il permet de réaliser l'analyse de cycle de vie (ACV) d'un bâtiment ou d'un quartier, depuis l'étape de construction jusqu'à la démolition en passant par la phase d'utilisation et les étapes de rénovation (Polster 1995). La simulation du cycle de vie est réalisée avec un pas de temps annuel, et utilise la base de données *ecoinvent* pour établir un inventaire des flux puisés et émis dans l'environnement. À partir de cet inventaire, 12 indicateurs d'impacts environnementaux sont calculés, parmi lesquels le potentiel de réchauffement global des gaz à effet de serre (GES) sur 100 ans, la demande cumulative en énergie primaire sur le cycle de vie du bâtiment, ou encore l'eau consommée et les déchets produits.

2.2.3. Évaluation économique

Dans le cadre du projet COMEPOS (Conception et construction Optimisées de Maisons à Energie POSitive), le coût de construction a été retenu comme critère d'évaluation des projets. Dans cette optique, des fonctions de coût ont été construites à partir d'une base de données fournie par le constructeur partenaire Fousse Constructions. Elles prennent la forme de fonctions affines ou de fonctions polynômes du second degré. Pour des raisons de confidentialité, les coefficients associés à ces fonctions ne peuvent être communiqués.

2.3. MODELE STOCHASTIQUE DE COMPORTEMENT DES OCCUPANTS

Étant de plus en plus isolés thermiquement, les bâtiments à très haute performance énergétique sont beaucoup plus sensibles aux sollicitations externes (conditions météorologiques) et internes (usages). Cela concerne notamment les apports liés aux équipements et aux occupants, modélisés généralement par des ratios (ex. nombre de personnes par m²) et des scénarios conventionnels. Dans l'objectif de progresser vers une conception plus réaliste, un modèle stochastique d'occupation des logements (Vorger 2014) a été mis en œuvre. Calibré à l'aide de données de l'INSEE (caractéristiques socio-démographiques et enquêtes emploi du temps) et de campagnes de mesures, le modèle permet de représenter la diversité du comportement via une approche probabiliste. A chaque simulation, un ménage différent est généré selon les propriétés du logement (maison ou appartement, nombre de pièces...). Conditionnés aux caractéristiques socio-démographiques du ménage obtenu (âge, sexe, statut d'emploi, etc.), l'équipement du logement en appareils électroménagers et les scénarios d'activités des habitants sont générés, et permettent de simuler par exemple la localisation des occupants à l'intérieur du logement ou l'utilisation des appareils électro-domestiques et de l'éclairage.

À partir de quelques centaines de simulation, il est possible d'établir des scénarios d'usages moyens issus des distributions statistiques obtenues. Ces scénarios peuvent avantageusement remplacer ceux généralement fixés par des profils et des règles déterministes conventionnels. De plus, certains paramètres du modèle peuvent être manuellement renseignés, ce qui permet de générer des scénarios personnalisés correspondant plus précisément au contexte de l'étude désirée (type du logement, caractéristiques des membres du ménage, gammes de performance des équipements, etc.). Dans le cadre du projet COMEPOS, des scénarios statistiques moyens ont été générés pour des maisons présentant des appareils électroménagers et d'éclairage performants, et dont les occupants sont de type primo-accédants (typiquement un jeune couple d'actifs avec un enfant en bas âge).

3. ÉTUDE DE CAS

3.1. PRESENTATION GENERALE

À titre d'illustration, la méthodologie proposée a été appliquée lors du processus de conception d'une maison à énergie positive (MEPOS) du constructeur Fousse Constructions (cf. Figure 2). L'objectif annoncé est d'élaborer un prototype à bilan énergétique positif minimisant conjointement le coût de construction et les émissions de gaz à effet de serre en CO₂ équivalent.



Figure 2 : Maquette 3D du cas d'étude, situé proche d'Orléans (source : Fousse Constructions)

3.2. VARIABLES DE CONCEPTION

Pour explorer la performance de différents concepts de MEPOS, 11 variables de conception ont été considérées dans le problème d'optimisation. Cet espace de recherche a été établi en collaboration avec l'architecte, de manière à intégrer les contraintes et degrés de liberté du projet (cf. Tableau 1).

Tableau 1 : Espace de recherche du problème d'optimisation considéré

Paramètres	Unité	Valeur de base	Borne inférieure	Borne supérieure	Nombre de niveaux
Épaisseur de laine de verre des murs	cm	22	15	36	8
Épaisseur laine de verre en toiture	cm	22	15	36	8
Épaisseur polystyrène du plancher bas	cm	26	12	28	8
Surface de la fenêtre 1 (sud-est)	m	3	2	5	4
Surface de la fenêtre 2 (sud-est)	m	1,46	1,46	2,92	2
Surface de la fenêtre 3 (sud-ouest)	m	6,88	0	10,5	4
Surface de la fenêtre 4 (sud-ouest)	m	2,71	2,71	5,42	2
Type de vitrage en façade nord-est *	m	DV	DV	TV	2
Système de ventilation *	m	SF	SF	DF	2
Récupérateur de chaleur sur eaux grises	m	Non	Non	Oui	2
Nombre de modules photovoltaïques	m	12	1	28	16

* DV : double-vitrage, TV : triple-vitrage, SF : simple-flux, DF : double-flux.

3.3. PARAMETRES DE L'ALGORITHME

Les paramètres propres à l'algorithme NSGA-II ont été fixés aux valeurs suivantes : 400 pour la taille μ de la population courante, 400 pour le nombre λ d'individus « parents » pour la reproduction, 0,80 pour la probabilité de croisement p_c , 0,10 pour la probabilité de mutation p_m , et 20 générations pour le critère d'arrêt.

4. RESULTATS

Les informations pouvant être tirées des résultats issus d'un processus d'optimisation sont extrêmement riches. Il n'est ainsi pas possible de toutes les présenter dans cet article. Nous proposons tout d'abord d'afficher les surfaces de compromis obtenues entre le coût de construction et le potentiel de réchauffement global, puis d'évaluer les performances de l'algorithme, et enfin d'analyser les tendances observées concernant les variables de conception explorées.

4.1. FRONTS DE PARETO

Le cas de base, la population initiale, le front de Pareto de rang 1 à la 20^{ème} et la dernière génération ont été tracés à la Figure 3. Les solutions respectant la contrainte sont en ronds pleins, les autres en ronds creux. La population initiale peut être classée en deux sous-ensembles. Ceci s'explique par la prépondérance du type de système de ventilation, permettant de réduire significativement les déperditions thermiques de la maison et présentant un meilleur bilan en CO₂ malgré les émissions supplémentaires lors des étapes de fabrication et de renouvellement de l'équipement. Au sein de la population initiale, une majorité des solutions ne respecte pas la contrainte de bilan à énergie positive (cf. « non MEPOS » dans la légende), c'est pourquoi le front de Pareto obtenu se situe dans une région limitée de l'espace de recherche. Par rapport au cas de base, un surcoût économique est nécessaire pour atteindre l'énergie positive, concomitant à une réduction des émissions de GES.

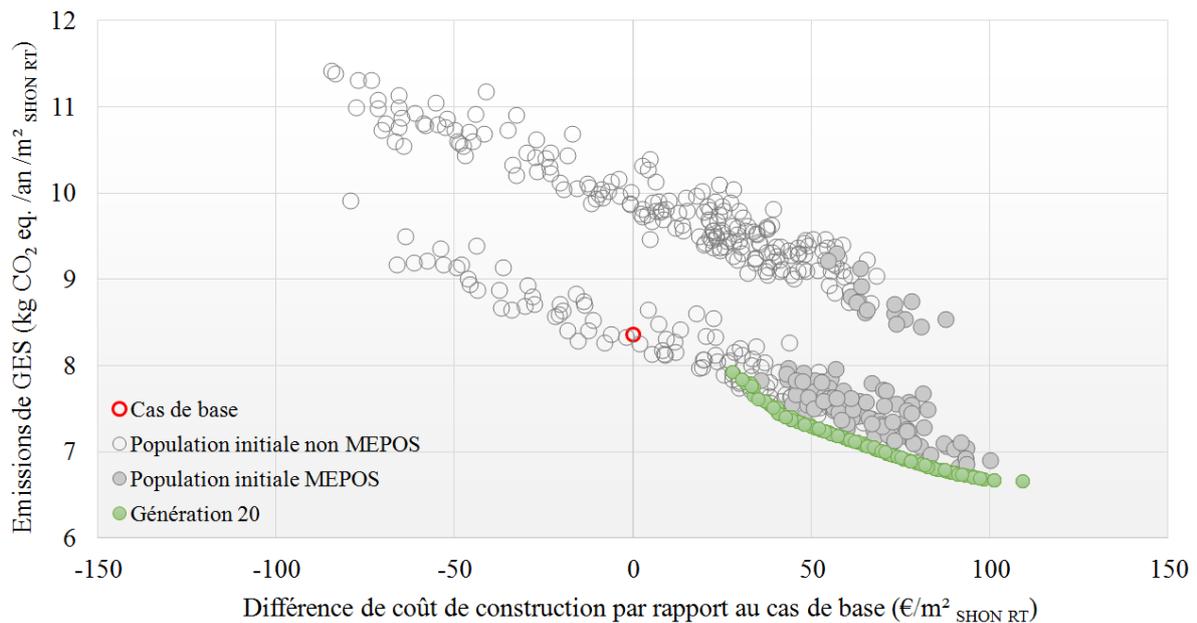


Figure 3 : Population initiale et front de Pareto de rang 1 final

La Figure 4 présente l'évolution des fronts de Pareto de rang 1 au fil des générations. Graphiquement, une progression nette du front de Pareto est observable lors des premières générations, progression qui se ralentit autour de la dixième génération. Jusqu'à la fin du processus, le front a alors davantage tendance à se densifier qu'à réellement progresser. Premier critère de sélection dans le processus génétique, le respect de la contrainte permet de disposer de solutions à énergie positive dès la génération n° 1, et a fortiori lors des suivantes.

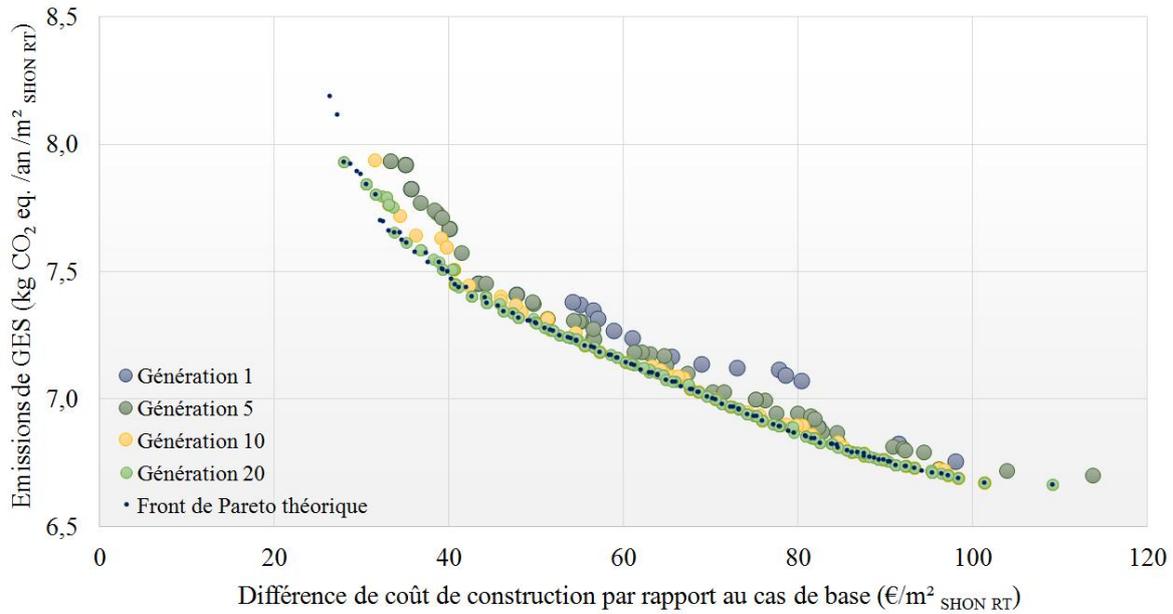


Figure 4 : Évolution des fronts de Pareto de rang 1, zoom

4.2. PERFORMANCES DE L'ALGORITHME GENETIQUE

En 8 000 évaluations et deux de calculs environ, le front de Pareto obtenu par l'algorithme génétique a convergé de manière efficace vers le front théorique (identifié ici à titre de validation, en calculant l'ensemble des combinaisons de l'espace de recherche soit 4 194 304).

4.3. TENDANCES SUR LES VARIABLES DE CONCEPTION

Il peut être intéressant d'analyser statistiquement quelles sont les caractéristiques de cet ensemble. À titre d'illustration, nous présentons à la Figure 5, les résultats concernant les équipements. Pour le photovoltaïque, la borne supérieure (28) est majoritairement représentée, et aucune solution ne dispose de moins de 22 modules (contre 12 dans le cas de base). Pour les autres équipements, les résultats mettent en évidence des solutions privilégiées, à savoir uniquement des triples-vitrages sur la façade nord-est et un système de ventilation double-flux, et quasiment jamais d'installation de récupérateur de chaleur sur eaux grises. Pour ces équipements, les résultats obtenus sont identiques à ceux du front théorique. Pour le photovoltaïque, les différences sont limitées (cf. pointillés sur la Figure 5).

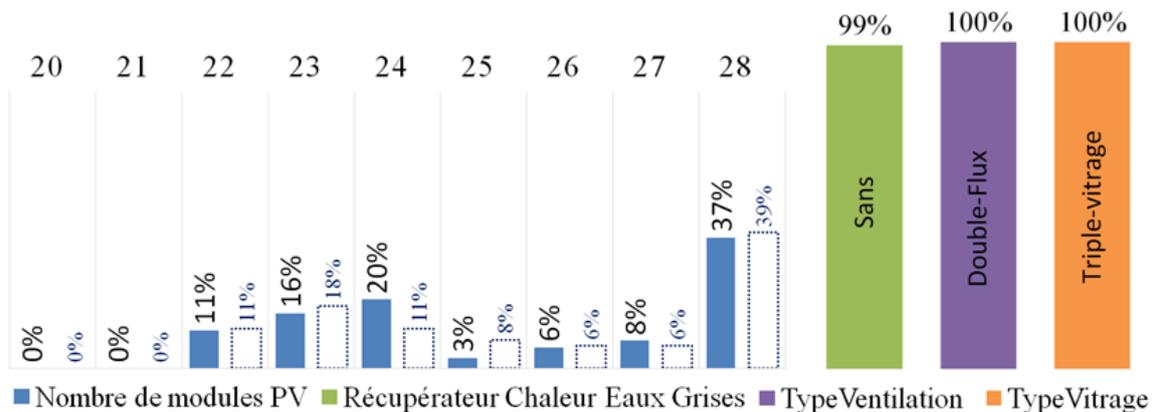


Figure 5 : Caractéristiques des fronts de Pareto obtenu et théorique concernant les équipements

5. CONCLUSION

Une démarche d'éco-conception de maisons à énergie positive assistée par optimisation multicritère a été développée à l'aide d'un modèle énergétique (COMFIE) et d'un modèle environnemental (novaEQUER) de bâtiments. Elle met en œuvre un algorithme génétique NSGA-II pour identifier les meilleurs compromis d'un problème multicritère, et exploite un modèle stochastique de comportement des occupants pour disposer de scénarios d'usage plus réalistes. La méthodologie proposée a été appliquée sur l'un des prototypes de maisons à énergie positive du projet COMEPOS. À titre d'illustration, les résultats de l'optimisation visant à minimiser conjointement le coût de construction et les émissions de CO₂ équivalent, sous une contrainte d'un bilan énergétique positif, ont été présentés, montrant une surface de compromis dont l'analyse des caractéristiques permet d'extraire un ensemble d'informations utiles pour alimenter le processus de prise de décisions. Dans un temps raisonnable (2 heures), l'algorithme a identifié un ensemble de solutions proches du front de Pareto théorique, confirmant sa performance déjà reconnue et esquissant la perspective de mener à l'avenir des explorations plus ambitieuses en termes de nombres de variables de conception, de niveaux de discrétisation, mais aussi de nombre de critères de performance.

Remerciements

Ces travaux ont été réalisés dans le cadre du projet COMEPOS accompagné par l'ADEME dans le cadre du programme Energies Décarbonées des Investissements d'Avenir.

6. BIBLIOGRAPHIE

- Attia, Shady, Mohamed Hamdy, William O'Brien, et Salvatore Carlucci. 2013. « Assessing gaps and needs for integrating building performance optimization tools in net zero energy buildings design ». *Energy and Buildings* 60 (mai): 110-24. doi:10.1016/j.enbuild.2013.01.016.
- Deb, Kalyanmoy, Amrit Pratap, Sameer Agarwal, et TAMT Meyarivan. 2002. « A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II ». *Evolutionary Computation, IEEE Transactions on* 6 (2): 182-97.
- Evins, Ralph. 2013. « A review of computational optimisation methods applied to sustainable building design ». *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 22: 230-45.
- Peuportier, Bruno, et Isabelle Blanc-Sommereux. 1990. « Simulation tool with its expert interface for the thermal design of multizone buildings ». *International Journal of Solar Energy* 8 (2): 109-20. doi:10.1080/01425919008909714.
- Polster. 1995. « Contribution à l'étude de l'impact environnemental des bâtiments par analyse du cycle de vie ». Thèse de doctorat, Ecole des Mines de Paris.
- Recht, Thomas, Fabio Munaretto, Patrick Schalbart, et Bruno Peuportier. 2014. « Analyse de la fiabilité de COMFIE par comparaison à des mesures. Application à un bâtiment passif ». *IBPSA France*, 20-21 mai 2014, Arras, France.
- Rivallain, Mathieu. 2013. « Etude de l'aide à la décision par optimisation multicritère des programmes de réhabilitation énergétique séquentielle des bâtiments existants ». Thèse de doctorat, Université Paris-Est, 415 p.
- Vorger, Eric. 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, 474 p.

Modélisation et simulation d'une cellule test en plein air pour l'évaluation énergétique des composants d'enveloppe

G. Cattarin ^{1,2,3*}, L. Pagliano ¹, F. Causone ¹, A. Kindinis ^{2,3}

¹ end-use Efficiency Research Group, Department of Energy, Politecnico di Milano, Via Lambruschini 4, 20156 Milano, Italy

² Université Paris-Est, Institut de Recherche en Constructibilité, ESTP, F-94230 Cachan, France

³ Efficacity, 14-20 boulevard Newton, 77447 Marne la Vallée Cedex 2, France.

*giulio.cattarin@polimi.it

RESUME. L'article présente la modélisation thermique et la simulation sur lesquels s'appuiera la conception d'une cellule test. La cellule a pour objectif la caractérisation des propriétés thermo-physiques des composants d'enveloppe transparents et opaques dans des conditions climatiques réelles, et d'étudier l'impact de différentes configurations de climatisation sur le confort thermique intérieur et la qualité de l'air intérieur. Le retard de réponse de la mesure calorimétrique est un aspect particulièrement critique afin de garantir une bonne qualité de mesure dans des conditions climatiques variant rapidement. Pour cette raison, le comportement thermique de la cellule test a été décrit à travers un modèle à paramètres localisés, pour simuler toute une gamme de conditions de fonctionnement. Les résultats sont utilisés pour évaluer l'inertie thermique de différentes solutions, affiner les choix de conception et les stratégies de contrôle les plus prometteuses. L'article présente le modèle thermique développé pour comparer la cellule test à une installation traditionnelle en termes de précision calorimétrique dans des conditions externes transitoires.

MOTS- CLÉS: cellules test, méthode de mesure, facteur solaire

ABSTRACT. The article presents the thermal modelling and simulation work that will constitute the basis for the design of an outdoor test cell. The facility aims at characterizing the thermo-physical properties of transparent and opaque envelope components under real weather conditions, and to study the impact of different ventilation configurations in the indoor thermal comfort and indoor air quality. The response delay of the calorimetric measure is particularly critical when trying to achieve a good quality of measurement in rapidly-varying weather conditions. For this reason, the thermal behaviour of the test cell has been described, by means of a lumped parameter model, to simulate a range of operating conditions. The results are used to evaluate the thermal inertia of different solutions, refine the design choices and the most promising control strategies. The article presents the thermal models used to compare the test cell to a traditional installation in terms of calorimetric accuracy under transient external conditions.

KEYWORDS : test cell, measurement method, solar factor

INTRODUCTION

Les cellules test sont des installations en plein air qui permettent de garder les conditions intérieures désirées, tout en laissant les conditions extérieures varier comme dans l'environnement réel (Cattarin et al. 2016). En particulier, l'intérêt des expériences menées dans les cellules test concerne l'impact des conditions extérieures comme la température extérieure, la vitesse et la direction du vent, l'humidité externe, mais surtout le rayonnement solaire. Cependant, les expériences dans les cellules test doivent être conçues avec une grande attention, car le comportement (thermique, hygrométrique, etc.) de l'échantillon test est influencé par plusieurs phénomènes contemporains et dans certains cas corrélés.

Dans cet article, nous comparons une cellule test traditionnelle (TRAD) à une installation innovante en cours de conception (SOLAR). La comparaison est basée sur la simulation numérique de la mesure du facteur de transmission totale de l'énergie solaire (ou facteur solaire).

Selon la définition décrite dans la norme (EN 410:2011), le facteur solaire est calculé par la somme du facteur de transmission directe (τ_e) de l'énergie solaire et du facteur de réémission thermique vers l'intérieur du vitrage q_i (voir la Figure 1a). A propos de cette définition, Platzer (Platzer, 2000) fait remarquer que les quantités mentionnées ci-dessus ne peuvent pas être mesurées directement; par conséquent, il propose une définition opérationnelle pour la mesure calorimétrique (indirecte) du facteur solaire dans des conditions de régime permanent. Selon cette définition (Kuhn, 2014), le facteur solaire est déterminé de manière expérimentale comme la somme algébrique de la puissance extraite (Q_{extr}) et des pertes thermiques par conduction vers l'environnement extérieur (Q_{loss}), divisé par la puissance solaire incidente sur le plan de l'échantillon test ($Q_{inc, solaire}$) (voire la Figure 1b) :

$$g := \frac{Q_{extr} + Q_{loss}}{Q_{inc, solar}} \quad (1)$$

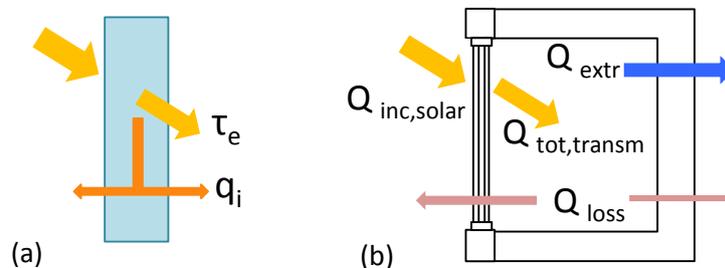


Figure 1. Représentation schématique des grandeurs physiques nécessaires pour la détermination du facteur solaire selon la norme EN 410 (a) et dans une installation expérimentale (b).

Cependant, dans notre cas, le facteur solaire est déterminé dans des conditions dynamiques. Afin de tenir compte du délai entre le moment de l'entrée d'une unité d'énergie dans le calorimètre et son extraction par le système actif de contrôle, nous proposons ici une modification de l'Eq. (1).

1. DESCRIPTION ET MODELISATION DE LA CELLULE D'ESSAI

Les décisions prises dans la phase de conception d'un banc d'essai influencent ses performances pour toute sa vie opérationnelle. Pour cette raison, le comportement thermique de la cellule test SOLAR a été simulé dans l'environnement Matlab en utilisant un modèle à paramètres localisés, et les résultats ont été utilisés pour affiner les choix de conception.

Le concept technologique de la nouvelle installation est illustré à la Figure 2. Les essais calorimétriques sont effectués dans une zone de mesure dédiée ($L \times W \times H = 1.5 \text{ m} \times 3 \text{ m} \times 3 \text{ m}$), équipée d'une plaque refroidie (absorbeur solaire) qui reçoit et extrait du Volume de Contrôle (V.C.) la charge solaire entrante (voire la Section 1.2). La zone de garde est maintenue à la même température de consigne de la zone de mesure afin de minimiser les pertes de chaleur à travers l'enveloppe.

1.1 ENVELOPPE DE LA ZONE DE MESURE ET ECHANTILLON TEST

L'enveloppe de la zone de mesure est construite avec des panneaux sandwich préfabriqués, formés par deux tôles d'acier inoxydable de 0.6 mm et un couche de 15 cm d'épaisseur de mousse polyuréthane

injectée. Le coefficient de transmission thermique résultant est égal à $0.153 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$. L'ensemble de l'enveloppe de la zone de mesure est modélisé comme un élément de cinquième ordre (4R5C).

A titre d'exemple, l'échantillon test considéré est une façade double vitrage de dimensions $3 \text{ m} \times 3 \text{ m}$, avec une surface totale égale à 9 m^2 (toute l'ouverture disponible de la zone de mesure), dont le 8% est occupé par le cadre. L'échantillon test (représenté par deux nœuds capacitifs dans le modèle) a un coefficient de transfert thermique global $U = 2.1 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$. Les propriétés optiques globales de l'échantillon test sont modélisées de la façon suivante :

- Le rayonnement solaire direct est traité en considérant son angle d'incidence avec l'échantillon test. Le facteur de transmission directe de l'énergie solaire (τ_{12}), les facteurs d'absorption de l'énergie solaire des deux vitrages compte tenu des réflexions multiples entre les deux couches vitrées (α_{12} et α_{22}) et le facteur de réflexion directe de l'énergie solaire (ρ_{12}) du double vitrage.
- Le comportement de l'échantillon test au rayonnement solaire diffus est traité, comme indiqué dans (Duffie & Beckman, 1991), en considérant un angle d'incidence équivalente de 60° .

Une représentation graphique de cette partie du modèle est fournie à la Figure 2. Les températures des trois secteurs de la plaque métallique de l'absorbeur solaire ($T_{\text{met},j}$) sont dynamiquement déterminées au cours de la simulation, comme discuté dans la section suivante.

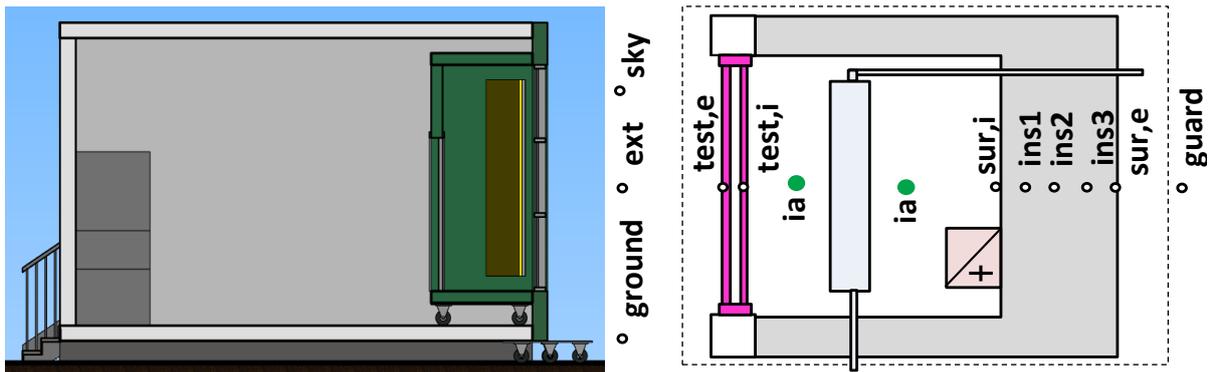


Figure 2. A gauche: la configuration utilisée pour les essais calorimétriques: l'échantillon test est appliqué sur l'ouverture de la boîte de mesure, tandis que la zone de garde est maintenue à la même température de consigne. A droite: schéma de la localisation "physique" des nœuds (pas à l'échelle). La ligne pointillée indique les limites du volume de contrôle (y compris l'enveloppe de la zone de mesure, l'échantillon test et l'absorbeur solaire).

1.2 L'ABSORBEUR SOLAIRE

L'absorbeur solaire est un échangeur de chaleur chargé de l'extraction des gains solaires entrants dans le volume de contrôle. Il agit comme un panneau solaire thermique à deux plaques parallèles, quoi que, dans ce cas, l'effet utile est le refroidissement de la zone de mesure plutôt que le chauffage du fluide circulant. Bien que la fonction soit différente, plusieurs similitudes entre les deux solutions technologiques font qu'il soit raisonnable de modéliser l'absorbeur solaire sur la base de l'expérience acquise sur les panneaux solaires thermiques (voire par exemple (Kamminga, 1985), (Schnieders, 1997) et (Tagliafico et al., 2014)).

Les modèles discrétisés qui subdivisent le capteur solaire le long de la direction du fluide sont considérés fiables pour reproduire la distribution spatiale de la température et obtenir de bonnes estimations de la température de sortie du fluide (Tagliafico et al., 2014).

L'absorbeur solaire est discrétisé ainsi, dans le sens vertical (du plancher au plafond) en 3 éléments de largeur de 2.9 m et hauteur de 0.93 m, et il est assumé comme parfaitement plat. Suivant les hypothèses initialement adoptées par (Kammaing, 1985) et (Schneider, 1997) pour un capteur solaire à plaques planes, les effets de bord ainsi que des gradients de température horizontaux sont considérés comme négligeables et les seuls gradients de température pris en compte sont i) dans le sens de l'écoulement de l'eau et ii) à travers les différentes couches de l'absorbeur. L'hypothèse d'une température uniforme dans le sens horizontal implique en fait deux hypothèses sous-jacentes: une répartition égale du fluide circulant dans les canaux et une répartition uniforme du rayonnement solaire sur la plaque absorbante. Enfin, les phénomènes de conduction thermique entre deux nœuds d'eau et entre deux éléments adjacents de la plaque métallique sont négligés (faibles épaisseurs). La température est assumée uniforme dans la longueur de l'absorbeur et variable selon la hauteur et la profondeur, et la conduction thermique est considérée dans la profondeur et négligeable selon la hauteur.

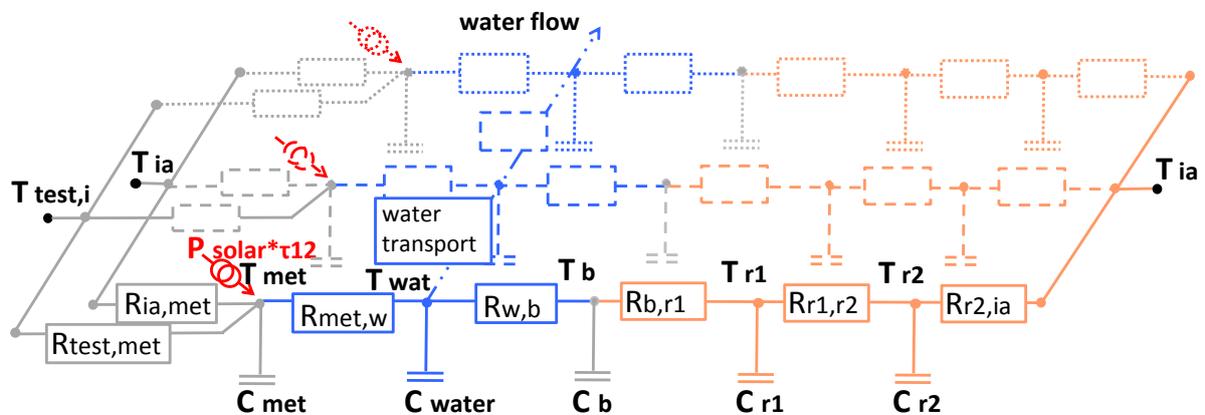


Figure 3. Modèle RC de l'absorbeur solaire. La flèche bleue indique la direction d'écoulement du fluide.

Le présent modèle calcule dynamiquement pour chaque couche (*met*, *w*, *b*, *r1*, *r2*) de l'épaisseur e pour chaque segments j vertical ($j = 1, 2, 3$) :

- la température de la plaque absorbante (1 mm) revêtue avec une couche TiNOX[®], $T_{met, j}$
- la température du fluide en circulation (eau distillée, épaisseur de la couche du fluide 5 mm) $T_{w, j}$
- la température de la plaque métallique arrière (épaisseur 1 mm) $T_{b, j}$
- les températures de deux nœuds d'une couche d'isolation (panneau d'isolant sous vide de 2 cm), $T_{r1, j}$ et $T_{r2, j}$, où $r2, j$ est en contact avec l'air pendant que $r1, j$ est entre b, j et $r2, j$.

La Figure 3 illustre le modèle RC de l'absorbeur solaire, constitué de 5 couches en profondeur et de 3 segments verticales (représentés par un style de ligne différente).

Les coefficients convectifs entre (i) l'air et la plaque métallique de l'absorbeur et (ii) entre l'eau distillée et les plaques de l'absorbeur ont une importante influence sur la rapidité de réponse de la zone de mesure, et sont affectés par la régulation de la pompe à eau et des ventilateurs de recirculation.

Dans le cas d'une cellule de test, le facteur solaire est déterminé dans des conditions dynamiques. Nous proposons donc ici une correction de l'Eq. (1) pour tenir compte du délai entre le moment de l'entrée de une unité d'énergie dans le calorimètre et son extraction par le système actif de control :

$$g = \frac{\dot{m} \cdot c_p(T) \cdot (T_{outlet} - T_{inlet}) - P_{el} - UA_{test} \cdot (T_{op,ext} - T_{op,i}) + \Delta E_{int}(abs)/\Delta\tau}{G_v \cdot A_{test_glz}} \quad (2)$$

où :

\dot{m} : débit massique de l'eau dans l'absorbeur solaire (kg s^{-1}) ;

c_p : capacité calorifique spécifique de l'eau distillée ($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$) ;

T_{outlet} T_{inlet} : température de l'eau à la sortie / entrée de l'unité de refroidissement ($^{\circ}\text{C}$)

P_{el} : puissance électrique (post-chauffage et ventilateurs) (W)

UA_{test} : coefficient de transmission thermique globale de l'échantillon test (W K^{-1}) ;

$T_{op,ext}$ et $T_{op,i}$: températures opératives de l'environnement extérieur et intérieur ($^{\circ}\text{C}$) ;

G_v : irradiance solaire totale sur le plan de l'échantillon test (W m^{-2}) ;

A_{test_glz} : surface vitrée de l'échantillon test (m^{-2}) ;

$\Delta E_{int}(abs)/\Delta\tau$: variation d'énergie interne de l'absorbeur solaire pendant l'unité de temps $\Delta\tau$;

estimée à partir des variations dans le temps de T_{inlet} et T_{outlet} et de la capacité thermique de l'absorbeur solaire C_{abs} .

1.3 SYSTEME DE CHAUFFAGE ET ETANCHEITE A L'AIR

Le système de chauffage se compose de cinq résistances électriques 250 W qui peuvent être modulées par un régulateur Proportionnel et Intégral (PI) avec de paliers de 10W et ajusté chaque 4 secondes. Les échanges de chaleur par rayonnement en raison de la résistance électrique sont réduits au minimum grâce à un écran, de façon que la puissance de chauffage soit purement convective. Les ventilateurs de recirculation fonctionnent en continu afin de garder l'air intérieur bien mélangé et améliorer les échanges de chaleur par convection avec la surface de l'absorbeur solaire. Grâce à leur fonctionnement, l'air interne peut être supposé à température uniforme et représenté par un seul nœud capacitif. Les ventilateurs constituent la principale contribution aux gains internes (assumés de 250 W). Le bilan thermique sur l'air intérieur ne comprend pas un terme lié à la rénovation de l'air, puisque le système fonctionne en recirculation complète et il est supposé être parfaitement étanche. L'hypothèse d'étanchéité parfaite implique également que l'air intérieur ne subit pas des variations d'humidité absolue, et donc aucune équation de masse n'est considérée.

1.4 CELLULE TEST TRADITIONNELLE

La solution technologique présentée est comparée à une installation traditionnelle (TRAD) qui présente un système de refroidissement convectif comme celui utilisé dans les cellules test PASSYS-PASLINK (Van Dijk & Van der Linden, 1995), et qui est entourée d'une zone de garde. La solution traditionnelle est équivalente en ce qui concerne l'enveloppe, sauf pour les dimensions intérieures ($L \times W \times H = 5 \text{ m} \times 3 \text{ m} \times 3 \text{ m}$). Cependant, l'équipement est idéalisé, en d'autres termes la puissance de refroidissement (P_{ideal}) est délivrée instantanément au nœud d'air. Ceci est en fait une hypothèse forte en faveur de cette solution, puisque l'équipement ne présente aucune inertie thermique ou retard de réponse. Le rayonnement solaire est incident uniformément sur les surfaces internes où il est absorbé; cette énergie est ensuite partiellement transférée à l'air intérieur par convection et partiellement transmise par conduction aux couches plus internes de l'enveloppe. Par conséquent, l'unité de refroidissement idéale reçoit et extrait l'énergie entrante avec un délai.

Dans ce cas, le facteur solaire calorimétrique est déterminé de la façon suivante:

$$g = \frac{P_{ideal} - P_{fans} - U_{test} \cdot A_{test} \cdot (T_{ext} - T_{ia})}{G_v \cdot A_{test_glz}} \quad (3)$$

Les coefficients convectifs utilisés dans les deux modèles sont donnés dans le Tableau 1. Comme on peut constater à la Section 2, dans le cas TRAD il est nécessaire d'atteindre une condition de convection forcée plus intense au niveau des parois afin de réduire l'influence de l'inertie thermique du système. Il faudra donc augmenter la vitesse de mouvement de l'air intérieur à l'aide de ventilateurs de recirculation. Les coefficients de transfert thermique radiatifs sont calculés toutes les 2 secondes en fonction des températures des surfaces.

coefficient convectif	SOLAR ($Wm^{-2}K^{-1}$)	TRAD ($Wm^{-2}K^{-1}$)
ia, sur,i	3	8÷15
$ia, test,i$	8	8
ia, met,j	8	-
$air ext, test,e$	correlation selon (Yazdanian & Klems, 1994)	

Tableau 1. Coefficients convectifs principaux dans les modèles SOLAR et TRAD.

Les deux modèles sont intégrés en utilisant le solveur ODE45 fourni par Matlab et basé sur la méthode Dormand-Prince avec un temps d'intégration variable. Les solutions ont été comparées à celles obtenues avec le solveur ODE15i basé sur un schéma implicite et donc intrinsèquement stable. Les deux solveurs fournissent les mêmes résultats et donc le solveur ODE45 est choisi pour son temps de calcul inférieur.

2. RÉSULTATS ET DISCUSSION

Les simulations sont effectuées en utilisant des données climatiques réelles d'une station météorologique installée au Politecnico di Milano (IT), dans la journée du 20 Septembre 2015, caractérisée par un ciel clair et une température extérieure entre 15 et 26 °C.

La Figure 4 montre l'évolution des températures de l'enveloppe (de l'intérieur à l'extérieur : $T_{sur,i}$, T_{ins1} , T_{ins2} , T_{ins3} et $T_{sur,e}$), de l'échantillon test ($T_{test,i}$ et $T_{test,e}$) et de l'air intérieur et extérieur (T_{ia} et T_{ext}) pour le cas SOLAR (en haut) et TRAD (en bas) dans la journée du 20 Septembre 2015. L'axe vertical secondaire (à droite) montre le rayonnement solaire globale sur le plan d'échantillon test.

Nous constatons que :

- Dans les deux cas le system actif est en mesure de maintenir l'air à la température de consigne
- Dans le cas SOLAR l'enveloppe est facilement maintenue à la température de consigne, car elle est protégée du rayonnement solaire par l'absorbeur solaire. Dans le cas TRAD, l'enveloppe se réchauffe à cause du rayonnement, et la surface intérieure sur,i atteint une température de presque 35°C vers 13 heures ($T_{sur,i}$ dans la Figure 4, en bas). Comme attendu, l'onde thermique se propage dans l'enveloppe en montrant un délai et une atténuation. La couche $ins1$ atteint une température maximale de 31 °C vers 15 heures.
- Concernant l'échantillon test, on peut observer que les températures des deux vitrages décroissent dans la première partie de la journée à cause de l'exposition à l'environnement extérieur, et augmentent au cours de la journée, à cause de l'absorption du rayonnement solaire.

La Figure 5 montre les profils du facteur solaire pour les cas SOLAR et TRAD, calculé comme moyenne mobile horaire. La ligne noire indique le facteur solaire déterminé comme : $\tau_e + \alpha \cdot N_i$, en tenant compte de la dépendance des propriétés optiques de l'angle d'incidence de la radiation directe

(voire Figure 2) (g_{ref}) ; son profil est utilisé comme référence car il représente la fraction d'énergie solaire qui théoriquement entre dans le système.

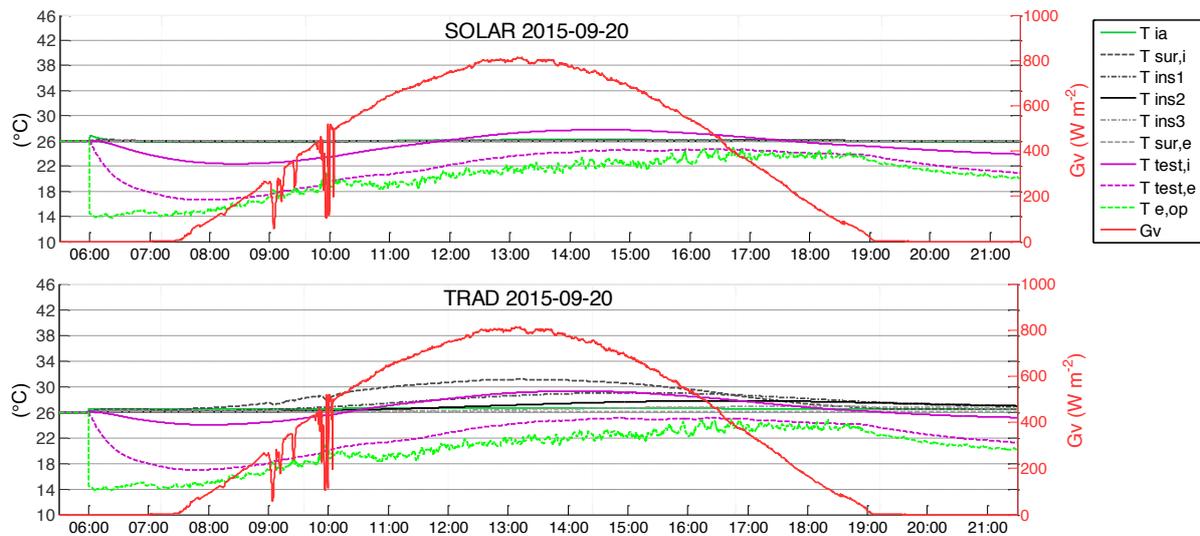


Figure 4. Profils des températures (axe à gauche) et du rayonnement solaire global sur le plan de l'échantillon d'essai (axe à droite). En haut: cas SOLAR; en bas: cas TRAD.

Il est de tout façon l'*input* d'énergie solaire au volume de control comme simulée dans notre model. Le calorimètre ne peut pas mesurer cet *input* directement, mais il le fait indirectement à travers la mesure de l'énergie extraite et des pertes et stockages. Le modèle Matlab du calorimètre nous permet de simuler la mesure avec l'objectif du « *design of experiment* » e.g. en ce cas de comparer la configuration avec absorbeur solaire que nous proposons et la configuration traditionnelle. Le facteur solaire déterminé avec la méthode calorimétrique (en utilisant l'Eq. (2) pour le cas SOLAR et l'Eq. (3) pour le cas TRAD) est représenté en ligne hachurée verte (cas SOLAR) et en lignes pointillées bleue et rouge pour les cas TRAD 8 et TRAD 15, correspondants respectivement à des coefficients de transfert thermique convectifs sur les surfaces internes de 8 et 15 $Wm^{-2}K^{-1}$.

Les résultats suggèrent les considérations suivantes :

- Le facteur solaire de référence (g_{ref}) varie considérablement en fonction de l'angle d'incidence et, deuxièmement, de la couverture du ciel. En fait, selon les modèles utilisés, les propriétés optiques varient seulement quand on considère le rayonnement direct. Une variation de la couverture du ciel va influencer le rapport entre le rayonnement direct et diffus G_b/G_d et donc le facteur solaire ;
- Le système SOLAR est capable de suivre la variation du facteur solaire pour la plupart du temps (entre 9 heures et 18 heures) ;
- Le système TRAD sous-estime fortement le facteur solaire pour la plupart du temps. Cela est dû à la capacité thermique de l'enveloppe qui participe à la dynamique du système (à différence du cas SOLAR). En particulier, la température superficielle augmente visiblement. L'air est ensuite traité par le système convectif idéal (voire la section 1.4), mais une partie importante de la chaleur entrante est accumulée dans l'enveloppe et l'évaluation de l'évolution temporelle de sa restitution à l'air serait affectée par des incertitudes importantes. Pour cette raison le terme d'accumulation n'est pour le moment pas estimé dans l'Eq. (3). La réalisation d'une cellule test capable de suivre à fréquence au moins horaire l'évolution des gains solaires plutôt que se limiter à l'intégrale sur une journée devrait apporter la possibilité d'une validation plus fiable des modèles décrivant les performances d'éléments dynamiques de façade (Dama, Kuhn, Pagliano 2006) dont certains ont

pour objectif d'évaluer un «hourly average» g-value (Kuhn 2006). Une analyse détaillée de l'incertitude de mesure, y inclus l'incertitude affectants les fluxes concernant l'enveloppe dans la cellule TRAD, est en cours pour déterminer ultérieurs améliorations de la procédure de mesure.

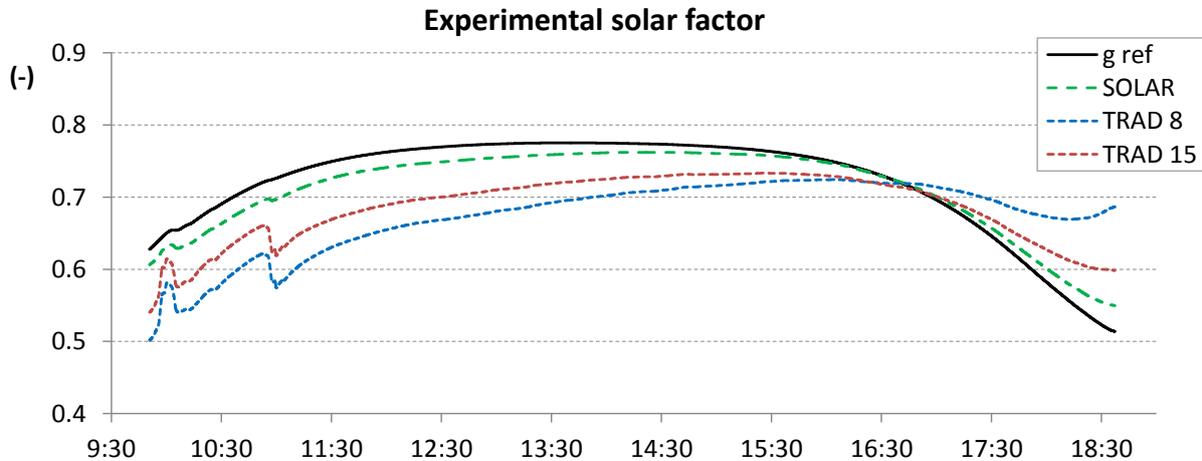


Figure 5. Profils des facteurs solaires dans des conditions dynamiques : facteur solaire calculé à partir des propriétés optiques de l'échantillon (*g ref*), facteur solaire déterminé par la méthode calorimétrique dans le cas SOLAR (SOLAR) et dans les cas TRAD 8 et TRAD 15, correspondants à des coefficients de transfert thermique convectifs sur les surfaces internes de 8 et 15 $\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$.

BIBLIOGRAPHIE

- Cattarin, G., Causone, F., Kindinis, A., & Pagliano, L. (2016). Outdoor test cells for building envelope experimental characterization – a literature review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 54, 606-625.
- Dama, A., Mazzarella, L., & Pagliano, L. (2005). Dipendenza angolare delle proprietà ottiche ed energetiche di vetri rivestiti: confronto tra i modelli esistenti. *Congresso Nazionale ATI*, 13-15 Settembre. Roma.
- Duffie, J., & Beckman, W. (1991). *Solar Engineering of Thermal Processes*. New York: John Wiley & Sons Inc.
- EN 410:2011. (s.d.). Glass in building - Determination of luminous and solar characteristics of glazing.
- Kammaing, W. (1985). The approximate temperatures within a flat-plate solar collector under transient conditions. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 28(2), 433-440.
- Kuhn, T. E. (2014). Calorimetric determination of the solar heat gain coefficient *g* with steady-state laboratory measurements. *Energy and Buildings*, 84, 388-402.
- Martin, M., & Berdahl, P. (1984). Characteristics of Infrared Sky Radiation in the United States. *Solar Energy*, 33(3/4), 321-336.
- Perez, R., Steward, R., Seals, R., & Guertin, T. (1988). *The Development and Verification of the Perez Diffuse Radiation Model*. Sandia Report SAND88-7030.
- Platzer, W. J. (2000). The ALTSET project – Measurement of angular properties for complex glazings. *Proceedings of the 3rd Int. ISES Europe Solar Congress, Copenhagen, Denmark, 19-22 June 2000*.
- Reindl, D., Beckman, W., & Duffie, J. (1990). Diffuse Fraction Correlations. *Solar Energy* 45 (1), 1-7.
- Schnieders, J. (1997). Comparison of the energy yield predictions of stationary and dynamic solar collector models and the models' accuracy in the description of a vacuum tube collector. *Solar Energy*, 61(3), 179-190.
- Tagliafico, L. A., Scarpa, F., & De Rosa, M. (2014). Dynamic thermal models and CFD analysis for flat-plate thermal solar collectors – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 30, 526-537.
- Van Dijk, H., & Van der Linden, G. (1995). *PASLINK Calibration and component test procedures*. Delf: TNO.
- Yazdani, M., & Klems, J. (1994). Measurement of the exterior convective film coefficient for windows in low-rise buildings. *ASHRAE Transactions*, 100(1).

Modèles d'ordre réduit pour l'analyse et la modélisation de l'effet cheminée et des transferts de chaleur associés - application aux enveloppes ventilées des bâtiments solaires ou producteurs d'énergie.

Martin THEBAULT^{1*}, Stéphanie GIROUX-JULIEN¹, Christophe MENEZO²

¹ Centre d'Energétique et de Thermique de Lyon UMR 5008, Université Lyon 1,
9, rue de la Physique, 69621 Villeurbanne Cedex

² Laboratoire Optimisation de la Conception et Ingénierie de l'Environnement UMR 5271, Université de Savoie
Mont-Blanc,

Savoie Technolac, 73376 Le Bourget du Lac, France

* martin.thebault@univ-lyon1.fr

RESUME : Cet article présente une approche d'étude des écoulements de convection naturelle en canal vertical par méthode de réduction. Différentes configurations de chauffage pariétal sont étudiées, chauffage uniforme ou spatialement réparti. Deux principaux objectifs sont poursuivis. Le premier consiste à approfondir la connaissance de cet écoulement à travers ses caractéristiques instationnaires. L'élaboration de modèles d'ordres réduits pour des composants ventilés d'enveloppe du bâtiment est aussi visée. Les différentes méthodes de réduction considérées seront exposées. Puis une première analyse par Proper Orthogonal Decomposition est effectuée permettant l'observation de certaines structures cohérentes de l'écoulement ainsi que des caractéristiques du régime d'écoulement.

MOTS-CLÉS : BIPV-T, POD, Paroi double-peau, PIV, convection naturelle.

ABSTRACT: This paper deals with a new way of studying natural convection flow in an open-ended heated vertical channel using reduction methods. Different heating configurations are under study, uniform and staggered heating configurations. Two main objectives are followed. The first one is to improve our knowledge of natural convection in canal, and particularly its non stationary behaviour. The other goal is to build a fast, efficient and reliable model of ventilated component such as PV-T or double-skin facades, in order to be integrated in existing modelling software. Several reduction methods are under study. This paper presents an analysis made using Proper Orthogonal Decomposition method applied to experimental data. It is possible to observe coherent structures and flow regimes.

KEYWORDS : BIPV-T, POD, double-skin façade, PIV, natural convection.

1. INTRODUCTION

La performance des cellules photovoltaïques (PV) que ce soit d'un point de vue de la production électrique et du maintien du rendement dans le temps, diminue lorsque leur température opérative augmente (Bloem 2008). Dans ce contexte un des principaux défis de l'intégration de composants solaires au bâti (Building Integrated Photovoltaic - BIPV) est le contrôle de cette température de fonctionnement. Un des procédés, actuellement étudié (Sandberg and Moshfegh 2002), est le rafraîchissement par convection naturelle via des composants de parois de type double-peau. Il a été montré (Brinkworth 2000) que des débits comparables à ceux imposés en convection forcée dans le cas de la ventilation sanitaire en maison individuelle, pouvaient être obtenus par ce type d'écoulement, et ce particulièrement en configuration verticale. Cela ouvre le champ à de nombreuses exploitations,

notamment la génération d'une ventilation hybride ou encore la production intégrée d'électricité et de chaleur (enveloppe multifonction).

Cependant ce type de façade est soumis à de nombreux phénomènes physiques couplés présentant de fortes hétérogénéités adjointes à des échelles spatiales et temporelles multiples. Les stratégies adoptées pour étudier cette forme de composants sont diverses. Elles partent de la mesure et de la compréhension de l'impact de ces phénomènes en conditions réelles de fonctionnement, via des prototypes monitorés in situ à l'échelle 1, à l'isolement et la maîtrise de ces phénomènes physiques en travaillant en conditions aux limites contrôlées, soit au moyen de bancs expérimentaux en laboratoire soit via des modélisations numériques fines.

De nombreuses recherches ont été menées sur des configurations en canal ouvert chauffées par les parois latérales. Elles concernent différentes configurations géométriques (rapport de forme, entrées/sorties, configuration alternée ...) (Manca, Musto, and Naso 2003), diverses conditions aux limites (homogènes, non homogènes), ou bien encore l'influence des propriétés thermophysiques des fluides (Hernández and Zamora 2005). Concernant l'intensification des transferts de chaleur associée au régime d'écoulement, peu d'études relatent leur aspect instationnaire ainsi que la caractérisation du régime de transition laminaire/turbulent. Néanmoins, on peut citer l'étude de référence de Miyamoto (Miyamoto et al. 1986) sur le seuil de transition.

Nos travaux poursuivent deux objectifs. L'un est la compréhension et la modélisation de ces phénomènes instationnaires (structures cohérentes, intrinsèques à l'écoulement associées aux transferts de chaleur), via l'utilisation de techniques de décompositions modales et de réductions de modèles. L'autre est la création de modèles d'ordre réduit (MOR) associant rapidité de calcul et précision ; et ce en vue d'une intégration dans des environnements de simulation propres à l'énergétique du bâtiment ou à des fins d'optimisation et/ou de contrôle-commande.

A ce jour de nombreuses méthodes de réductions existent. On pourra différencier deux grandes familles de méthodes, *a priori* et *a posteriori*. Les méthodes *a posteriori* nécessitent des données issues d'un modèle détaillé (MD) pouvant être obtenues numériquement (modèles RANS, SGE, DNS, ...) ou expérimentalement (champ PIV, capteurs, ...). Les méthodes *a priori* ne nécessitent pas de connaissance *a priori* de l'écoulement, cela représente un certain avantage car l'obtention de données via un MD peut s'avérer très coûteux en temps de calcul. Cette capacité à s'affranchir d'une base de données existante font parfois des méthodes *a priori* des outils de résolution de problèmes.

Les méthodes envisagées pour l'étude sont la Proper Orthogonal Decomposition (POD), la Dynamic Mode Decomposition (DMD) ainsi que la Proper Generalized Decomposition (PGD). Les techniques de POD (Cordier and Bergmann 2006) et de DMD (Schmid 2010) sont des méthodes *a posteriori* basées sur l'identification et l'extraction de modes énergétiques ou dynamiques, et vont être utilisées dans l'optique d'approfondir la connaissance des propriétés intrinsèques de l'écoulement. La méthode PGD (Chinesta, Keunings, and Leygue 2013) est une méthode *a priori* de construction d'un MOR par itération. Elle a fait l'objet de nombreuses études pour des problèmes physiques très variées avec notamment des applications en optimisation et pour le contrôle-commande en temps réel.

Le travail présenté dans cet article constitue une première application de la technique de réduction Proper Orthogonal Decomposition (POD) sur des champs de vitesses obtenues par PIV (Particule

Image Velocimetry) dans le cas d'un chauffage pariétal uniformément réparti sur une paroi ou le cas d'un chauffage alterné sur les deux parois.

2. DISPOSITIF EXPERIMENTAL ET METHODE D'ANALYSE

2.1. PRESENTATION DU DISPOSITIF EXPERIMENTAL

Les expérimentations ont été effectuées sur un canal Figure 1 constitué de deux parois de dimensions $H \times L = 1.5\text{ m} \times 0.7\text{ m}$ espacées de 10 cm (rapport d'aspect de 1/15). Ces parois sont isolées en face arrière par une couche de polyuréthane ($\lambda = 0.027\text{ W}/(\text{m.K})$) de 12cm d'épaisseur. Afin d'éviter une alimentation latérale, le canal est fermé de chaque côté par des parois de plexiglass. Le chauffage est assuré par des feuillards INOX d'épaisseur 50 μm . Dans l'optique d'étudier les caractéristiques de l'écoulement, les données issues de mesures obtenues par méthode PIV Figure 2 ont été analysées dans deux configurations représentées Figure 3 : chauffage uniforme sur une paroi (cas VREF) et chauffage imposé par bandes de 10cm alternées d'une paroi à l'autre (cas V1). La puissance totale injectée est la même dans les deux cas, cependant dans le cas V1 la répartition du chauffage est légèrement déséquilibrée en faveur de la surface S1 (8 zones chauffées sur S1 contre 7 sur S2).

La série de mesures des champs de vitesse obtenues par PIV a été effectuée sur des fenêtres de 20x10cm, 10 cm étant la largeur du canal. Ces fenêtres d'observation sont réparties sur la hauteur du canal, respectivement en $y/H = (0.18, 0.36, 0.54, 0.80, 0.95)$, comme indiqué sur la Figure 3. La fréquence d'acquisition est de 11Hz et des séquences de 4000 ou 8000 clichés consécutifs ont été retenus dans un premier temps, ce qui représente des durées d'acquisition de respectivement 365s et 730s. La méthodologie et les techniques de mesures expérimentales sont détaillées par E. Sanvicente (Sanvicente 2013). L'ensemble des acquisitions est réalisé lorsque le chauffage des parois est établi



Figure 1 : Canal expérimental

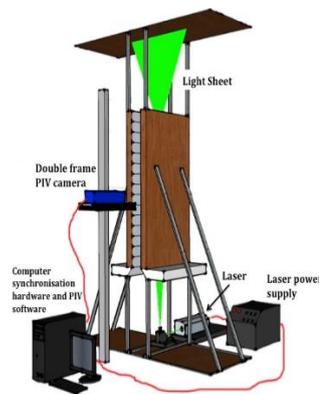


Figure 2 : Schéma de l'installation PIV sur le canal expérimental

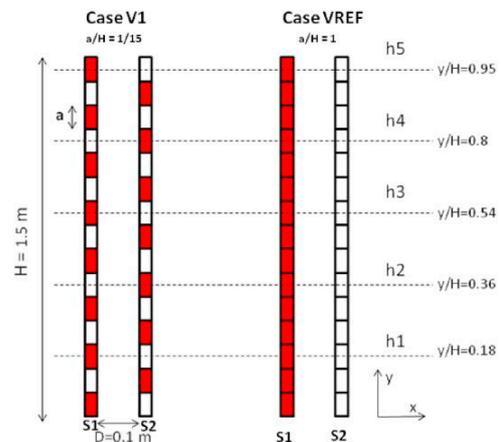
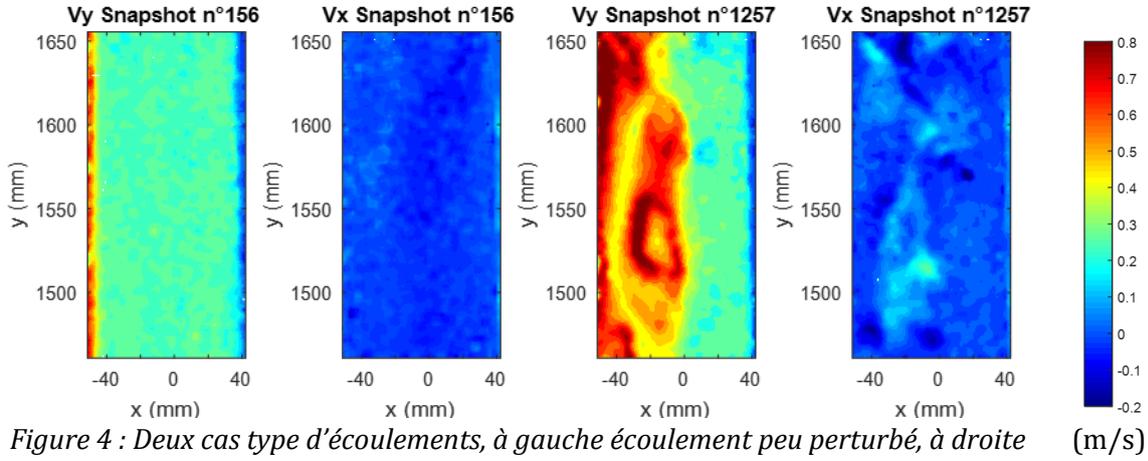


Figure 3 : Représentation d'une coupe du canal pour deux configurations de chauffage. Alternativement chauffée Case VI, Uniformément chauffée Case VREF

(régime asymptotique), ce qui correspond à un temps de chauffe d'environ 4h.

L'écoulement présente un caractère intermittent avec de longues périodes où aucune instabilité ne se développe (écoulement peu-perturbé) (Snapshot 156, Figure 4) et d'autres périodes où des décrochements, des oscillations ainsi que de fortes turbulences sont observées (écoulement fortement

perturbé) (Snapshot 1257, Figure 4). Pour la suite des analyses, les points de mesures correspondant aux deux premiers rangs en proche parois, mal définis et non exploitables, ont été filtrés.



2.2. TECHNIQUE POD

Il existe de nombreuses approches de la méthode POD (Cordier and Bergmann 2006) dont la méthode dite snapshots-POD, méthode *a posteriori* introduite par Sirovich en 1987 (Sirovich 1987). Elle consiste à utiliser des champs détaillés obtenus par des clichés de l'écoulement pris à intervalles de temps réguliers.

On considère la matrice U des champs observés $u(x, t_i)_{i=1,2,\dots,M}$ correspondant aux M clichés :

$$U = (u(t_1), \dots, u(t_m)) \in \mathbb{R}^{N \times M} \quad (1)$$

Où x représente le vecteur coordonnées et t le temps. La matrice de corrélation relative est définie par :

$$C = \frac{1}{M} U^T U \in \mathbb{R}^{M \times M} \quad (2)$$

Et le problème aux valeurs propres à résoudre s'écrit sous la forme :

$$C \beta_i = \lambda_i \beta_i \quad i = 1, \dots, M \quad \beta_i \in \mathbb{R}^{M \times 1} \quad (3)$$

Avec $(\lambda_i, \beta_i) \in [\mathbb{R} \times \mathbb{R}^M]_{i=1,2,\dots,M}$ respectivement les valeurs propres et les vecteurs propres de C . Par définition, les vecteurs propres sont déterminés afin d'obtenir une décomposition optimale au sens énergétique.

On peut ainsi construire une base POD orthonormée $\Phi = \phi_{i,i=1,\dots,M}$.

$$\phi_i = \frac{U \beta_i}{\|U \beta_i\|} \quad (4)$$

Les vecteurs de cette nouvelle base POD correspondent aux modes propres de l'écoulement. Ils sont associés à des coefficients temporels notés $a_i(t_j)_{[i,j] \in \llbracket 1, M \rrbracket^2}$ qui constituent les colonnes d'une matrice $A \in \mathbb{R}^{M \times M}$ telle que

$$A = U^T \Phi \quad (5)$$

Ces coefficients représentent la sollicitation temporelle des modes. De plus la base des Φ étant normée, l'information relative à l'amplitude de chaque mode est contenue dans ses coefficients temporels. Les champs de vitesses peuvent alors s'écrire.

$$u(t_i) = \sum_{k=1}^M a_k(t_i) \cdot \phi_k \quad (6)$$

L'analyse de ces sollicitations temporelles peut parfois révéler la présence de fréquences dominantes associées à un mode. Cependant en général les modes et les structures qu'ils représentent sont associés à plusieurs fréquences. Enfin la POD est basée sur un critère énergétique. Ainsi bien que les modes les plus énergétiques soient associés à l'écoulement moyen et aux structures cohérentes de grandes échelles, des modes peu énergétiques associées à des productions locales de vorticités ou cisaillement peuvent contribuer de façon notable à la déstabilisation de l'écoulement (Noack et al. 2008) ou à l'intensification des transferts de chaleur associés.

3. RESULTATS

Une décomposition POD a été appliquée aux champs de vitesse obtenus par PIV sur la hauteur du canal pour les configurations uniforme (VREF) et alternée (V1). Une représentation spatiale de la composante V_y des 8 premiers modes de l'écoulement obtenus sur chaque fenêtre d'observation, est présentée Figure 5 pour VREF et Figure 6 pour V1. Seule la composante V_y est à ce stade considérée. Cependant il est à noter que plus les modes sont faibles énergétiquement, plus l'influence de V_x est forte comme le montre l'examen des champs de vorticités (non reportés dans cet article). Les modes sont présentés suivant leur contenance énergétique, le mode 1 étant le plus énergétique.

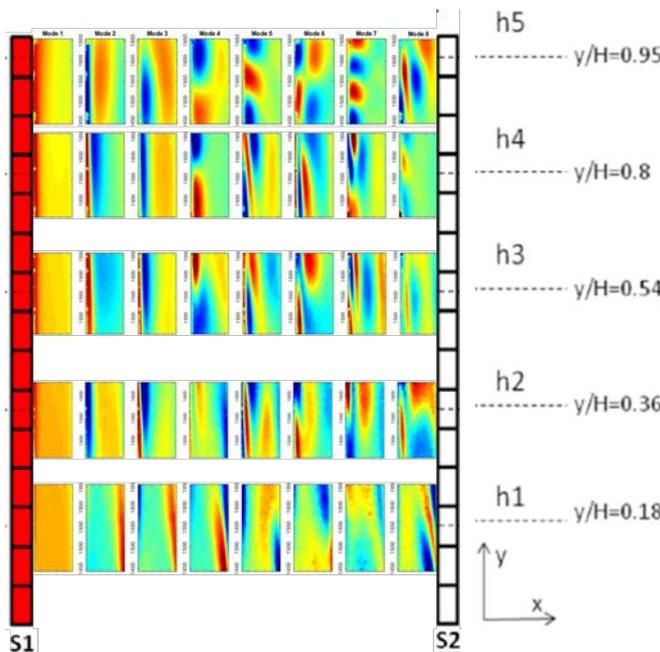


Figure 5 : premiers modes POD, cas VREF aux différentes fenêtres d'observations PIV

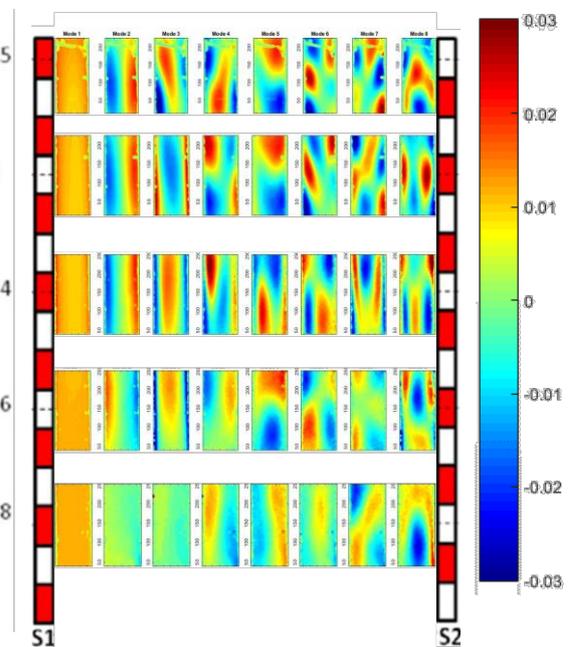


Figure 6 : Premiers modes POD cas V1 aux différentes fenêtres d'observations PIV

Sur les séquences peu perturbées, le mode 1 correspond à la composante moyenne de l'écoulement, composante qui peut être majorée ou minorée en amplitude dans le temps. Les modes 2 et 3

introduisent une modulation de la distribution de vitesse V_y sur la largeur du canal. Les modes suivant introduisent des variations selon la hauteur du canal.

La distribution de V_y , cas VREF sur le mode 1 (Figure 5) présente le développement de la couche limite dynamique proche paroi chauffée entre l'entrée du canal ($y/H=0.18$) et la sortie ($y/H=0.95$). L'observation des modes secondaires (2, 3) en entrée du canal ($y/H=0.18$) révèle la forte déformation des lignes de courant associée à la formation d'une zone de recirculation à proximité de la paroi non chauffée. Ce comportement est dû à une aspiration du fluide vers le côté chauffé en entrée de canal (Gebhart and Mahajan 1975). Concernant les modes moins énergétiques ($n>3$), on peut observer sur la fenêtre $y/h=0.95$ que les modes 3-4-7 présentent une similarité basée sur une inversion du signe de la vitesse sur la hauteur du canal et selon différentes échelles spatiales. La recombinaison de l'écoulement obtenue en utilisant l'équation (5), et en ne gardant que ces 3 modes associés au mode 1 correspond au passage d'une structure de survitesse. Cette structure est caractéristique d'un panache mais l'analyse de la composante thermique reste nécessaire pour la caractériser. Le mode 6 est relatif à des structures tourbillonnaires (isolignes de vorticité fermées) et le mode 8 à des structures tourbillonnaires contra-rotatives. Ces structures se retrouvent à plus petite échelle spatiale sur certains modes moins énergétiques (modes >8).

Configuration	Uniforme	Alterné
y/H	λ_1 (%)	
0,95	85,4	93,6
0,8	93,7	92,2
0,54	93,8	85,0
0,36	95,3	95,9
0,18	96,4	96,5

Tableau 1 : Contenance énergétique du premier mode pour les deux configurations aux différentes hauteurs du canal

Dans le cas V1 Figure 6, contrairement au cas uniformément chauffé, le mode 1 reste homogène sur la largeur du canal, avec des vitesses supérieures en proche parois S1 et S2. Le mode 2 est actif sur les deux parois et permet de représenter une différence de vitesse entre les parois S1 et S2. Il est à noter que lors de la reconstitution de l'écoulement, ce mode est multiplié par une amplitude (coefficients temporels) fluctuant autour de 0 dans le temps, ainsi il peut aussi bien représenter une vitesse supérieure côté S1 que côté S2 suivant le signe de cette amplitude. Le mode 3 est représentatif des variations de V_y selon x , caractéristiques de l'écoulement peu-perturbé défini plus haut. A l'entrée du canal ($y/H=0.18$) on ne retrouve pas le déséquilibre introduit par le mode 2 de façon très marquée (éventuellement sur le mode 5). Compte tenu de la présence de zones chauffées sur chaque paroi, l'aspiration en entrée reste quasi uniforme sur la largeur du canal. On notera enfin, en inspectant les modes sur le haut du canal ($y/H=0.95$), qu'à l'inverse de la configuration uniformément chauffée ils présentent des symétries ou des parités. Ainsi on peut observer des paires de modes symétriques comme les modes 3 et 4 ou 6 et 7. Les modes 1, 5, 8 présentent une symétrie par rapport au plan médian du canal, alors que le mode 2 apparaît antisymétrique. Ce constat peut être renouvelé si on considère les modes à mi-hauteur ($y/H=0.54$) : les modes 4-5 forment une paire (si l'on inverse le signe d'un des modes), les modes 3, 7 et 8 sont symétriques, et les modes 2-6 antisymétriques.

Le Tableau 1 représente l'énergie relative contenue dans le mode 1, pour les deux configurations de chauffage et aux différentes hauteurs considérées. Le mode 1 contient plus de 90% de l'énergie totale de l'écoulement, hormis en $y/H=0.95$ pour le cas VREF et $y/H=0.54$ pour la configuration V1, hauteurs pour lesquelles la contenance énergétique est de l'ordre de 85%. Pour le cas VREF il correspond à la transition vers le régime turbulent alors que pour le cas V1 il est lié à un ralentissement brutal de l'écoulement moyen dû à une forte diminution du gradient de masse volumique local (Sanvicente 2013). Ces deux comportements distincts sont renforcés par l'analyse des modes 2 à 10 (Figures 7 et 8). On peut dissocier trois groupes de répartition énergétique pour la configuration uniforme Figure 7 : le bas du canal [$y/H=0.18$; $y/H=0.36$], la partie centrale pour [$y/H=0.54$; $y/H=0.80$] et enfin la partie supérieure en $y/H=0.95$. Cette répartition correspond au développement et à la transition de l'écoulement vers le régime turbulent. Les modes secondaires caractéristiques des fluctuations et phénomènes instationnaires présentent une contribution énergétique croissante sur la hauteur et significative si on la rapporte à celle de l'écoulement moyen (mode 1). En sortie de canal, ($y/H=0.95$), l'ensemble des modes secondaires est plus énergétique qu'en amont.

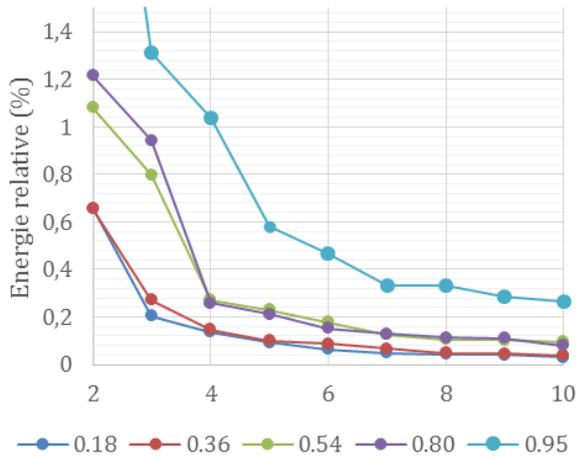


Figure 7 : Répartition énergétique des modes secondaires : cas uniformément chauffé cas VREF

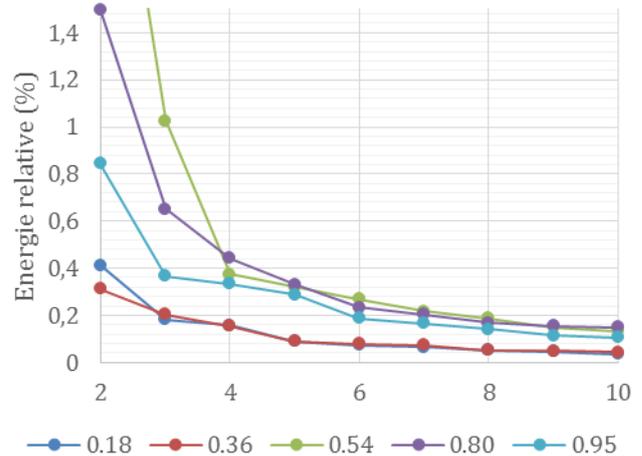


Figure 8 : Répartition énergétique des modes secondaires : cas chauffage alterné cas V1

Dans le cas V1, Figure 8 le classement énergétique des modes se distingue. On retrouve la première zone sur la partie basse du canal ($y/H=0.18$ et $y/H=0.36$) où l'écoulement n'est que très faiblement perturbé. Cependant on observe le changement brusque pré-cité en $y/H=0.54$, la contribution des modes 2, 3 et 4 devenant prépondérante. Ce changement ne relève pas d'une transition laminaire/turbulent de l'écoulement. En effet, à partir du mode 4, la contenance énergétique relative des modes secondaires reste assez faible comparée à celle obtenue en $y/H=0.95$ pour la configuration uniformément chauffée. La répartition énergétique des modes secondaires en $y/H=0.8$ et $y/H=0.95$ est significatif d'une homogénéisation de l'écoulement associée à une forte augmentation du mélange. Des répartitions énergétiques similaires sont observables sur les deux mêmes configurations (VREF et V1) mais dans le cas d'un flux injecté de 500W/m^2 par feuillards (non représentées ici).

4. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Dans cet article, une démarche d'étude d'écoulement de convection naturelle en canal ouvert par une analyse modale a été proposée. A partir de données acquises par PIV sur des configurations de chauffage pariétal uniforme et alternée, une décomposition POD a été effectuée. L'analyse de ces

résultats permet d'identifier le passage de panaches ou de structures de survitesse. Des structures tourbillonnaires semblent également pouvoir être identifiées. L'étude de la répartition énergétique relative à l'ensemble des huit premiers modes permet de caractériser le régime de l'écoulement. En configuration uniformément chauffée, la transition à la turbulence s'effectue sur le haut du canal alors qu'à même flux total injecté l'écoulement n'atteint pas ce régime en configuration de chauffage réparti. Cette première analyse est à approfondir et sera complétée par des traitements via les méthodes DMD dont les critères de classement sont fréquentiels. Enfin, ces analyses seront élargies à l'ensemble des champs de grandeurs en utilisant des données numériques issues de modélisation (SGE), menée au CFD laboratory de l'UNSW en Australie.

5. BIBLIOGRAPHIE

- Bloem, J. J. 2008. "Evaluation of a PV-Integrated Building Application in a Well-Controlled Outdoor Test Environment." *Building and Environment*, Outdoor Testing, Analysis and Modelling of Building Components, 43 (2): 205–16. doi:10.1016/j.buildenv.2006.10.041.
- Brinkworth, B. J. 2000. "Estimation of Flow and Heat Transfer for the Design of PV Cooling Ducts." *Solar Energy* 69 (5): 413–20. doi:10.1016/S0038-092X(00)00082-7.
- Chinesta, Francisco, Roland Keunings, and Adrien Leygue. 2013. *The Proper Generalized Decomposition for Advanced Numerical Simulations: A Primer*. Springer Science & Business
- Cordier, L., and M. Bergmann. 2006. "Réduction de Dynamique Par Décomposition Orthogonale Aux Valeurs Propres (POD)." *Ecole de Printemps OCET*, 12–17.
- Gebhart, Benjamin, and R. Mahajan. 1975. "Characteristic Disturbance Frequency in Vertical Natural Convection Flow." *International Journal of Heat and Mass Transfer* 18 (10): 1143–48.
- Hernández, J., and B. Zamora. 2005. "Effects of Variable Properties and Non-Uniform Heating on Natural Convection Flows in Vertical Channels." *International Journal of Heat and Mass Transfer* 48 (3–4): 793–807. doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2004.09.024.
- Manca, Oronzio, Marilena Musto, and Vincenzo Naso. 2003. "Experimental Analysis of Asymmetrical Isoflux Channel-Chimney Systems." *International Journal of Thermal Sciences* 42 (9): 837–46. doi:10.1016/S1290-0729(03)00056-5.
- Miyamoto, M., Y. Katoh, J. Kurima, and H. Sasaki. 1986. "Turbulent Free Convection Heat Transfer from Vertical Parallel Plates." In *PROCEEDINGS OF THE EIGHTH INTERNATIONAL HEAT TRANSFER CONFERENCE. VOLUME 4*, 1593–98.
- Noack, Bernd R., Michael Schlegel, Boye Ahlborn, Gerd Mutschke, Marek Morzyński, and Pierre Comte. 2008. "A Finite-Time Thermodynamics of Unsteady Fluid Flows." *Journal of Non-Equilibrium Thermodynamics* 33 (2): 103–48.
- Sandberg, M., and B. Moshfegh. 2002. "Buoyancy-Induced Air Flow in Photovoltaic Facades: Effect of Geometry of the Air Gap and Location of Solar Cell Modules." *Building and Environment* 37 (3): 211–18. doi:10.1016/S0360-1323(01)00025-7.
- Sanvicente, Estibaliz. 2013. "Experimental Investigation of Thermal and Fluid Dynamical Behavior of Flows in Open-Ended Channels: Application to Building Integrated Photovoltaic (BiPV) Systems." INSA de Lyon. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00961231/>.
- Schmid, Peter J. 2010. "Dynamic Mode Decomposition of Numerical and Experimental Data." *Journal of Fluid Mechanics* 656 (August): 5–28. doi:10.1017/S0022112010001217.
- Sirovich, Lawrence. 1987. "Turbulence and the Dynamics of Coherent Structures. Part I: Coherent Structures." *Quarterly of Applied Mathematics* 45 (3): 561–71.

Validation expérimentale appliquée à la modélisation d'une cellule test de type basse consommation

Stéphanie Bontemps*¹, Laurent Mora¹, Mathieu Schumann²

¹ Université de Bordeaux, UMR CNRS 5295, Laboratoire I2M Département TREFLE
Esplanade des arts et métiers 33405 Talence Cedex

² EDF R&D Département Energie dans les Bâtiments et les Territoires, Site des Renardières
Avenue des Renardières – Écuelles 77818 Moret sur Loing

*stephanie.bontemps@u-bordeaux.fr

RESUME. Cet article présente une méthodologie de validation expérimentale de modèles dans le contexte de bâtiments à basse ou très basse consommation. La méthodologie développée intègre des méthodes d'analyse de sensibilité, d'analyse d'incertitudes et d'estimation des paramètres pour s'assurer de la fidélité et de la justesse du modèle. Un cas d'application est également exposé, comparant des mesures issues d'une cellule test de la plateforme expérimentale BESTLab à des résultats de simulations réalisées sur le logiciel Dymola à partir de composants de la bibliothèque BuildSysPro.

MOTS-CLÉS : analyse de sensibilité, analyse d'incertitudes, estimation des paramètres.

ABSTRACT. This article presents a methodology of empirical validation of models in the context of low or very low energy buildings. The developed methodology uses sensitivity analysis, uncertainty analysis and parameter estimation methods to ensure the model accuracy and consistency. A study case is also presented, comparing measurements from a test cell of the BESTLab experimental platform to simulation results obtained with the Dymola software and components from the BuildSysPro library.

KEYWORDS: sensitivity analysis, uncertainty analysis, parameter estimation.

1. INTRODUCTION

Dans le contexte énergétique actuel, le secteur du bâtiment étant le premier consommateur d'énergie en France et l'un des plus gros émetteurs de gaz à effet de serre, plusieurs programmes ont été entrepris sur ce secteur au niveau européen et national pour réduire ses consommations énergétiques. Ces programmes impliquent la généralisation des bâtiments basse consommation, passifs et à énergie positive mais aussi la rénovation du parc existant et il est nécessaire d'avoir recours à la simulation pour évaluer leur performance énergétique. Pour la garantir, il est primordial de s'assurer de la fiabilité des outils de simulation et des modèles utilisés, et de vérifier qu'ils sont capables de représenter le comportement de tels bâtiments de la façon la plus juste et fidèle possible. Pour cela, plusieurs projets de recherche, notamment les projets PASSYS et BESTEST, ont par le passé mis en œuvre des démarches de validation. Celle-ci est d'autant plus nécessaire aujourd'hui car les hypothèses de modélisation qui étaient valables pour des bâtiments des années 90 ne le sont plus nécessairement aujourd'hui, avec l'augmentation notable des performances des bâtiments allant de pair avec des comportements thermiques spécifiques (Blervaque 2014).

Cet article présente dans un premier temps la méthodologie employée, puis un exemple d'application de validation expérimentale de modèle où des résultats de simulation provenant d'un modèle réalisé dans le logiciel Dymola sont confrontés à des mesures issues d'une cellule test de la plateforme expérimentale BESTLab.

2. METHODOLOGIE DE VALIDATION EXPERIMENTALE

La méthodologie de validation expérimentale adoptée est composée de trois étapes :

- L'analyse de la possibilité d'entamer la validation du modèle, qui tient compte des informations et des données disponibles sur la plateforme expérimentale, son instrumentation, les séquences de mesures disponibles et le modèle considéré ;
- L'évaluation de la qualité du modèle en termes de justesse puis de fidélité, qui se base sur des méthodes d'analyse des résidus, d'analyse de sensibilité et de propagation d'incertitudes ;
- Le diagnostic du modèle qui consiste à déterminer les origines des différences observées entre les mesures et les simulations si elles existent, et à identifier les pistes pour améliorer le modèle. Au cours de cette étape, des méthodes d'analyse de sensibilité globale et d'estimation de paramètres sont employées.

Cet article présente uniquement les deuxième et troisième parties de cette méthodologie et les outils mathématiques utilisés.

2.1. ANALYSE DE SENSIBILITE LOCALE

Cette étape permet, avec des temps de calcul raisonnables, d'étudier l'influence des paramètres d'entrée sur la réponse nominale du modèle, en établissant une hiérarchie au sein des paramètres. La méthode utilisée est celle de l'approximation des dérivées par différences finies qui s'écrit :

$$\frac{\partial y}{\partial x_i} = \frac{y(x_i + \Delta x_i) - y(x_i)}{\Delta x_i} \quad (1)$$

Chaque paramètre est varié de 5 % de sa valeur nominale et l'indice de sensibilité réduit S_i^* est calculé pour chaque paramètre x_i :

$$S_i^*(t) = X_{i_0} \left. \frac{\partial T(t)}{\partial X_i} \right|_{x=x_0} \quad (2)$$

Les paramètres sont alors classés en deux sous-ensembles complémentaires : les paramètres jugés significatifs, avec une influence non négligeable sur la sortie du modèle ; les paramètres ayant peu d'effet sur la sortie du modèle. La valeur des paramètres peu significatifs est fixée à leur valeur nominale avant de procéder aux étapes suivantes de la méthodologie.

2.2. ANALYSE D'INCERTITUDES

L'analyse d'incertitudes consiste à évaluer la variabilité de la sortie du modèle induite par la variabilité des paramètres d'entrée. On utilise pour cela la méthode Hypercube Latin (LHS) (McKay, Beckman, et Conover 1979; Jacques 2011), une méthode probabiliste qui réalise un échantillonnage du domaine de variation des paramètres retenus lors de l'analyse de sensibilité locale. Puis, les différentes simulations pour obtenir une sortie pour chaque échantillon sont menées.

Pour s'assurer que le modèle est fidèle, il faut vérifier que la variabilité de la sortie du modèle due à la variabilité de ses paramètres d'entrée est suffisamment faible, et donc s'assurer que :

$$\exists t \text{ tel que } \sigma^2(t) \gg \sigma_m^2(t) \quad (3)$$

Ou alternativement :

$$\exists t \text{ tel que } l(t) \gg l_m(t) \quad (4)$$

Avec σ^2 et σ_m^2 les variances des intervalles d'incertitudes centrés à 95 % des sorties du modèle $[y(t)] \equiv [y_{min}(t), y_{max}(t)]$ et des mesures $[y_m(t)] \equiv [y_{m,min}(t), y_{m,max}(t)]$, ainsi que $l(t) = y_{max}(t) - y_{min}(t)$ et $l_m(t) = y_{m,max}(t) - y_{m,min}(t)$ les longueurs des intervalles de confiance des sorties et des mesures.

Une fois la fidélité du modèle justifiée, la justesse du modèle, c'est-à-dire lorsqu'il est capable de reproduire en moyenne la réponse observée du bâtiment, est testée en vérifiant :

$$\forall t, \quad [y(t)] \subseteq [y_m(t)] \text{ ou } [y_m(t)] \subseteq [y(t)] \quad (5)$$

Si la condition ci-dessus n'est pas satisfaite, nous exigerons que le recouvrement des intervalles d'incertitudes, $[R(t)] = [y(t)] \cap [y_m(t)]$, soit suffisamment important à tout instant, en imposant :

$$\forall t, \quad \min \left[\frac{l_R(t)}{l(t)}, \frac{l_R(t)}{l_m(t)} \right] > \alpha \quad (6)$$

Avec $l_R(t)$ la longueur de l'intervalle $[R(t)]$ et α la valeur seuil de recouvrement à dépasser.

Si le modèle répond à ces contraintes, au risque consenti de 5 % nous pouvons affirmer que le modèle est capable de reproduire correctement le comportement observé du bâtiment et la validation peut s'arrêter. Dans le cas contraire, le diagnostic doit être entrepris.

2.3. ANALYSE DE SENSIBILITE GLOBALE

L'analyse de sensibilité globale permet de quantifier la contribution de chaque paramètre d'entrée à la variance de la sortie du modèle, tout en tenant compte des possibles corrélations entre paramètres et en explorant leur domaine complet de variation. Les temps de calcul étant bien plus élevés que ceux des méthodes de sensibilité locale, cette méthode est appliquée en ne considérant que les paramètres d'entrée significatifs, retenus lors de l'analyse de sensibilité locale.

Suite à une comparaison des différentes méthodes d'analyse de sensibilité globale (Bontemps 2015), notre choix s'est porté vers les méthodes utilisant la décomposition de la variance avec le calcul des indices de Sobol car ces méthodes sont largement répandues. En particulier une méthode reposant sur la construction d'un métamodèle de type chaos polynomial (Sudret 2008) a été choisie. Avec cette méthode, les indices de Sobol du premier ordre (contribution principale du paramètre à la variance de la sortie du modèle) et totaux (ensemble des contributions du paramètre à la variance de la sortie du modèle) sont directement déduits des coefficients des polynômes (Sudret 2008), calculés à partir de la méthode *Least Angle Regression* (LARS) (Efron et al. 2004).

Grâce à cette étape du diagnostic, il est possible d'identifier les paramètres les plus influents à chaque instant et donc ceux qui offrent *a priori* le plus de chances de rapprocher les résultats simulés aux mesures en faisant varier leurs valeurs, ce qui est fait avec l'estimation des paramètres.

2.4. ESTIMATION DES PARAMETRES

Il s'agit de chercher les valeurs des paramètres d'entrée x_i retenus lors de l'analyse de sensibilité globale qui minimisent les écarts entre les mesures et les simulations. Des méthodes d'optimisation

sont alors utilisées. Pour cette étude, la méthode hybride des essaims particulaires associée à celle de Hooke-Jeeves, dont les avantages ont été présentés dans (Wetter et Wright 2004), est utilisée. Cette méthode implémentée dans GenOpt (Wetter 2000) commence par employer la méthode d'optimisation par essaims particulaires pour s'approcher du minimum global de la fonction objectif. Puis, l'algorithme de recherche par motifs généralisés d'Hooke et Jeeves est utilisé en exploitant les résultats précédents pour sa première itération afin de peaufiner le résultat en cherchant localement.

La fonction objectif à minimiser a été définie comme le calcul de l'écart quadratique pour les résidus $r_{i,s}(t, \mathbf{x})$ dont la valeur absolue est supérieure à l'incertitude de la mesure, soit $0,5 \text{ } ^\circ\text{C}$:

$$f_{obj}(\mathbf{x}) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N r_{i,s}^2(t, \mathbf{x})} \quad (7)$$

Lorsque des variations très importantes (voire invraisemblables) sont observées entre la valeur nominale d'un paramètre et sa valeur optimisée, la modélisation des phénomènes ou des parties du modèle faisant intervenir ce paramètre devrait vraisemblablement être reconsidérée. Des pistes pour améliorer le modèle peuvent alors être dégagées.

3. PLATEFORME EXPERIMENTALE ET SA MODELISATION

La plateforme expérimentale BESTLab (Figure 1), construite sur le site d'EDF Lab Les Renardières et mise en exploitation en 2010, est composée de douze cellules indépendantes construites dans un même bâtiment et réparties sur deux niveaux. Chaque cellule, d'environ 9 m^2 , est composée d'une unique paroi extérieure amovible en contact avec l'extérieur qui peut être opaque ou vitrée. Les cinq autres faces sont surisolées et maintenues à une température constante imposée par la garde thermique.

Cette étude traite de la cellule située au rez-de-chaussée et orientée à l'Ouest (Figure 1). Il s'agit d'une cellule avec une paroi test vitrée de type double vitrage peu émissif avec une lame d'argon. Afin d'assurer le chauffage et le refroidissement dans cette cellule, une Centrale de Traitement d'Air (CTA), couplée à une résistance électrique et à une batterie froide, est installée au centre de la cellule. Celle-ci permet également d'homogénéiser la température d'air au sein de la cellule par brassage. Par ailleurs, la cellule ne dispose d'aucun système de renouvellement d'air. Les infiltrations d'air sont négligées et les ponts thermiques réduits (Bontemps 2015). La plateforme BESTLab est équipée de nombreux systèmes de mesure avec un pas de temps d'acquisition d'une minute, comme détaillés dans (Bontemps et al. 2013).



Figure 1 : Plateforme expérimentale BESTLab et cellule test

Le cas test étudié est une séquence d'évolution libre dont les mesures ont été réalisées du 23 Mars au 04 Mai 2012. La cellule est soumise au climat extérieur avec à l'intérieur une puissance constante d'environ 40 W , liée à l'énergie dissipée par la CTA pour assurer une température d'air homogène dans la cellule.

Cette cellule test a été modélisée avec les composants de la bibliothèque *BuildSysPro* développée par le département EnerBaT d'EDF R&D en langage acausal et orienté objet Modelica, puis simulée avec le logiciel Dymola. Les différentes hypothèses de modélisation sont référencées dans (Bontemps, Blatman, et Mora 2014). Quelques modifications ont néanmoins été apportées au modèle pour réaliser la démarche de validation et diagnostic. Le modèle de pont thermique a été dégradé, afin de vérifier si la méthode de validation expérimentale est en mesure de déceler le problème. Pour ce faire, la sortie étudiée est la température d'air au sein de la cellule et la valeur du pont thermique a été déterminée selon les valeurs de la RT2012 au lieu d'utiliser la valeur obtenue après optimisation par EDF R&D.

4. RESULTATS

4.1. COMPARAISON MESURES SIMULATIONS

Sur la Figure 2 sont tracés les températures d'air intérieure mesurée et calculée sous Dymola ainsi que le résidu calculé de la manière suivante :

$$r(t) = T_{air,m}(t) - T_{air,s}(t) \quad (8)$$

Nous observons un décalage important entre les mesures et les simulations et que le modèle surestime la température à l'intérieur de la cellule. (Bontemps, Blatman, et Mora 2014) donne des informations complémentaires sur l'étude des différentes mesures réalisées au sein de la cellule.

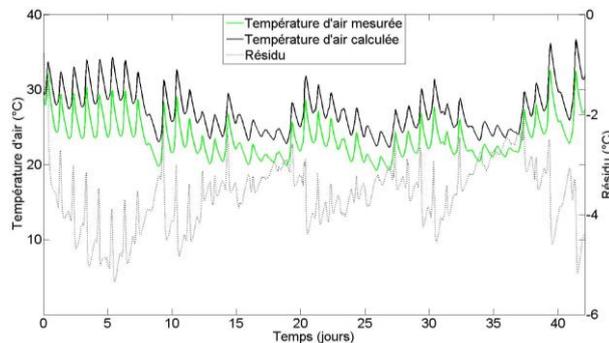


Figure 2 : Température d'air mesurée et calculée avec les résidus

4.2. ANALYSE DE SENSIBILITE LOCALE

L'analyse de sensibilité locale a été menée sur la température d'air calculée au sein de la cellule grâce à un couplage entre le logiciel Dymola et un programme écrit en langage Python pour générer les différentes simulations et calculer les indices de sensibilité réduits. La majorité des paramètres (210) en entrée du logiciel ont été considérés : les données dimensionnelles, les données optiques, les caractéristiques thermophysiques des matériaux, les paramètres convectifs, les caractéristiques de la CTA, la conductance du pont thermique et la température d'initialisation de la cellule. Les paramètres ont ensuite été classés selon la valeur de leur distance définie par :

$$S_{i,d}^* = \sqrt{S_{i,m}^{*2} + S_{i,std}^{*2}} \quad (9)$$

Avec $S_{i,m}^*$ la moyenne et $S_{i,std}^*$ l'écart type des indices de sensibilité réduits du paramètre x_i .

En ne gardant que les paramètres ayant une distance supérieure à 0,5 °C, 25 paramètres sont retenus. Ils sont classés selon leur distance dans le Tableau 1.

N°	Paramètre	N°	Paramètre
1	Surface du vitrage	13	Emissivité des parois opaques
2	Température d'initialisation de la cellule	14	Surface du plancher
3	Coefficient de transmission direct du vitrage	15	Conductance du pont thermique
4	Coefficient de transmission diffus du vitrage	16	Largeur de la fenêtre
5	Surface de la paroi test	17	Surface du PVC de la fenêtre
6	Coefficient de transmission thermique du vitrage	18	Hauteur de la fenêtre
7	Epaisseur du Polystyrène Expandé de la paroi test	19	Conductivité thermique du parpaing du plancher
8	Conductivité thermique du Polystyrène Expandé de la paroi test	20	Epaisseur du parpaing du plancher
9	Débord de l'encadrement de la fenêtre	21	Masse volumique du plancher bois
10	Albédo	22	Capacité thermique massique du plancher bois
11	Surface des murs latéraux	23	Epaisseur du plancher bois
12	Coefficient d'absorption dans le visible des parois opaques extérieures	24	Surface de la paroi du fond de la cellule
		25	Conductivité thermique du PVC de la fenêtre

Tableau 1 : Paramètres retenus lors de l'analyse de sensibilité locale

4.3. ANALYSE D'INCERTITUDES

L'analyse d'incertitudes a été menée sur les paramètres retenus lors de l'analyse de sensibilité locale avec un couplage implémenté entre un programme Python, Dymola et Open Turns. Suite à une étude bibliographique (Tian 2013), une loi normale a été appliquée à l'ensemble des paramètres d'entrée. Les distributions ont été choisies en tenant compte de la littérature avec une troncature à 5σ pour éviter les valeurs physiquement impossibles. Par ailleurs, considérant la stratification de la température d'air dans la cellule (Bontemps, Blatman, et Mora 2014), une incertitude de $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ sur la température d'air mesurée a été considérée. Sur la Figure 3, nous observons que les deux intervalles se rejoignent très rarement (0,72 %). Nous en déduisons donc que le modèle n'est pas juste, sans avoir à calculer le recouvrement. De plus, nous observons que la longueur de l'intervalle des simulations est plus grande que celle de l'intervalle des mesures.

4.4. ANALYSE DE SENSIBILITE GLOBALE

L'analyse de sensibilité globale a été menée sur les paramètres retenus lors de l'analyse de sensibilité locale et les résultats issus de l'analyse d'incertitudes ont été utilisés pour la construction de du métamodèle. Les paramètres dont la moyenne des indices de Sobol du premier ordre est supérieure à 0,1 et/ou dont le maximum est supérieur à 0,5 sont retenus (Figure 4).

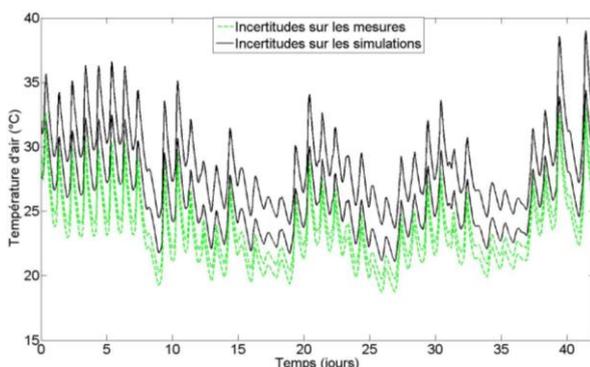


Figure 3 : Comparaison des intervalles de mesures et de simulations à 95%

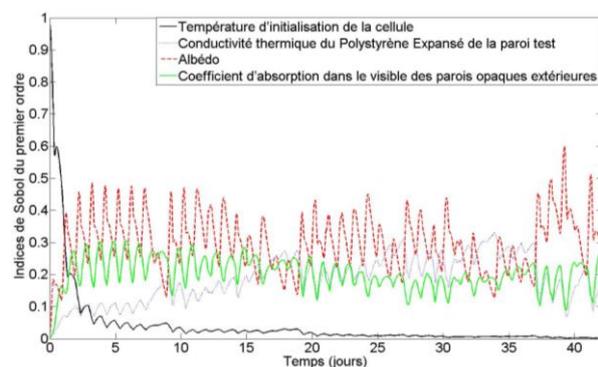


Figure 4 : Évolution temporelle des indices de Sobol du premier ordre des paramètres influents

4.5. ESTIMATION DES PARAMETRES

Sur la Figure 4, nous observons que la température d'initialisation de la cellule a une forte influence en début de séquence. Nous avons donc réalisé une première optimisation sur ce paramètre. Le Tableau 2 renseigne la valeur initiale du paramètre ainsi que sa plage de variation. Nous observons alors que la diminution de la valeur de la fonction objectif est faible (8 %). De plus, même si le résidu est réduit de 1,5 °C en début de séquence, progressivement les résidus initiaux et optimaux se rejoignent (Figure 5). Ainsi, l'initialisation a uniquement un faible effet, en début de simulation.

Une étude a également été menée sur les autres paramètres retenus lors de l'analyse de sensibilité globale en ne considérant que la période où la température d'initialisation n'a pas d'influence, soit après les 9 premiers jours. Une réduction importante de la fonction objectif (81 %) est obtenue (Tableau 2). Pour cela, l'albédo est peu varié alors que les valeurs de la conductivité thermique du polystyrène expansé de la paroi test et du coefficient d'absorption dans le visible des parois opaques extérieures ont des valeurs au-delà de celles physiquement possibles. Ainsi, il est possible que la valeur de l'albédo soit celle observée durant l'expérience. Les variations des autres paramètres suggèrent que la modélisation des phénomènes ou des parties du modèle dans lesquels ils interviennent soit reconsidérée, comme la modélisation de la conduction et la prise en compte du pont thermique à travers la paroi test mais aussi la modélisation des échanges liés au rayonnement solaire.

Une troisième étude d'optimisation sur le pont thermique a été menée et nous avons pu voir qu'une importante augmentation de sa valeur permettait une réduction importante de la valeur de la fonction objectif (Tableau 2) et du résidu (Figure 5). Nous voyons donc l'intérêt de mieux caractériser ce pont thermique dans le modèle car il a une grande influence sur les résultats.

Paramètres variés	Variation des paramètres	Valeur finale des paramètres	$f_{obj}(x)$ initiale	$f_{obj}(x)$ finale
Température d'initialisation dans la cellule	$x_{min} = 298,15$ K $x_{ini} = 303,15$ K $x_{max} = 308,15$ K	300,35 K	3,687 °C	3,381 °C
Conductivité thermique du polystyrène expansé de la paroi test	$x_{min} = 0,0001$ W/m.K $x_{ini} = 0,032$ W/m.K $x_{max} = 0,1$ W/m.K	0,08245 W/m.K		
Albédo	$x_{min} = 0,01$ $x_{ini} = 0,20$ $x_{max} = 1$	0,245	3,511 °C	0,666 °C
Coefficient d'absorption dans le visible des parois opaques extérieures	$x_{min} = 0,01$ $x_{ini} = 0,50$ $x_{max} = 1$	0,035		
Conductance du pont thermique	$x_{min} = 0$ W/K $x_{ini} = 0,4448$ W/K $x_{max} = 10$ W/K	3,07 W/K	3,511 °C	0,930 °C

Tableau 2 : Résultats de l'estimation des paramètres

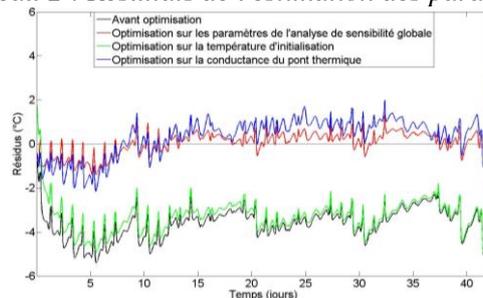


Figure 5: Évolution des résidus au cours des optimisations

5. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Cette étude s'est intéressée à la validation expérimentale d'un modèle d'une cellule test de la plateforme BESTLab, dégradé pour le besoins du cas d'étude. La justesse du modèle n'ayant pu être justifiée, nous avons réalisé le diagnostic du modèle. Nous avons pu voir que l'initialisation de la cellule avait un effet sur les premiers jours de la séquence, moindre comparé aux autres paramètres retenus lors de l'analyse de sensibilité globale. Nous en avons conclu qu'une meilleure connaissance de l'albédo était nécessaire. De plus, une attention particulière doit être portée sur la modélisation des ponts thermiques, tout comme pour le rayonnement solaire.

Bien que nous sachions que la conductance du pont thermique était un paramètre influent, il n'apparaît pas directement lors de l'analyse de sensibilité globale. Ceci peut être lié au fait que cette méthode ne s'intéresse qu'à la variabilité de la sortie et les informations concernant les écarts en moyenne ne sont pas considérées. Des pistes pourraient alors être envisagées pour en tenir compte. De plus, remonter aux hypothèses de modélisation défailtantes à partir des résultats de l'estimation des paramètres reste toujours difficile et des efforts de recherche sont encore nécessaires à ce niveau.

6. BIBLIOGRAPHIE

- Blervaque, H. 2014. « Règles de modélisation des systèmes énergétiques dans les bâtiments basse consommation ». Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris.
- Bontemps, S. 2015. « Validation expérimentale de modèles : application aux bâtiments basse consommation ». Université de Bordeaux.
- Bontemps, S., G. Blatman, et L. Mora. 2014. « Validation expérimentale de modèles dans le contexte de bâtiments basse consommation ». In *Actes Congrès IBPSA France 2014*. Arras, France.
- Bontemps, S., A. Kaemmerlen, G. Blatman, et L. Mora. 2013. « Reliability of dynamic simulation models for building energy in the context of low-energy buildings ». In *Proceedings of BS2013*, 1952-59. Chambéry, France.
- Efron, B., T. Hastie, I. Johnstone, et R. Tibshirani. 2004. « Least angle regression ». *The Annals of statistics* 32 (2): 407-99.
- Jacques, J. 2011. « Pratique de l'analyse de sensibilité : comment évaluer l'impact des entrées aléatoires sur la sortie d'un modèle mathématique ».
- McKay, M. D., R. J. Beckman, et W. J. Conover. 1979. « A Comparison of Three Methods for Selecting Values of Input Variables in the Analysis of Output from a Computer Code ». *Technometrics* 21 (2): 239-45.
- Sudret, B. 2008. « Global sensitivity analysis using polynomial chaos expansions ». *Reliability Engineering & System Safety* 93 (7): 964-79.
- Tian, W. 2013. « A review of sensitivity analysis methods in building energy analysis ». *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 20 (avril): 411-19.
- Wetter, M. 2000. « Design optimization with GenOpt ». *Building Energy Simulation User News* 21: 200.
- Wetter, M., et J. Wright. 2004. « A Comparison of Deterministic and Probabilistic Optimization Algorithms for Nonsmooth Simulation-Based Optimization ». *Building and Environment* 39 (8): 989-99.

Modélisation énergétique d'un parc de chauffe-eau électriques : éléments de validation

Thomas Berthou*¹, Bruno Duplessis¹, Philippe Rivière¹

¹MINES ParisTech, PSL Research University, Centre d'efficacité énergétique des systèmes

60 bd St Michel, 75006 Paris

* thomas.berthou@mines-paristech.fr

RESUME. Un modèle bottom-up de parc de chauffe-eau électrique est construit sur la base d'enquêtes nationales et d'un modèle physique d'accumulation simplifié. Un parc réduit, représentatif de l'ensemble des logements français est utilisé pour limiter le coût de calcul. Les paramètres non connus (débit de puisage d'eau chaude, probabilité de mise en route) sont calibrés afin de minimiser l'erreur sur la prévision de la courbe de charge nationale et sur la consommation annuelle d'électricité liée à l'ECS. Le parc calibré permettrait de tester des stratégies de maîtrise de la demande en électricité à différentes échelles.

MOTS-CLÉS : courbes de charge agrégées, chauffe-eau électriques résidentiels, modélisation bottom-up

ABSTRACT. A bottom-up model of electric water heater stock is built from national census and with simplified water tank model. A reduced stock is used to represent French national dwelling and to have reasonable CPU cost. Unknown parameters (hot water flow rate, start probability) are identified to have the best national load curve prediction and annual electricity consumption link to DHW. The identified stock should be able to design demand-response strategies at several scales.

KEYWORDS: aggregated load curves, residential electric water heater, bottom-up modeling

1. INTRODUCTION

Historiquement, les chauffe-eau électriques peuvent être pilotés à distance par le gestionnaire du réseau pour décaler les consommations la nuit ou en milieu de journée, lorsque la demande en électricité est faible. Cela permet, d'une part de limiter l'utilisation de centrales thermiques souvent chères et polluantes lors de pics journaliers, d'autre part de disposer d'une demande minimum en période de faible consommation et d'absorber ainsi la production des centrales nucléaires peu modulables. Actuellement, les heures de mises en route des chauffe-eau sont choisies par le gestionnaire du réseau de distribution pour chaque nouveau contrat et ne sont pas modifiées d'un jour à l'autre. L'intégration à grande échelle des énergies renouvelables (EnR) météo-dépendantes avec des disparités territoriales fortes suscite un changement de paradigme de gestion des systèmes électriques. En effet, il sera bientôt nécessaire d'adapter la consommation électrique de manière dynamique pour

absorber les variations rapides de production afin de garantir son équilibre avec la consommation. Les chauffe-eau électriques semblent adaptés à cet enjeu pour plusieurs raisons :

- ils représentent un poids important dans la consommation nationale : 13% des consommations électriques du secteur résidentiel, (RTE, 2015),
- ils sont répartis sur tout le territoire français et peuvent donc répondre à des contraintes locales,
- ils sont déjà équipés de volumes de stockage adaptés à des stratégies journalières, leur pilotage dynamique ne devrait pas être source d'inconfort,
- leur temps de réactivité est faible et des cycles de marche-arrêt successifs ne devraient pas dégrader leurs performances.

Utiliser les chauffe-eau électriques comme source de flexibilité énergétique nécessite de simuler un échantillon représentatif des chauffe-eau d'un territoire ainsi que leur réaction aux ordres reçus. Pour cela, il faut disposer de modèles réalistes et validés de puisage d'eau chaude et de ballons de stockage. De plus, il faut connaître l'état actuel du parc de chauffe-eau avec notamment la proportion d'appareils pilotables. Dans cet article nous utiliserons Smart-E (Berthou, et al., 2015), une plateforme de simulation énergétique des territoires, pour simuler les consommations instantanées des chauffe-eau électriques à l'échelle de la France. Smart-E permet le paramétrage et la simulation de plusieurs centaines d'équipements énergétiques en un temps raisonnable à l'aide de modèles physiques simples. Les puisages d'eau chaude et les caractéristiques des équipements sont extrapolés à partir d'enquêtes de terrain (INSEE) qui permettent de représenter la diversité des comportements et des équipements à l'échelle nationale. Dans cette étude, le débit moyen de puisage d'eau chaude, la proportion des chauffe-eau commandés et les probabilités de mise en route sur une journée seront calibrés à l'aide d'une approche mixte (*bottom-up* / *top-down*). Cette étape de calibration permet la validation de l'approche globale de modélisation à grande échelle. La première partie de cet article présente les différentes étapes qui permettent une modélisation réaliste de la consommation électrique du parc de chauffe-eau. La seconde partie propose une méthode de validation du modèle de parc.

2. MODELISATION DU PARC DE CHAUFFE-EAU ELECTRIQUE

2.1. ETAT DE L'ART

Plusieurs auteurs ont modélisé les chauffe-eau électriques afin de quantifier le potentiel de flexibilité lié à leur pilotage, mais peu d'entre eux ont eu la possibilité de modéliser l'ensemble du parc d'un pays de manière *bottom-up* et de confronter les résultats avec des éléments de validation. Le paragraphe suivant présente un rapide état de l'art des études similaires, en insistant sur l'échelle de modélisation et les cas d'études de pilotage/optimisation des systèmes. Kepplinger (Kepplinger, et al., 2015) propose un algorithme de contrôle optimal autonome pour réduire la pointe de consommation électrique à l'échelle d'un logement. Pour cela, il utilise un modèle 1D stratifié associé à des puisages jugés typiques. Cette approche est particulièrement adaptée à une optimisation grande échelle puisque le seul paramètre exogène est le prix de l'électricité. Moreau (Moreau, 2011) a développé une approche similaire, mais à l'échelle d'une région. Il montre qu'il est possible de réduire la pointe de consommation de 35% en arrêtant les chauffe-eau pendant une à deux heures de manière pseudo aléatoire, mais avec des contraintes de confort. Des mesures de consommation électrique, de température d'eau et de puisage lui permettent de valider son modèle. Atikol (Atikol, 2013) a montré qu'il était possible de remplacer la nécessité d'installer une nouvelle capacité de production d'électricité pour les pointes par le pilotage (délestage) de 6000 chauffe-eau. Ceci grâce à l'utilisation

d'un arbre de décision basé sur l'observation des habitudes de consommation. L'originalité de cette étude par rapport à l'état de l'art est double :

- la modélisation bottom-up et une identification infra-horaire des appels de puissance électrique à l'échelle d'un pays grâce à la sélection d'une population de logements représentatifs,
- la modélisation et l'identification de la méthode de pilotage centralisé des chauffe-eau sur le territoire français.

2.2. CONTEXTE FRANÇAIS

Les logements qui ont souscrit à un tarif heures-pleines/heures-creuses (HPHC) ont leur chauffe-eau électrique mis en route à distance par le gestionnaire de réseau (majoritairement ERDF). Les heures de mise en route sont les mêmes chaque jour de l'année, mais peuvent varier d'un logement à l'autre (même situé dans un même quartier). Elles correspondent à 8h, successives ou non, réparties sur 15 heures, une période de 11h la nuit et une période de 4 heures en milieu de journée. Elles coïncident avec des périodes où l'électricité est peu chère. Un chauffe-eau peut recevoir 1 à 3 ordres de mise en route par jour en fonction des besoins du gestionnaire du réseau ; ceci étant fixé contractuellement lors de la mise en place de l'abonnement (tableau 1). Il est bien sûr possible pour les occupants d'un logement de forcer la mise en route du chauffe-eau en dehors des HC, ce qui ne sera pas modélisé dans la suite.

	Horaires	durée des HC
Plage 1	02h00-07h00; 14h00-17h00	8h
Plage 2	22h30-06h30	
Plage 3	23h00-07h00	
Plage 4	23h30-07h30	

Tableau 1 : Exemple de plages horaires HPHC à Paris (13^{ème})

Dans la majorité des cas il y a une seule mise en route du chauffe-eau par jour (ERDF, 2016), pour simplifier le problème on modélisera uniquement cette configuration.

Les abonnements HPHC représentent environ 44% des contrats de fourniture d'électricité, mais correspondent à 69% des consommations énergétiques (CRE, 2013). De plus, 43 % des logements sont équipés de chauffe-eau électriques avec accumulation et 6% sont instantanés (ADEME, 2013). L'utilisation de chauffe-eau instantanés est mal connue : on fait l'hypothèse que leur utilisation reste marginale et représente une faible consommation. Ils ne seront donc pas modélisés dans la suite. Les chauffe-eau thermodynamiques représentent 2% des systèmes installés, ils ne seront pas pris en compte dans la suite de l'étude.

2.3. CREATION D'UN PARC REPRESENTATIF DE LA FRANCE

L'objectif est de modéliser un parc de logements réduit, représentatif de l'ensemble des logements français. Cela permet de conserver une diversité de systèmes et de comportements, d'utiliser des études de références à l'échelle nationale pour l'identification des paramètres mal connus et de réduire

les temps de calcul. Ce parc réduit permettra notamment de valider les consommations d'énergie annuelles (usage par usage) dans Smart-E, à l'échelle nationale.

La base de données « Recensement de la population 2012 » (INSEE, 2015) est utilisée pour la création du parc. Cette base de données contient notamment des informations sur le bâti (période de construction, surface), les occupants (nombre, âge, emploi), sur l'énergie utilisée pour le chauffage et sur la localisation. Elle ne contient pas d'informations sur les chauffe-eau : les technologies utilisées seront donc attribuées aux logements de manière à respecter les statistiques nationales. Les chauffe-eau électriques à accumulation sont attribués en priorité aux logements qui possèdent un système de chauffage électrique (34% des logements) les 10% restant sont distribués aléatoirement sur les logements utilisant d'autres sources d'énergie. Les volumes des ballons d'eau chaude sont issus des statistiques de ventes (VHK, 2007) et sont distribués en fonction de la surface des logements : les volumes faibles pour les petites surfaces et les volumes importants pour les grandes surfaces (tableau 2).

Volume (l)	80	100	150	200	400
Proportion (%)	5.5	3.3	13.7	60.5	17.0

Tableau 2 : Volume de vente des ballons d'eau-chaude en France, hors production instantanée

Le parc réduit doit être constitué d'un nombre suffisant de logements pour représenter la diversité de comportements, de systèmes et générer un profil de consommation électrique similaire au territoire français. Le parc réduit respecte un certain nombre de critères descriptifs présentés dans le tableau 3.

Désignation	Valeurs cibles	Erreur relative du parc réduit
type de logement	collectifs : 41.9% individuels : 58.1%	< 5%
Energie principale pour le chauffage	électricité : 32% gaz naturel : 35.9% fioul : 13.7%	
nombre d'occupants moyen	2.26	
surface de logement moyen	91 m	

Tableau 3 : Critères de représentativité retenus pour la validation du parc réduit

En définitive, le parc réduit est créé en piochant de manière pseudo-aléatoire 10 000 logements de la base de données « Recensement de la population 2012 ». Ce nombre est choisi de manière à pouvoir réaliser la simulation en un temps raisonnable et avoir un niveau d'agrégation suffisant, même pour des systèmes présents dans une proportion réduite des logements. Ce parc réduit est jugé représentatif du parc français dans la mesure où il respecte les 7 critères présentés dans le tableau 3.

2.4. MODELISATION DES PUISAGES D'EAU CHAUDE

Afin de disposer des débits de puisage d'eau chaude représentatifs de la diversité de comportements, nous utilisons l'enquête emploi du temps de l'INSEE (INSEE, 2012). Cette enquête est constituée de 19 000 carnets d'activité de 24h décrivant, toutes les 10 minutes, les activités réalisées par les personnes interrogées. Chaque carnet est pondéré par un coefficient pour que l'ensemble de l'étude soit représentatif de la population française. Parmi les activités décrites dans les carnets et susceptibles de générer une consommation d'eau chaude, seules les activités liées aux soins des personnes (douches) et à la cuisine (vaisselles) sont retenues. La diversité de comportement est liée au moment et à la durée des activités. Des profils de puisage unitaire d'une semaine sont créés en

séparant les jours travaillés des jours chômés (samedi et dimanche) et l'activité principale de la personne interrogée. Nous ne disposons pas de données suffisantes pour associer des débits de puisage spécifiques à chaque activité. Le débit est donc choisi comme paramètre d'ajustement pour retrouver l'énergie consommée pour l'usage ECS. Les données de l'AICVF (COSTIC, 2014) sont comparées avec les puisages calculés afin de valider la forme d'un profil de puisage agrégé. Les séries temporelles de la figure 1 sont normalisées par leur valeur maximale.

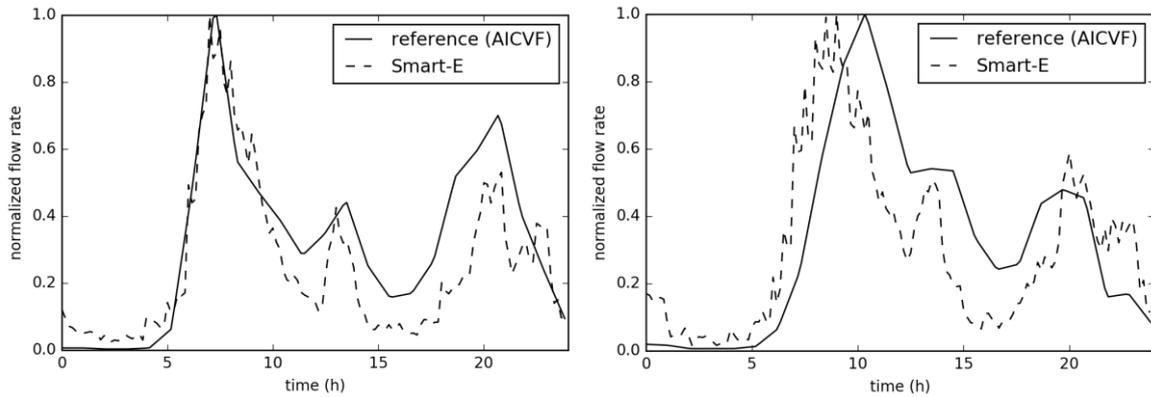


Figure 1 : Elément de validation de la forme des profils de puisage d'eau chaude : jour de semaine à gauche ($R^2=0.67$), jour de weekend à droite ($R^2=0.5$)

Les puisages simulés dans Smart-E et ceux de l'AICVF sont ressemblants malgré leur faible corrélation. On remarque la présence de 3 pics de consommation : le matin, le midi et le soir pour les deux courbes. Les pointes ont lieu au même moment sauf le weekend où la pointe du matin est environ 1 heure plus tôt pour Smart-E que pour l'AICVF. Les creux de milieu de matinée et de milieu d'après-midi sont plus marqués dans Smart-E. Ceci peut s'expliquer par un phénomène de lissage des données AICVF qui sont au pas de temps d'une heure, contre 10 minutes pour Smart-E. On rappelle que le même débit est utilisé pour tous les puisages d'eau chaude, ce qui peut créer un biais important dans les simulations. Cette comparaison permet une validation visuelle des hypothèses de simulation des puisages d'eau chaude.

2.5. MODELE PHYSIQUE DE CHAUFFE-EAU ELECTRIQUE

Un modèle de bilan énergétique sur un volume d'eau du ballon est proposé (figure 3), il est inspiré de Celador (Celador, et al., 2011). Les phénomènes de stratification et de thermosiphon ne sont pas modélisés, les variations de température sont supposées uniformes sur le volume d'eau supérieur représentant 67% du volume total. Par un changement de variable (température vers hauteur de l'interface) il est possible de retrouver le modèle à deux strates : une strate chaude et une strate froide avec une hauteur de déclenchement en fonction de la position de la couche d'interface entre les deux.

Pour un chauffe-eau non commandé, le chauffage se déclenche lorsque la température d'eau est inférieure à une valeur seuil, ce jusqu'à ce que la température maximale soit atteinte. Lorsque qu'il est commandé, il reçoit un ordre de démarrage toutes les 24h et le chauffage fonctionne jusqu'au moment où la température d'eau atteint la valeur maximale. Le système commandé peut se remettre en route à nouveau dans la période HC en cas de puisage. On suppose le système non utilisé lorsque la température d'eau est inférieure à 37°C.

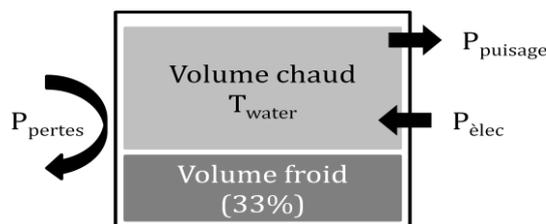


Figure 2 : Représentation du modèle de chauffe-eau électrique

- Les pertes thermiques de stockage (P_{pertes}) sont calculées de la manière suivante :
 $P_{\text{pertes}} = UA * (T_{\text{water}} - 20)$, avec UA les déperditions en W/K (Wilkenfeld, et al., 2013)
- La puissance de puisage (P_{puisage}) correspond à un débit d'eau à 60°C.
- La puissance électrique ($P_{\text{élec}}$) est fixée à 12 watts par litre de stockage

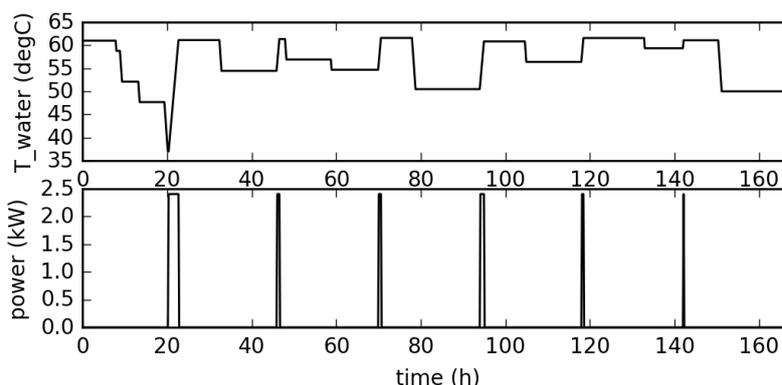


Figure 3 : Exemple d'une semaine de fonctionnement d'un chauffe-eau, ballon de 200 litres piloté

3. CALIBRATION DU MODELE

3.1. CALIBRATION DES DEBITS D'EAU MOYENS

Le débit de puisage est choisi comme paramètre pour la calibration de la consommation énergétique du parc national de chauffe-eau électriques. Il existe des données de débits normalisés pour chaque utilisation d'eau chaude, mais il ne nous est pas possible de les relier aux activités de l'enquête « Emplois Du Temps » car les informations sur la nature des activités ne sont pas assez précises. Dans une première approche, un débit moyen de puisage d'eau chaude à 60°C est utilisé pour tous les logements. Le parc de logements réduit, représentatif de la France, est utilisé. Il est constitué d'environ 4700 chauffe-eau à accumulation, qui sont modélisés dans leur totalité. L'énergie annuelle simulée dans Smart-E est comparée avec la consommation d'ECS obtenue par le modèle RTE pour l'année 2014 (RTE, 2015). La relation liant le débit et l'énergie étant linéaire, il est facile d'obtenir exactement la consommation cible de 20.6 TWh ou 1500 kWh/an par appareil. Cette consommation est obtenue pour un débit moyen de 0.9 l/min. Le tableau 4 compare ce débit avec les valeurs de références (COSTIC, 2014).

provenance	usages	débit à 60°C (l/min)	durée (min)	volume (l)
Smart-E	tous usages	0.9	10*	9
Norme (EN 13203)	vaisselle	3.6	1.5 à 3.5	5.4 à 12.6
	douche	5.4	4.5 à 5.7	24.3 à 30.8
AICVF	vaisselle	3	3 à 5	9 à 15
	douche	2.5 à 5	3 à 6	8 à 35

Tableau 4 : Comparaison des débits Smart-E avec les valeurs de références.

La durée de puisage minimum dans Smart-E est de 10 minutes ce qui crée un biais dans la modélisation des événements qui durent moins de 10 minutes (douches par exemple). Ceci explique le débit faible identifié. En comparant les volumes d'eau puisés par événement modélisé et non les débits, on retrouve des valeurs compatibles avec les valeurs de l'AICFV.

3.2. IDENTIFICATION DU MODE DE PILOTAGE

La part des chauffe-eau commandés et la distribution horaire de leur mise en route par ERDF ne sont pas connues. Nous proposons d'identifier ces paramètres à partir de la reconstitution journalière de la forme de la courbe de charge (CdC) électrique nationale de RTE (RTE, 2015), ceci en minimisant l'écart entre la forme de la courbe de référence avec la forme de la courbe de charge simulée par Smart-E. Pour réduire la dimension du problème, on pose les hypothèses suivantes :

- Les ordres de mise en route peuvent avoir lieu en heures creuses uniquement, soit la nuit entre deux valeurs à identifier, soit la journée entre deux valeurs à identifier.
- La forme de la fonction de probabilité de mise en route est à identifier entre une distribution uniforme ou log-normale de variance 1.

Une méthode d'optimisation heuristique est choisie pour l'identification des paramètres (tableau 5)

Paramètres à identifier	Valeurs identifiées
Proportion d'appareils non commandés	15%
Densité de probabilité en journée	11h30 – 14h10 log-normale (9%)
Densité de probabilité la nuit	21h30 – 00h00 : uniforme (38%)
	00h00 – 02h00 : uniforme (25%)
	02h00 – 3h50 : uniforme (13%)

Tableau 5 : Résultats de l'identification des ordres de mise en route

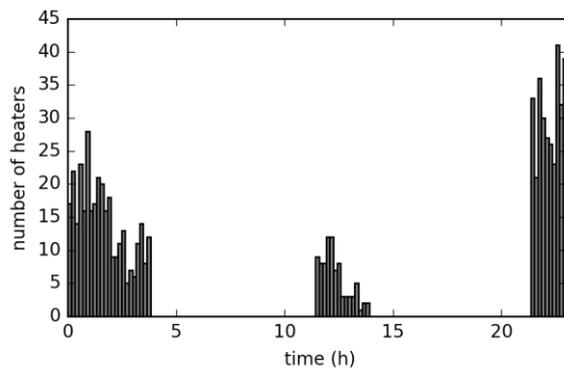


Figure 4 : Distribution des ordres de mise en route pour 780 chauffe-eau électriques commandés

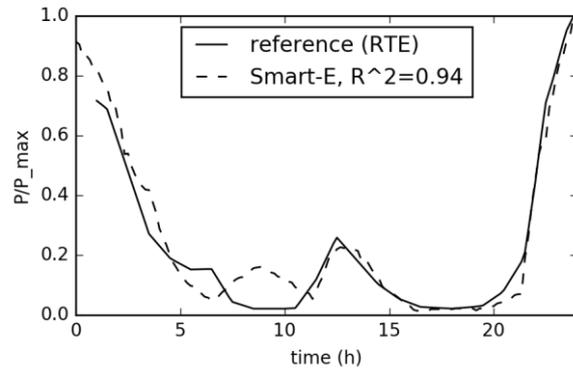


Figure 5 : Puissance électrique normalisée, comparaison sur une journée de janvier

La figure 4 représente la répartition des ordres de mise en route des 85% de chauffe-eau électriques commandés. Le modèle de parc de chauffe-eau électriques identifié est proche de la référence (figure 5), cependant des phénomènes sont mal modélisés entre 5 h et 11h. En effet, la CdC simulée ne présente pas le plateau observé entre 5h et 6h sur la CdC de référence. Cette différence peut s'expliquer par un manque d'information sur les températures de déclenchement des ballons commandés qui peuvent se relancer en fin d'HC en cas de puisage tôt le matin. De plus, un pic de consommation est observé vers 9h sur la CdC simulée, absent de la référence. Ce pic provient des chauffe-eau non commandés, qui sont essentiellement sollicités le matin (voir figure 1).

4. CONCLUSION

Un modèle *bottom-up* de parc de chauffe-eau électrique a été construit sur la base d'enquêtes nationales et d'un modèle physique d'accumulation simplifiée. Les paramètres non connus (débit de puisage, probabilité de mise en route) ont été identifiés afin de minimiser l'erreur sur la prévision de la courbe de charge nationale agrégée et sur la consommation annuelle de l'usage ECS. Les possibilités d'amélioration du modèle sont nombreuses, on retiendra notamment le manque d'information sur les usages de l'ECS pour pouvoir adapter les débits d'eau chaude en fonction des usages.

Le modèle de parc identifié, et dans une certaine mesure validé, permettrait de tester des stratégies de décalage de charge d'ECS pour favoriser l'autoconsommation de la production locale d'énergies et le développement des offres d'effacement. Ce modèle, peu coûteux en temps de calcul, a l'avantage de pouvoir être paramétré en fonction des évolutions des usages ou des technologies.

5. BIBLIOGRAPHIE

- ADEME, 2013. Baromètre 10 000 ménages : Les ménages français face à l'efficacité énergétique de leur logement. *Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie*.
- Atikol, U., 2013. A simple peak shifting DSM (demand-side management) strategy for residential water heaters. *Energy*, Issue 63.
- Berthou, T. et al., 2015. SMART-E: A TOOL FOR ENERGY DEMAND SIMULATION AND OPTIMIZATION AT THE CITY SCALE. *Building Simulation 2015*.
- Celador, A. C., Odriozola, M. & Sala, J., 2011. Implications of the modelling of stratified hot water storage tanks in the simulation of CHP plants. *Energy Conversion and Management*, Issue 52.
- COSTIC, 2014. PACTE ECS - Les besoins d'ECS en habitat - Rapport final.
- CRE, 2013. Le fonctionnement des marchés de détail français de l'électricité et du gaz naturel. *Commission de régulation de l'énergie*.
- ERDF, 2016. Site internet. <http://www.erdf.fr/classes-temporelles>, consulté le 15/03/2016.
- INSEE, 2012. Enquête Emplois du Temps 2010. <http://www.insee.fr/>, consulté le 15/03/2016.
- INSEE, 2015. Recensements de la population 2012. <http://www.insee.fr/>, consulté le 15/03/2016.
- Kepplinger, P., Huber, G. & Petrasch, J., 2015. Autonomous optimal control for demand side management with resistive domestic hot water heaters using linear optimization. *Energy and Buildings*, Issue 100.
- Moreau, A., 2011. Control Strategy for Domestic Water Heaters during Peak Periods and its Impact on the Demand for Electricity. *ICSGCE 2011*.
- RTE, 2015. Bilan prévisionnel de l'équilibre offre-demande d'électricité en France. <http://www.rte-france.com/fr/article/bilan-previsionnel>, consulté le 15/03/2016.
- VHK, 2007. Eco-design of water heaters. *European commission, final report*.
- Wilkenfeld, G. et al., 2013. Heat Pump Water Heaters: Potential for Harmonization of International Test Standards. *Final report, On behalf of CLASP*.

Méthodologie pour la comparaison de structures de modèles simplifiés

Lisa SCANU^{*1,2}, Pierre BERNAUD¹, Stéphane PLOIX² and Etienne WURTZ¹

¹ Univ. Grenoble Alpes, INES,
F-73375 Le Bourget du Lac, France
CEA, LITEN, Département des Technologies Solaires,
F-73375 Le Bourget du Lac, France

² GSCOP, INPG/UJF/CNRS
46 Avenue Félix Viallet, 38000 Grenoble, France
^{*}lisa.scanu@cea.fr

RESUME. Cet article présente une méthodologie pour comparer différentes structures de modèles simplifiés pour alimenter un système de gestion énergétique dont l'objectif est de fournir du conseil aux occupants d'une zone de vie. Dans un premier temps, une ontologie des modèles existants est proposée puis une méthodologie permettant l'estimation paramétrique, la validation et la comparaison de ces modèles est présentée. Il est notamment montré que même les modèles à 2 capacités soient théoriquement plus précis, leur estimation paramétrique est plus difficile à réaliser. Ainsi, un modèle à une capacité est plus pertinent compte tenu de l'objectif recherché.

MOTS-CLÉS. Modélisation bâtiment, Gestion énergétique, Conseils à l'utilisateur, Implication de l'occupant

ABSTRACT. This paper presents a methodology to compare different structures of simplified building models that aim at feeding energy management systems providing advice to occupants of living areas. It will define firstly the existing model ontology and will detail then the methodology to estimate the unknown parameters, validate and compare those models. It is shown in particular that even if 2 capacities thermal model are theoretically more accurate, 1 capacity models are more relevant for energy management taking into account parameter estimation

KEYWORDS. Building modelling, Energy management, Advice to users, Users involvement

1 INTRODUCTION

Dans le domaine du bâtiment, les efforts de recherche ont d'abord été concentrés sur la performance de l'enveloppe. Aujourd'hui, les travaux menés dans le cadre du projet ANR INVOLVED cherchent à replacer l'utilisateur au centre de la démarche de gestion de l'énergie afin de favoriser une meilleure prise en main des systèmes énergétiques développés et une meilleure compréhension des phénomènes en jeu. Un des moyens envisagé est de créer de l'interaction avec l'utilisateur en lui fournissant de l'information sur le contexte énergétique; information qui sera générée par des

capteurs et une modélisation du comportement du bâtiment. Dans ce contexte, nous cherchons à développer des modèles permettant de fournir ces services à l'utilisateur. Ils pourront, par exemple, proposer de simuler l'impact d'une action (ex : ouverture de fenêtre) sur les températures intérieures, les consommations énergétiques et la qualité de l'air. En préambule, il a fallu identifier dans la bibliographie les différents types de modèles simplifiés du bâtiment ainsi que les diverses hypothèses implicites. Différents aspects ont été analysés comparativement sur un bureau occupé : la modélisation de l'inertie, le point d'entrée des apports solaires et la méthode de résolution.

2 CONTEXTE

2.1 BESOINS DE LA MODÉLISATION

Les modèles sont généralement regroupés en trois grandes catégories :

- les modèles de connaissances ou modèles "boîtes blanches"
- les modèles semi-physique ou modèles "boîtes grises"
- les modèles d'expérience ou modèles "boîtes noires"

Les modèles de connaissances sont basés sur des modèles plus généraux faisant appel aux lois de la physique. Ils demandent beaucoup d'informations sur les caractéristiques physiques des bâtiments et les phénomènes mis en jeu. Ils peuvent renvoyer des résultats avec une grande précision tant sur le plan spatial que temporel.

Les modèles d'expérience à l'inverse sont des modèles ne nécessitant aucune connaissance préalable et dont les paramètres sont appris via des mesures. La valeur de ces paramètres n'a alors plus aucun lien avec la physique et il est impossible de remonter aux données physiques du bâtiment par exemple.

Entre ces deux typologies de modèles, on retrouve des modèles semi-physiques, plus communément appelés modèles "boîtes grises". Ils combinent une part de connaissance physique formalisée par des équations et une part de paramètres inconnus appris grâce à une phase d'apprentissage. Ils sont donc construits à la fois à partir de lois physiques et de mesures. Ces modèles sont un compromis intéressant puisqu'ils combinent des modèles plus facilement extrapolables que des modèles boîtes noires tout en gardant une grande capacité d'adaptation avec des paramètres ajustables.

2.2 BESOINS DE LA GESTION ÉNERGÉTIQUE

Dans le domaine de l'énergie du bâtiment, la plupart des modèles a été conçue pour faire des analyses de besoins énergétiques en phase de conception afin d'orienter les choix en terme de matériaux, d'architecture ou de vérifier le respect des réglementations thermiques. Les études se font donc la plupart du temps sur des besoins annuels. Si on s'intéresse à la réglementation thermique française, la RT2012 limite les consommations annuelles moyennes des bâtiments afin de prévenir la construction de bâtiments trop énergivores. Toutefois, le calcul est basé sur des scénarios types en termes d'occupation, de consignes de chauffage,... qui sont souvent très éloignés de la réalité. En conséquence, on constate de grands écarts entre les consommations prévues et les consommations réelles des bâtiments. D'autre part, plus les bâtiments deviennent énergétiquement performants, plus les usages ont un impact important sur les consommations. Or, il est très difficile de prévoir les usages sur un long terme, il devient très vite nécessaire de s'adapter et d'avoir des échelles de temps très courtes. C'est là que la gestion énergétique prend tout son sens ; elle permet de proposer des solutions de gestion évolutives et en accord avec les différents usages qui peuvent être faits d'un même bâtiment à différentes périodes.

Les objectifs de la gestion énergétique du bâtiment sont complètement différents ; elle vise à produire des consignes adaptées à l'usage pour des temps très courts. La granularité requise

est donc très différente de celle nécessaire à des calculs de performance bâtiment. On passe d'un horizon annuel à un horizon de 24 heures. Les prévisions portent généralement sur des consignes de chauffage, des températures intérieures et des concentrations de CO₂. Il n'est pas nécessaire d'avoir une grande précision dans les mesures ni un pas de temps de l'ordre de la minute. Toutefois, certains phénomènes négligés lorsqu'on se situe sur des échelles plus grandes se doivent d'être prises en compte dans des calculs de gestion énergétique. On peut citer par exemple l'impact de l'ouverture des portes et fenêtres sur les bilans thermiques et de CO₂.

Dans notre étude, on cherche à identifier des structures de modèles permettant de fournir du conseil aux occupants aussi bien dans des logements anciens que dans des logements récents. Il est donc nécessaire de pouvoir s'affranchir d'une connaissance très précise de la structure du bâtiment (isolation, matériaux,...) tout en restant capable de remonter à une signification physique des paramètres pour pouvoir générer de l'explication et des conseils pertinents. Les modèles semi-physiques sont donc a priori particulièrement adaptés à notre besoin.

3 MODÉLISATION "BOÎTE GRISE"

3.1 ONTOLOGIE DE MODÈLES

Dans le domaine de l'énergétique des bâtiments, les modélisations de type analogie électrique sont très répandues. Elles permettent une bonne représentation des différents éléments du bâtiment et une grande simplicité d'utilisation. C'est donc vers cette option que nous nous orientons. Toutefois, lorsqu'on s'oriente vers une modélisation physique ou semi-physique, il est important de se poser la question de la granularité requise et donc des phénomènes physiques à prendre en compte mais également des éléments du bâtiment qu'il est pertinent de modéliser. Comme on l'a vu précédemment, ce choix va être fortement impacté par l'objectif du modèle, toutefois certains éléments reviennent de manière récurrente dans la littérature. On peut identifier trois principaux points sur lesquels les auteurs ont des opinions divergentes :

- la localisation de l'inertie
- le calcul et l'impact des apports solaires
- la méthode de résolution

Si la plupart des auteurs considèrent les murs extérieurs et l'air comme suffisants pour modéliser l'inertie du bâtiment, (Hazyuk et al., 2012) et (Mathews et al., 1994) prennent également en compte l'impact de la dalle. En ce qui concerne l'impact des apports solaires, on constate plus d'hétérogénéité dans les solutions proposées. (Teichmann et al., 2013), (Achterbosch et al., 1985) et (Bacher et Madsen, 2011) considèrent que les apports solaires contribuent directement à réchauffer l'air ambiant mais ne prennent pas en compte le réchauffement des parois extérieures et intérieures. D'autres, comme (Berthou et al., 2012) ou encore (Hazyuk et al., 2012) prennent également en considération l'impact sur les parois extérieures tandis que (Nielsen, 2005) privilégie l'impact sur les parois intérieures. (Kämpf et Robinson, 2007) et (Foucquier et al., 2013) vont encore plus loin en combinant ces trois lieux d'impact du rayonnement solaire. (Mathews et al., 1994) est l'un des seuls à négliger l'impact des apports solaires sur l'air intérieur et donc la composante radiative, il ne considère que l'impact sur les parois intérieures et extérieures. Ces approches différentes peuvent être expliquées en partie par la diversité des objectifs associés : certains visent à quantifier la performance des bâtiments, d'autres cherchent à créer des modèles pour la gestion énergétique et d'autres encore à lancer des simulations à l'échelle quartier.

3.2 MODÈLE DE RÉFÉRENCE

En s'appuyant sur ces différentes ontologies de modèles, nous avons construit notre propre ontologie afin de prendre en compte l'impact des ouvertures des portes et fenêtres et ainsi pouvoir

tourner notre modèle en direction de la génération de conseils à l'utilisateur à l'échelle de la journée. Nous considérons ainsi qu'un logement est constitué de différentes zones et de connexions entre ces zones. Chaque zone est caractérisée par sa localisation géographique, son inertie, son volume, sa superficie, ses équipements et ses capteurs. Les connexions sont elles de plusieurs types : ouverture ou murs. Les murs sont caractérisés par leur résistance thermique tandis que les ouvertures sont encore déclinées en plusieurs catégories. On trouve des ouvertures avec une surface vitrée ou opaque. Les ouvertures avec une surface vitrée sont caractérisées par leur caractère mobile ou non, par leur surface, par leur orientation et par le capteur indiquant leur état. Les connexions opaques sont caractérisées uniquement par leur caractère mobile.

Il était indispensable de pouvoir prendre en compte ces caractéristiques dans les modèles. Les structures existantes différaient entre elles sur de nombreux points, il aurait été donc très compliqué de pouvoir les comparer directement entre elles et de pouvoir quantifier l'impact de telle ou telle modification. Nous avons donc choisi d'extraire de la littérature les différentes hypothèses faites en termes de prise en compte de l'inertie et de calculs des apports solaires afin d'en tester l'impact sur une structure donnée. Nous sommes donc partis d'une typologie simple localisant la totalité de l'inertie du bâtiment en une seule capacité équivalente fictive (cf. figure 1). Cela nous permet ainsi de mieux analyser les améliorations apportées par les différentes hypothèses tout en permettant de fournir du conseil à l'utilisateur sur les actions à mettre en place pour atteindre ses objectifs.

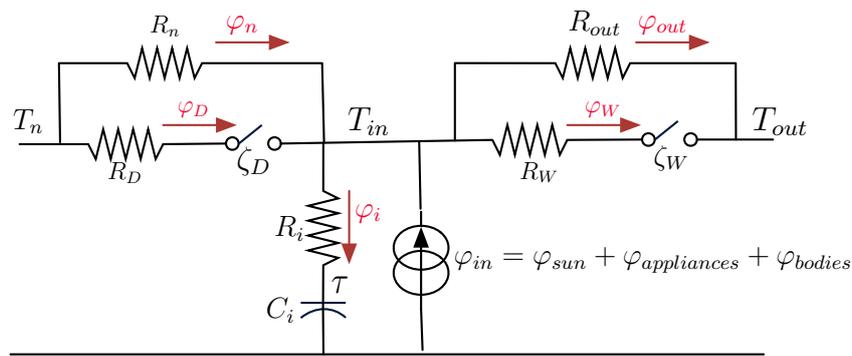


FIGURE 1. Modèle de référence

T_n , T_{in} et T_{out} représentent respectivement la température de la pièce voisine, du bureau considéré et de l'extérieur

R_n et R_{out} représentent la résistance de la paroi séparant le bureau respectivement de la pièce voisine et de l'extérieur

R_D et R_W représentent respectivement la résistance de la porte et de la fenêtre

ζ_D et ζ_W représente l'ouverture ou non de la porte et de la fenêtre

R_i et C_i représentent respectivement la résistance et la capacité du mur fictif

ϕ_{in} les apports internes : apports solaires, apports électriques et apports dû à l'occupation

Soit :

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_i} + \frac{1}{R_{out}} + \frac{\zeta_W}{R_W} + \frac{1}{R_n} + \frac{\zeta_D}{R_D} \quad (1)$$

où :

$$R_D = \frac{1}{\rho_{air} c_{p,air} Q_D} \quad (2)$$

$$R_W = \frac{1}{\rho_{air} c_{p,air} Q_W} \quad (3)$$

$$\frac{d\tau}{dt} = \frac{R - R_i}{R_i^2 C_i} + \frac{R}{R_i C_i} \phi_{in} + \frac{R}{R_i C_i} \left(\frac{1}{R_{out}} + \frac{\zeta_W}{R_W} \right) T_{out} + \frac{R}{R_i C_i} \left(\frac{1}{R_n} + \frac{\zeta_D}{R_D} \right) T_n \quad (4)$$

$$T_{in} = \frac{R}{R_i}\tau + R\left(\frac{1}{R_{out}} + \frac{\zeta_W}{R_W}\right)T_{out} + R\left(\frac{1}{R_n} + \frac{\zeta_D}{R_D}\right)T_n \quad (5)$$

avec R_n, R_{out}, R_i et C_i invariants dans le temps

Puis, à partir de cette typologie, nous allons tester l'ensemble des différentes approches répertoriées dans le tableau 1.

Localisation de l'inertie			
Murs extérieurs + Air ambiant	Murs extérieurs + Murs intérieurs	Murs extérieurs + Murs intérieurs + Air ambiant	Murs intérieurs + Air ambiant

TABLE 1 – Approches à tester

4 ESTIMATION PARAMÉTRIQUE

Comme on l'a vu dans la partie 3, l'utilisation de modèles semi-physiques requiert une étape de calibrage du modèle. Il existe pour cela de nombreuses méthodes dans la littérature. Un calibrage "classique" consiste à réaliser plusieurs optimisations et à garder le jeu de paramètres qui minimise le critère d'erreur. Toutefois, cette façon de procéder n'est pas robuste : elle ne garantit pas l'unicité du jeu de paramètres trouvé. L'objectif ici est de tester une nouvelle approche qui «guide» l'optimisation. Ce calibrage s'organise en plusieurs étapes :

1. On fixe tous les paramètres sauf un
2. On fait varier ce paramètre sur son intervalle de définition
3. On étudie la monotonie du critère d'erreur
4. Si le critère d'erreur est strictement monotone, on le fixe à sa valeur initiale. Sinon, on le fixe à sa valeur «optimale»
5. On reprend la boucle avec le paramètre suivant

Cela permet de limiter le nombre de paramètres à optimiser et de ne pas chercher à optimiser des paramètres qui s'éloigneraient trop de leur sens physique en atteignant leurs bornes.

5 PREMIERS RÉSULTATS ET LIMITES

5.1 CAS D'ÉTUDES

Nous avons choisi comme cas d'études pour tester nos modèles un bureau occupé par un chercheur et deux à trois doctorants. Ce bureau se situe sur le site Viallet de l'Institut Polytechnique de Grenoble. Le site, d'une superficie de 1500m² a été équipé de près de 200 capteurs ENOCEAN. On retrouve parmi ces capteurs : des capteurs de température, de CO₂ et COV, de contact de portes et fenêtres, de mouvement, de luminosité, d'humidité, de consommation électrique, une station météo, ...

Dans le bureau considéré, on se servira principalement des données issues des capteurs de température, CO₂, consommations électrique, contacts de portes et fenêtres et les données issues de la station météo pour ce qui est de la température extérieure et de l'éclairement. Les comportements d'un bâtiment étant fortement différents sur des périodes d'hiver et d'été, nous avons choisi deux périodes distinctes de validation : d'avril à mai 2015 et de novembre à décembre 2015.

5.2 MODÈLE DE RÉFÉRENCE

Nous avons tout d'abord commencé par appliquer le modèle de référence au cas d'études détaillé ci-dessus. Les résultats sont présentés dans les figures 2 et 3 ainsi que dans le tableau 2.

Toffice average error = -0.098081 Toffice average absolute error = 0.301008 Toffice max error = 1.200197 Toffice min error = -2.394398	office CO2 average error = -7.115636 office CO2 average absolute error = 50.676616 office CO2 max error = 443.443990 office CO2 min error = -623.315350
-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

TABLE 2 – Erreurs liées au modèle de référence

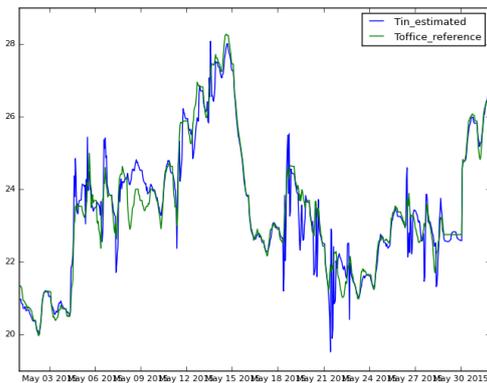


FIGURE 2. Évolution de la température du bureau mesurée et simulée

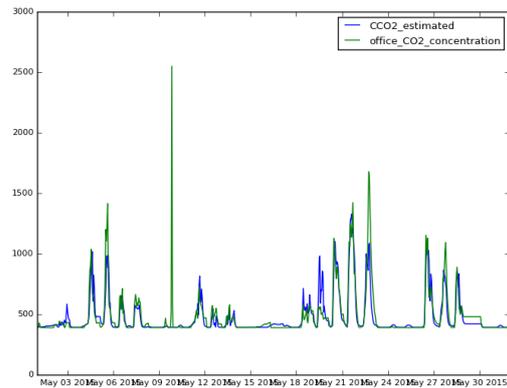


FIGURE 3. Évolution des concentrations de CO₂ mesurées et simulées

5.3 MODIFICATION DE L'INERTIE

L'étape suivante a consisté à modifier la prise en compte de l'inertie afin d'en mesurer l'impact sur la précision et le temps de calcul nécessaire à l'estimation paramétrique. Ainsi, d'un côté nous avons ajouté à la capacité fictive, la capacité de l'air contenu dans la pièce et en parallèle nous avons supprimé la capacité fictive. Le deuxième essai semble n'avoir aucune justification physique, mais rappelons ici que notre objectif est de prédire l'évolution des températures et concentration de CO₂ dans le logement sur un laps de temps très court. Les modèles ainsi obtenus peuvent se retrouver figures 4 et 5.

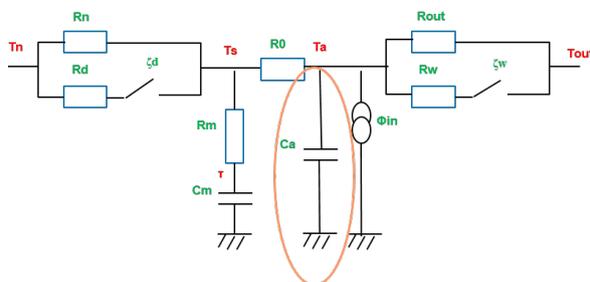


FIGURE 4. Modèle avec capacité de l'air

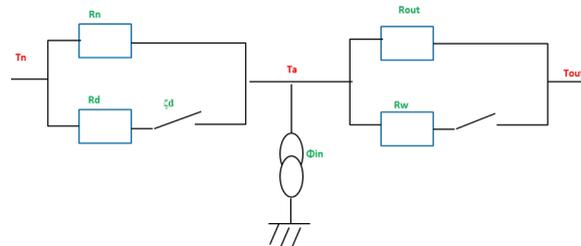


FIGURE 5. Modèle sans capacité

La mise en équation se fait de la même manière que pour le modèle de référence à une capacité et les résultats obtenus peuvent être visualisés dans les figures 6, 7, 8, 9 ainsi que dans le

tableau 3.

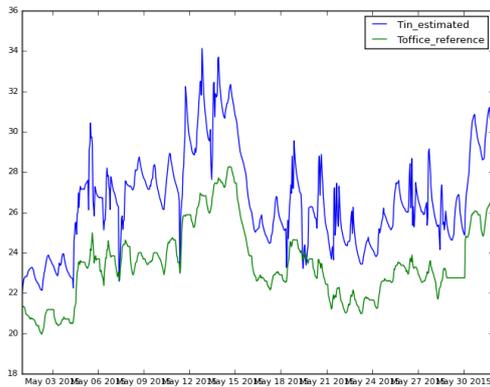


FIGURE 6. Évolution de la température du bureau mesurée et simulée pour le modèle à deux capacités

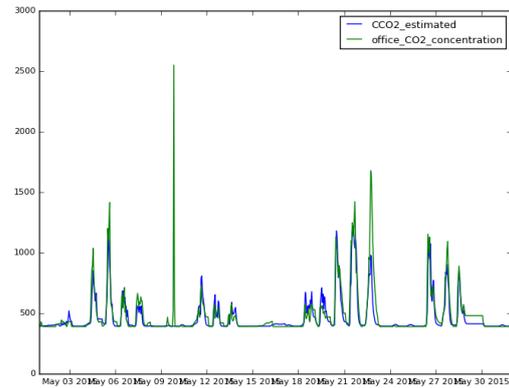


FIGURE 7. Évolution des concentrations de CO₂ mesurées et simulées pour le modèle à deux capacités

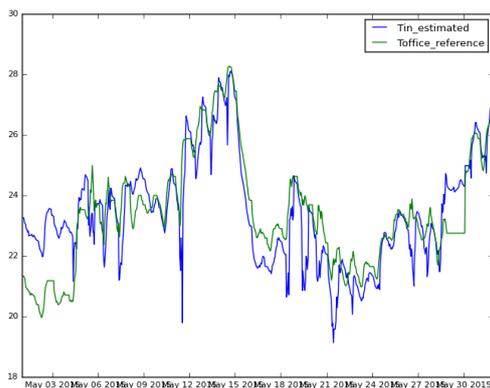


FIGURE 8. Évolution de la température du bureau mesurée et simulée pour le modèle sans capacité

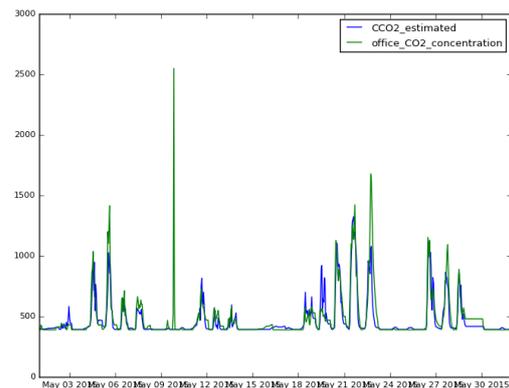


FIGURE 9. Évolution des concentrations de CO₂ mesurées et simulées pour le modèle sans capacité

Modèle à deux capacités	
Toffice average error = 3.075491	office CO2 average error = -24.339825
Toffice average absolute error = 3.082484	office CO2 average absolute error = 49.837174
Toffice max error = 5.991070	office CO2 max error = 340.581863
Toffice min error = -0.642488	office CO2 min error = -698.624553
Modèle sans capacité	
Toffice average error = -0.098081	office CO2 average error = -7.115636
Toffice average absolute error = 0.301008	office CO2 average absolute error = 50.676616
Toffice max error = 1.200197	office CO2 max error = 443.443990
Toffice min error = -2.394398	office CO2 min error = -623.315350

TABLE 3 – Erreurs liées aux modèles à deux capacités et sans capacité

5.4 LIMITES

On peut constater que le modèle à deux capacités présente des résultats bien moins bons que le modèle de référence. La théorie nous indique cependant que nous devrions obtenir un résultat plus précis malgré un temps de calcul plus conséquent. Nous avons donc procédé à une étude de la robustesse de l'algorithme en comparant les résultats obtenus pour différents points initiaux pour le modèle de référence. Il s'avère que l'algorithme est sensible au choix du point initial du modèle comme on peut l'observer sur la figure 10.

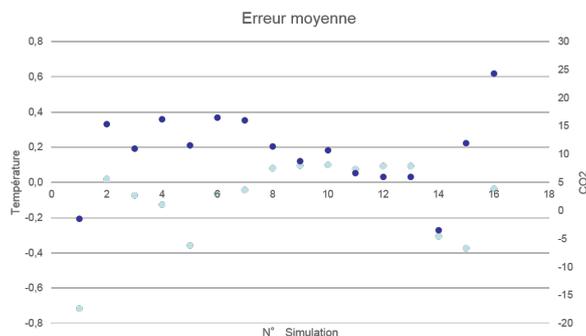


FIGURE 10. Répartition de l'erreur pour plusieurs points initiaux

6 PERSPECTIVES

Pour répondre à ces limitations, les étapes suivantes consistent d'une part à étudier plus précisément l'algorithme utilisé actuellement et de quantifier sa capacité à atteindre l'optimal global. S'il s'avère qu'il est effectivement trop sensible au point initial, nous tenterons d'appliquer un algorithme génétique ou un couplage entre un algorithme génétique et un algorithme stochastique (afin de limiter le coût).

D'autre part, nous allons envisager un couplage entre nos modèles et des modèles de données de type ARX afin de sélectionner l'ordre le plus pertinent pour notre modèle boîte grise.

ACKNOWLEDGMENT

Ce projet a bénéficié d'une aide de l'Etat au titre du programme d'Investissements d'avenir portant la référence (ANR-10-ITE-0003)

7 BIBLIOGRAPHIE

RÉFÉRENCES

- Achterbosch, G. G. J., de Jong, P. P. G., Krist-Spit, C. E., van der Meulen, S. F., et Verberne, J. (1985). The development of a convenient thermal dynamic building model?. *Energy and Buildings*, 8 :183–196.
- Bacher, P. et Madsen, H. (2011). Identifying suitable models for the heat dynamics of buildings. *Energy and Buildings*, 43 :1511–1522.
- Berthou, T., Stabat, P., Salvazet, R., et Marchio, D. (2012). Comparaison de modèles linéaires inverses pour la mise en place de stratégies d'effacement. In *XXXe Rencontre AUGCIBPSA Chambéry, Savoie.*
- Fouquier, A., Brun, A., Faggianelli, G. A., et Suard, F. (2013). Effect of the wall merging on a simplified building energy model : accuracy vs number of equations. In *Proceedings of BS2013*.

- Hazyuk, I., Ghiaus, C., , et Penhouet, D. (2012). Optimal temperature control of intermittently heated buildings using model predictive control. *Building and Environment, Part I–Building Modeling*(51) :379–87.
- Kämpf, J. et Robinson, D. (2007). A simplified thermal model to support analysis of urban resource flows. *Energy and Buildings*, 39.
- Mathews, E., Richards, P., et Lombard, C. (1994). A first-order thermal model for building design. *Energy and Buildings*, (21) :133–145.
- Nielsen, T. K. (2005). Simple tool to evaluate energy demand and indoor environment in the early stages of building design. *Solar Energy*, 78.
- Teichmann, J., Lauster, M., Fuchs, M., Streblow, R., et Müller, D. (2013). Validation of a simplified building model used for city district simulation. In *Proceedings of BS2013*.

“Expérimentation d’une micro-cogénération à turbine gaz sur un banc semi-virtuel et validation d’un modèle destiné à la simulation énergétique du bâtiment”

Romain Bonabe de Rougé^{*1,2}, Vincent Partenay^{1,3}, Pierre Picard⁴, Pascal Stabat², Dominique Marchio²

¹ Efficacity, 14-20 boulevard Newton, 77447 Marne la Vallée CEDEX

² Centre Efficacité énergétique des Systèmes, Mines ParisTech, 60 Bd Saint-Michel, F-75272 Paris CEDEX-06

³ CSTB, Direction ENR, 290 Route des Lucioles, 06904, Sophia-Antipolis

⁴ Engie Lab, 361, Avenue du Président Wilson - BP. 33, 93211 La Plaine Saint-Denis

***r.bonabederouge@efficacity.com**

RESUME. La micro-cogénération (μ CHP) est une technologie permettant de produire de l'électricité de manière décentralisée (puissance électrique inférieure à 36 kW_{el}). Différentes technologies de micro-cogénération ont déjà été caractérisées par l'expérimentation et la simulation. L'étude s'inscrit dans une logique de comparaison des technologies et d'intégration au sein des bâtiments. La μ CHP par micro-turbine est une technologie émergente pouvant être intégrée dans les bâtiments résidentiels individuels ou collectifs. Cependant, il reste à établir les principes de dimensionnement et à optimiser le mode de fonctionnement.

L'objectif de cet article est de valider expérimentalement un modèle semi-physique de micro-turbine de 3 kW_{el} et 15 kW_{th}. La méthodologie adoptée consiste à pré-dimensionner par simulation une installation de production d'ECS d'un bâtiment collectif. Le prototype réel de μ CHP est ensuite installé dans un banc d'essai semi-virtuel qui simule les charges thermiques. Les résultats d'essai permettent de valider en dynamique un modèle paramétré sur des données statiques.

MOTS-CLÉS : micro-cogénération, modélisation, banc d'essai semi-virtuel, autoconsommation, ECS.

ABSTRACT. Micro-combined Heat and Power (μ CHP) is a technology allowing to produce distributed electricity (electrical power below 36 kW_{el}). Various micro-cogeneration technologies have been assessed through modeling and experimentation. The big picture of this work is to compare technologies and define their integration inside buildings. Micro-turbine μ CHP is an emerging technology that can be integrated in individual and collective residential buildings. However, there is no validated method to size it and optimize their operation.

The goal of this paper is to validate through experimentation a semi-physical model of 3 kW_{el} and 15 kW_{th} micro-turbine. The method first consists in a pre-design study with simulation of a DHW production system in a multiple-dwellings building. Then the real μ CHP prototype is installed on a semi-virtual test bench on which boundary conditions of the installation are simulated in order to compare the real operation of the machine with simulation results. Test results will allow to validate dynamically a model established mainly through static parameters.

KEYWORDS: micro-cogeneration, modeling, semi-virtual test bench, self-consumption, DHW.

1. INTRODUCTION

1.1. CONTEXTE

La micro-cogénération (μ CHP) permet de répondre à la problématique de la réduction de la consommation d'énergie primaire des bâtiments : d'une part la production de chaleur est récupérée pour les besoins de chauffage et d'eau chaude sanitaire (ECS) et d'autre part, l'électricité produite peut être autoconsommée ou exportée vers le réseau électrique. Les turbines à gaz sont une technologie assez répandue en mini-cogénération et plus grande cogénération (> 250 kVA). Récemment, des constructeurs ont adapté les technologies de turbines issues du monde automobile pour des applications de micro-cogénération. Ces dernières, en stade pré-marché, semblent promettre des coûts d'investissement par kW_{el} plus faibles que d'autres systèmes de puissance équivalente.

Les besoins thermiques et électriques dans les bâtiments résidentiels montrent une variabilité temporelle importante et ne sont pas toujours simultanés. C'est pourquoi une attention particulière doit être portée au dimensionnement et à la régulation des systèmes de μ CHP qui y sont intégrés. De plus, un appoint thermique est généralement ajouté pour les pics de demande de chaleur (le réseau électrique jouant un rôle similaire côté demande électrique).

Cet article s'inscrit dans le cadre d'une étude visant à identifier les types de bâtiment pour lesquels il est pertinent d'installer des μ CHP ainsi que leur dimensionnement optimal prenant en compte schéma hydraulique, stockage et régulation.

1.2. OBJECTIFS

Cet article vise à caractériser les performances d'une micro-cogénération par turbine à gaz de puissance électrique 3 kW_{el} et thermique $15 \text{ kW}_{\text{th}}$ pour la production d'ECS d'un immeuble collectif. Les résultats d'essais en régime dynamique permettront de valider un modèle semi-physique de μ CHP calibré sur des données expérimentales en régime établi.

1.3. METHODE

Afin de répondre aux objectifs précédents, la démarche méthodologique consiste à :

- Définir puis modéliser l'installation de production de chaleur et d'électricité incluant la micro-cogénération, l'appoint, le stockage ainsi que la distribution (etc...) et leur régulation.
- Modéliser les besoins de chaleur et d'électricité du bâtiment
- Sélectionner une configuration (besoins, stockage, ...) pour laquelle la micro-cogénération fonctionne de manière optimale selon plusieurs indicateurs.
- Observer le comportement dynamique de la micro-turbine réelle dans une « installation » virtuelle.
- Comparer les sorties du modèle aux résultats expérimentaux

2. MODELISATION DE L'INSTALLATION

2.1. SCHEMA D'INSTALLATION

Le schéma de l'installation est donné par la figure 1, la modélisation des différents éléments est détaillée par la suite. Celle-ci est réalisée dans l'environnement Dymola.

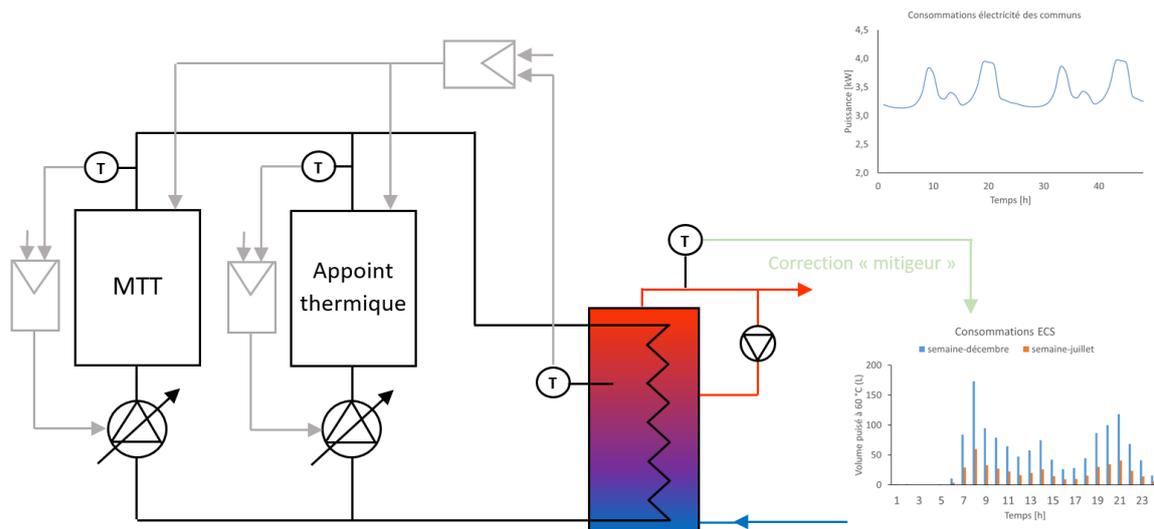


Figure 1 : Schéma de l'installation de production d'ECS collective modélisée

2.2. MODELISATION DE LA PRODUCTION

2.2.1. Micro-cogénération

On distingue 3 types de modèles de micro-cogénération: modèles de connaissance, semi-physiques (Bouvenot, et al. 2014) (Beausoleil-Morrison 2008) et simplifiés. Dans le cadre de la présente étude, un modèle semi-physique simple a été construit mêlant équations physiques et paramètres empiriques spécifiques à un appareil réel. Des tests expérimentaux sont ainsi nécessaires pour le calibrer. Le modèle fonctionne avec un temps de calcul faible (quelques minutes pour un an) et reste facile à paramétrer ne nécessitant que quelques données de performance. Il est bien adapté à la simulation énergétique du bâtiment.

Production thermique

La production thermique du micro-cogénérateur varie selon une loi proportionnelle de 7800 W à 15300 W en fonction de l'écart de température entre la consigne de température du ballon d'ECS et la température mesurée. La largeur de la bande proportionnelle est un paramètre de réglage qui permet d'obtenir un compromis entre les phénomènes de cyclage et le maintien de la production électrique (le rendement électrique diminuant à faible charge). Le flux de chaleur transmis à l'eau est représenté par un système du premier ordre de constante de temps T . Celle-ci a été évaluée à l'aide de plusieurs essais de démarrage de la μ CHP. Lorsque le démarrage intervient « à chaud » (moins de 6 h après le dernier arrêt) T est relativement stable et vaut 130 s. Lorsqu'il s'agit d'un démarrage à froid, T atteint jusqu'à 620 s. On a fait l'hypothèse (qui a pu être vérifiée a posteriori) que la grande majorité des démarrages intervient dans les 6 h suivant le dernier arrêt, ainsi $T = 130$ s.

Production électrique

D'autres mesures préliminaires en stationnaire à différents niveaux de charge sur la turbine ont permis d'obtenir une description simple de la puissance électrique de la turbine en fonction de la puissance thermique produite (équation 1). La production varie linéairement entre 900 et 3000 W à charge minimale et maximale et intervient 60 secondes après le démarrage de la production thermique.

$$P_{elec} = 0,2918 * P_{thermique} - 1398,8 \quad (1)$$

2.2.2. Appoint thermique

L'appoint thermique est une chaudière gaz à condensation modélisée de manière similaire à la production thermique de la μ CHP. La constante de temps T est fixée à 30 s dans la mesure où les dynamiques d'une chaudière gaz sont généralement rapides. Pour chaque taille de bâtiment et volume de stockage on réalise un dimensionnement de l'appoint par simulation. La puissance est déterminée de manière à assurer la température de départ ECS à tout moment de l'année, elle va de 18 kW (petit nombre de logements, grand volume de stockage) à 85 kW.

2.2.3. Stockage

Le ballon de stockage ECS est modélisé en différences finies permettant de représenter la stratification et l'échangeur interne (Wetter, et al. 2014). Une discrétisation en 10 couches est choisie, elle permet un bon compromis entre temps de simulation et précision des résultats. L'échangeur est aussi discrétisé à raison d'un élément par couche et en prenant en compte sa capacité thermique (eau et métal). Le modèle est paramétré pour représenter un ballon avec échangeur classique dont la hauteur dépend du volume selon une loi logarithmique calée avec des données fabricants (Nideck). L'échangeur est dimensionné de manière à transmettre la puissance cumulée de la micro-turbine et de l'appoint pour un écart de température de 5 K entre le primaire et l'eau stockée.

2.2.4. Régulation

La régulation de la cascade chaudière/ μ CHP est représentée figure 2. Elle permet d'éviter un fonctionnement de l'appoint venant se substituer à la recharge du ballon par la micro-cogénération dans le but de maximiser sa couverture des besoins thermiques. La régulation de la pompe de la μ CHP se fait dans la limite de la plage de fonctionnement possible donnée par le constructeur. Le débit peut ainsi varier de 290 à 1080 L/h pour assurer, dans la mesure du possible, la température de départ de consigne de la micro-turbine (65 °C). Une régulation similaire est adoptée pour la pompe de charge de la chaudière.

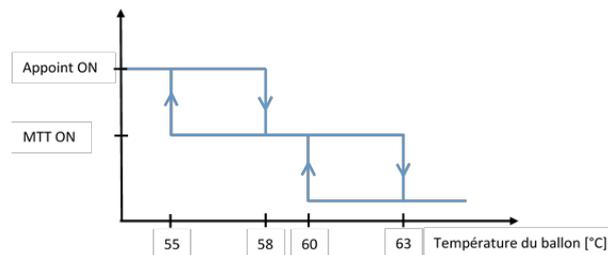


Figure 2 : cycles hystérésis appoint/ μ CHP

2.3. MODELISATION DE LA DISTRIBUTION

La distribution d'eau chaude sanitaire est une source de pertes importante dans un bâtiment qui peut représenter une part non négligeable du besoin thermique lié à l'ECS (parfois autant que les puisages). Celle-ci est représentée par 2 tubes (aller/retour) isolés par 2 cm d'isolant et dont la longueur et le diamètre dépendent du nombre de logements étudiés (et donc du puisage). Pour cela, des bâtiments virtuels de différentes tailles ont été imaginés et des longueurs de distribution d'ECS types ont été proposées. Le dimensionnement d'une telle boucle repose sur les hypothèses suivantes :

- Maintenir une température élevée dans la boucle en choisissant une chute de température faible (dans le cas présent : 2 K)
- Ne pas dépasser 0,2 m/s comme vitesse de circulation dans les conduites

On peut ensuite calculer le débit dans la boucle de distribution et le diamètre du tube ainsi que les pertes thermiques. Le point de puisage agrégé se situe au milieu de la boucle. On a pu remarquer que les pertes thermiques de distribution évoluent plus rapidement que les besoins avec l'augmentation du nombre de logements (du fait de la configuration géométrique notamment) : les pertes représentent ainsi 15 % de l'énergie de puisage pour un bâtiment de 10 logements contre 48 % sur un bâtiment de 50 logements.

2.4. MODELISATION DES BESOINS

2.4.1. Besoins d'eau chaude sanitaire

Les besoins d'ECS sont modélisés selon les profils de puisage de l'AICVF (AICVF 2004). Ceux-ci sont valables pour les logements collectifs et sont utilisés dans cette étude pour des puisages allant de 1000 L/jour à 5000 L/jour. Ils décrivent la consommation agrégée au pas de temps horaire en s'appuyant sur des mesures de consommation d'ECS réalisées dans différents bâtiments. Un besoin journalier d'ECS à 60°C est défini puis modulé selon l'heure de l'année. Une consommation moyenne de 100 L/jour par logement (à 60 °C) est envisagée ce qui correspond à des T3/T4. Les profils obtenus pour 1000 L/jour sont illustrés figure 1 (courbe en bas à droite).

Le volume d'eau prélevé est corrigé en fonction de la variation saisonnière (sinusoïdale) de la température d'eau froide et en fonction de la température de la strate de puisage au moment où il intervient de manière à prélever la bonne quantité d'énergie.

2.4.2. Besoins électriques des services généraux

La production d'électricité de la μ CHP est destinée à être autoconsommée par les services généraux d'un immeuble. Les conditions contractuelles permettant d'autoconsommer la production dans plusieurs logements individuels ne sont pas encore développées en France. Les profils de consommations électriques sont issus d'une étude réalisée par le CRIGEN à partir de mesures d'Enertech (Enertech 2001). Ces profils décrivent la consommation d'électricité des services généraux de plusieurs immeubles de logements rénovés et anciens. Une loi (équation 2) permet d'identifier des coefficients $\alpha(t)$ sur les profils décrits dans l'étude (pour 10, 30 et 80 logements) et de modéliser la consommation des bâtiments en fonction du nombre de logements n et ce pour deux niveaux de consommation (ancien/rénové).

$$P_{inst}(t, n) = \alpha(t) * (P_{maxi}(n) - P_{mini}(n)) + P_{mini}(n) \quad (2)$$

3. SELECTION DE LA CONFIGURATION

On recherche par simulation la taille du bâtiment la plus adaptée à la micro-cogénération en termes de production d'ECS. On cherche également la meilleure configuration du volume de stockage. Les simulations sont réalisées pour des ballons d'un volume de 500 à 2000 L et pour des puisages ECS allant de 1000 L/jour à 5000 L/jour (approximativement 10 à 50 logements). La sélection de la configuration s'effectue sur les critères suivants :

- Quantité de chaleur fournie par logement par an (à maximiser) (figure 4)
- Nombre de cycles annuel (à minimiser)
- Taux d'autoconsommation électrique (à maximiser)

Les résultats conduisent à sélectionner un bâtiment consommant 4000 L/jour et disposant d'un stockage ECS de 2000 L pour les essais semi-virtuel. Au-delà de 4000 L/jour, la cogénération fonctionne en permanence mais couvre une part trop faible (< 60 %) du besoin de chaleur lié à l'ECS (pertes

comprises). En dessous, elle est sous-exploitée et l'autoconsommation diminue avec les besoins électriques.

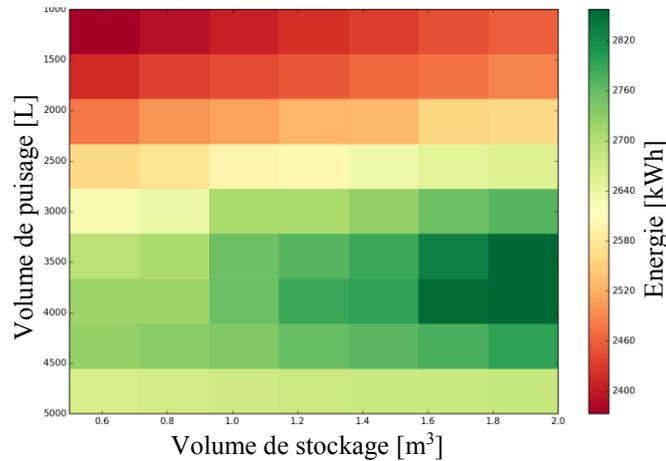


Figure 3 : Energie thermique annuelle fournie par logement par la cogénération

4. CAMPAGNE EXPERIMENTALE

4.1. PRESENTATION DU BANC

Le laboratoire semi-virtuel du CSTB à Sophia-Antipolis permet de tester et d'évaluer de manière dynamique les systèmes énergétiques dédiés au bâtiment. Le système réel est testé dans un environnement virtuel qui reproduit le comportement d'un bâtiment et de ses équipements, soumis au climat et aux usages des occupants. A l'aide de différents modules de charge/décharge, le laboratoire peut émuler les conditions thermiques et électriques aux bornes du système testé en les contrôlant à une fréquence de l'ordre de la minute via une plateforme de simulation thermique dynamique synchronisée avec le temps réel.

Dans le cas présent, le prototype de μ CHP est couplé hydrauliquement (figure 4) à un module qui contrôle la température de retour (calculée par le modèle de simulation), la pompe interne de la μ CHP imposant son propre débit. Au niveau de la régulation, les températures du modèle dynamique sont émulées par l'intermédiaire de boîtes à décades. Deux modes de régulation pour la production d'eau chaude sanitaire sont proposés par le constructeur de la μ CHP et sont testés.

On/Off avec hystérésis :

Le déclenchement de la μ CHP se fait à partir de la donnée d'une température au sein du ballon de stockage T_{buf} . Le paramétrage consiste à fixer une température de consigne T_{set} (63 °C pour notre test) et une hystérésis dT_{hys} (3 K pour notre test) qui prend comme seuil haut la consigne T_{set} , soit une température de déclenchement de la μ CHP à 60 °C. En marche, le système fonctionne à 100 % de sa pleine puissance.

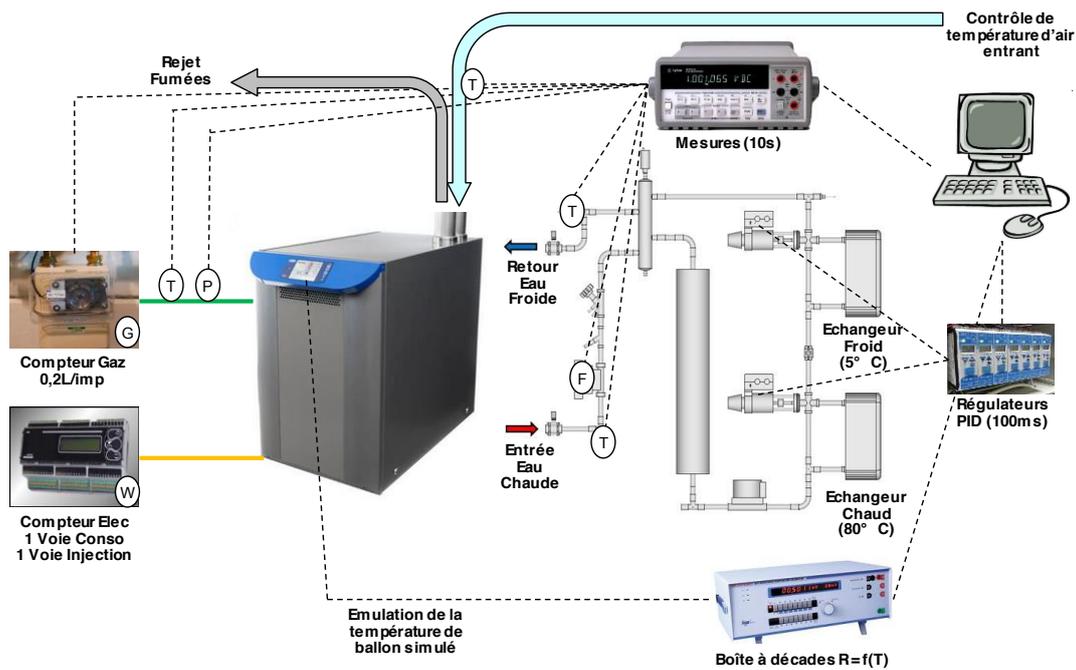


Figure 4 : Intégration de la micro-turbine au banc semi-virtuel

Modulation de puissance avec hystérésis :

Ce mode est dérivé du On/Off décrit ci-dessus mais permet de moduler la puissance thermique délivrée par la μ CHP lorsque celle-ci est en marche. Une fois que le mode hystérésis a généré un signal de marche, la μ CHP opère en modulation de puissance selon la loi affine suivante :

$$\text{Modulation} [\%] = a \times (T_{set} - T_{buf}) + b \quad (3)$$

a et b sont paramétrables directement via l'interface de la μ CHP. On a retenu une valeur de 25 %/K pour le coefficient a et une valeur de 50 % pour b , soit une modulation linéaire entre 50 et 100 % sur 2 K de différence. Deux tests semi-virtuels sont donc réalisés (un pour chaque mode de régulation), avec un pas de temps de 15 secondes sur une durée de 24 heures, en sélectionnant la journée présentant le plus faible profil de puisage de l'année.

4.2. RESULTATS ET ANALYSE

Les résultats expérimentaux avec et sans modulation de puissance sont comparés aux résultats donnés par le modèle décrit dans la partie 2, à l'aide des traits pleins (figure 5). Les résultats sont comparables dans le cas d'un fonctionnement ON/OFF (colonne de gauche), seule la valeur de la puissance thermique en fonctionnement diffère d'environ 1,5 kW. En régulation modulante (colonne de droite), le modèle montre des différences importantes avec les essais : les cycles sont décalés et la puissance thermique est surévaluée.

L'exploitation des résultats d'essais montre que la puissance thermique varie en fonction de la température de retour et que le débit de la pompe n'atteint que 740 L/h (des pertes de charges supplémentaires étant provoquées par un module de sécurité demandé par le constructeur pour ce prototype). Pour prendre en compte ces modifications, une simulation est effectuée en tenant compte de la limitation du débit et la valeur maximale de puissance thermique est fixée artificiellement à 14 kW contre 15,3 kW initialement. Les résultats de la nouvelle simulation sont affichés sur les courbes en pointillé en haut à droite : ils sont sensiblement plus proches des résultats expérimentaux.

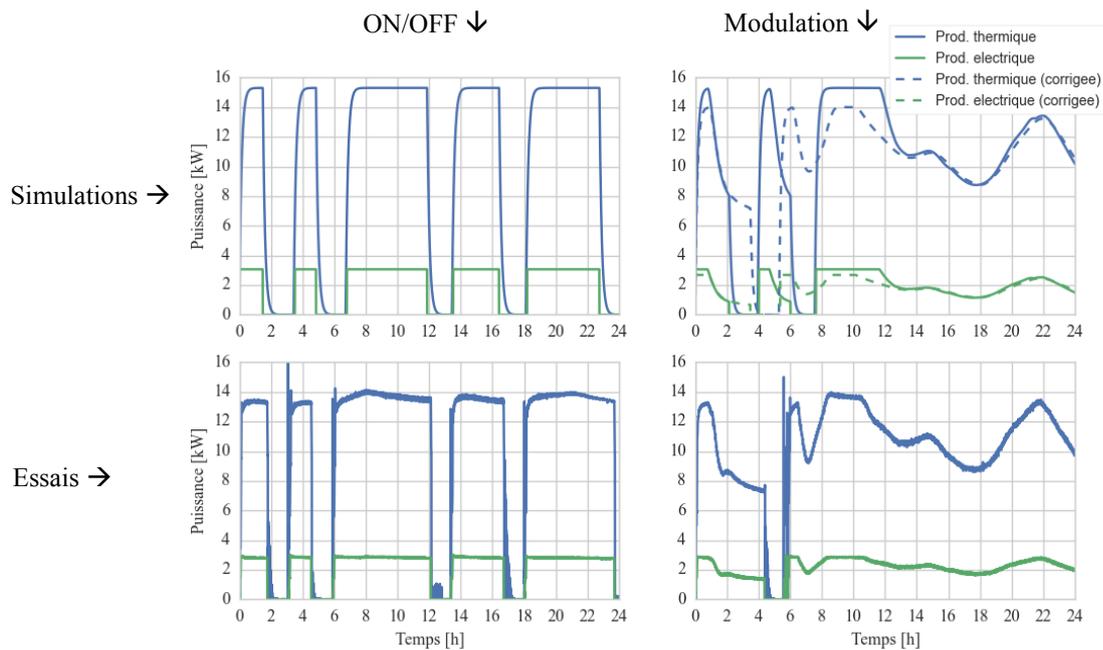


Figure 5 : Comparaison du modèle et des résultats expérimentaux sur une journée de puisage minimal

	Production thermique [kWh]	Production électrique [kWh]	Consommation gaz [kWh PCS]	Cycles
Essai	247	50,8	448	2
Modèle	249	43,5	387	3
Modèle corrigé	248	41,5	383	2

Tableau 1 : Comparaison des résultats en énergie dans le cas d'une régulation modulante

La consommation de gaz du modèle simplifié est calculée à partir du rendement à pleine charge mesuré à $T_{\text{retour}} = 30 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (75,6 % PCS). Le modèle simplifié illustre ici ses limitations, il n'est pas capable de prendre en compte certains phénomènes physiques comme la variation du rendement à charge partielle et à température variable. Pour ces raisons, la calibration d'un modèle semi-physique plus complet (Bouvenot, et al. 2014) est envisagée comme suite à cet article.

5. CONCLUSIONS

Un micro-cogénérateur à turbine à gaz a été intégré dans un banc d'essai semi-virtuel sur lequel ont été simulées des conditions de fonctionnement d'une installation de production ECS. Ce montage a permis de valider la méthodologie consistant à optimiser l'intégration de la turbine au sein d'un bâtiment par simulation avec un modèle simplifié. Néanmoins, de futurs travaux seront menés avec un modèle plus complet permettant de rapprocher modèle et résultats expérimentaux.

BIBLIOGRAPHIE

- AICVF. *Eau chaude sanitaire : maîtriser énergie, confort, santé. Recommandation 02-2004 de l'Association des ingénieurs en climatique, ventilation et froid*. Paris: AICVF, 2004.
- Beausoleil-Morrison, Ian. *An Experimental and Simulation-Based Investigation of the Performance of Small-Scale Fuel Cell and Combustion-Based Cogeneration Devices Serving Residential Buildings*. Canada: Government of Canada, 2008.
- Bouvenot, Jean-Baptiste, Benoît Andlauer, Pascal Stabat, Dominique Marchio, et Bernard Flament. «Gas Stirling engine micro CHP boiler experimental data driven model for building energy simulation.» *Energy and Buildings*, n° 84 (2014): 117-131.
- Enertech. «Diagnostic électrique de 359 logements à Montreuil - Diagnostic électrique des parties communes.» Rapport d'audit, 2001.
- Wetter, Michael, Wangda Zuo, Thierry S. Noudui, et Wufeng Pang. «Modelica Buildings Library.» *Journal of Building Performance Simulation* 7 (2014).

Outils pour la garantie de performances de maisons à énergie positive

Rozenn JOSSE BURET^{*1,2}, Frédéric WURTZ¹, Philippe MARECHAL² et Etienne WURTZ²

¹ G2ELab, CNRS

Bâtiment GreEn-ER, 38031 Grenoble cedex 1, France

² LGEB, CEA-LITEN, INES

50 Avenue du Lac Léman, 73370 Le Bourget du Lac, France

*rozenn.josse-buret@g2elab.grenoble-inp.fr

RESUME. Dans cet article, nous proposons une description d'outils pour la mise en place d'une méthodologie pour la garantie de performance de maisons à énergie positive. Nous travaillons notamment sur les historiques de mesures issus du bâtiment connecté. Sur ces historiques, nous nous focalisons sur les périodes où l'habitant est absent afin d'identifier les causes des écarts entre mesures et résultats du modèle utilisé en phase de conception.

Nous présentons ici particulièrement un travail dans un environnement Python sur les données réelles d'une maison en occupation, dans lequel nous implémentons une méthode d'estimation d'état ainsi qu'une méthode de criblage.

MOTS-CLÉS. Méthodologie, performance énergétique, maisons à énergie positive.

ABSTRACT. In this article we propose a description of tools which are developed in order to set up an energy performance guarantee method of positive energy houses. We mainly work on historics of measures coming from the "connected building". On those historics, we focus on time periods where the occupant is absent so that we can identify causes of the deviation between measures and results of the model used during the design phase.

We specially present a work on occupied-house real data in a Python environment in which we implement a state estimation method as well as a screening technique.

KEYWORDS. Method, energy performance, positive energy houses.

1 INTRODUCTION

1.1 CONTEXTE ÉNERGÉTIQUE

Le contexte énergétique est actuellement marqué par une prise de conscience de nos politiques, avec notamment une compréhension des enjeux environnementaux.

Cette prise de conscience les pousse à développer de nouvelles réglementations afin de réduire l'impact des différents secteurs de l'industrie qui nous entourent.

Dans cette perspective, le secteur bâtiment représente un enjeu majeur en termes d'économies d'énergie et de réduction des émissions de CO₂. Il représente, à l'échelle mondiale 40% de la consommation d'énergie primaire et 24% des émissions de gaz à effet de serre.

La réglementation thermique se faisant ainsi de plus en plus exigeante, les maisons individuelles de construction neuve tendent à répondre au concept de maison à énergie positive (MEPOS). Nous visons donc des maisons dont la production énergétique permet de couvrir les consommations sur site en bilan annuel.

Il n'existe cependant aucune méthode de garantie de performance ce qui a engendré de mauvais retours d'expérience sur ces MEPOS. Citons par exemple le rapport du projet RETEX du CSTB (Derouineau et al., 2013) mettant en avant des retours d'expérience sur des bâtiments de nouvelle génération dont les consommations réelles sont la plupart du temps supérieures à celles estimées. Dans ce contexte, le projet COMEPOS a été développé. Celui-ci vise à préparer la RT2020 et à travailler sur le concept de maisons à énergie positive avec la mise en œuvre d'un système de suivi (monitoring).

1.2 LE BÂTIMENT CONNECTÉ

Ceci nous amène à la question du bâtiment connecté. Dans notre étude, nous considérons comme "bâtiment connecté" tout bâtiment disposant d'un ensemble de capteurs permettant au gestionnaire énergétique et à l'utilisateur d'interagir avec le bâtiment sur les notions de confort et de consommation énergétique.

Nous pouvons notamment citer des entreprises telles que DeltaDore, VestaSystem ou Netatmo (figure 1) qui proposent des offres permettant à l'habitant de suivre des paramètres variés (températures, taux de CO₂, consommation, etc.) de leur maison grâce à des applications disponibles sur smartphone ou tablette.



FIGURE 1. Offres (de gauche à droite) de Deltadore - Vesta System - Netatmo

Dans ce contexte où les mondes du bâtiment et des nouvelles technologies se rejoignent, nous proposons une méthodologie de garantie de performances du bâtiment non-intrusive utilisant les données issues de ces nouvelles technologies.

2 MÉTHODOLOGIE PROPOSÉE

Comme le montre la figure 2, nous proposons une méthode reliant trois outils principaux : un logiciel de simulation thermique dynamique (EnergyPlus), une base de données située sur des webserveurs et un langage de programmation (Python).

Dans un premier temps, nous récupérons, d'une part, les données réelles grâce à un programme python. Cela nous permet de stocker nos historiques de mesures dans un fichier CSV, facilement utilisable par la suite.

D'autre part, nous obtenons les données théoriques issues d'une simulation thermique dynamique. On peut s'imaginer, par exemple, que l'on utilise le modèle fait par un bureau d'études. Dans nos cas d'étude, nous utilisons des modèles provenant du logiciel EnergyPlus. Ce logiciel présente en effet l'avantage d'être totalement contrôlable via un programme informatique, en

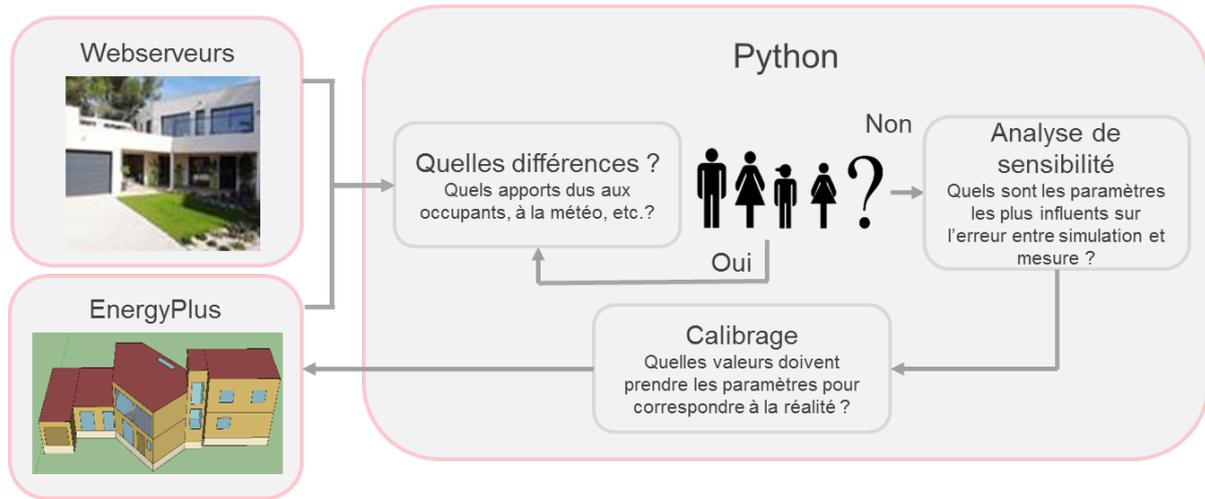


FIGURE 2. Principales étapes de la méthodologie proposée

python par exemple.

Ensuite, par la confrontation entre les données mesurées et les données théoriques, nous identifions les écarts dus par exemple au comportement de l'utilisateur (utilisation de l'électroménager, éclairage, puissance de chauffage, etc.) ou à la météo. Pour cela, nous appliquerons une méthode d'estimation d'état que nous préciserons par la suite. Nous nous appuyons notamment sur les travaux effectués par Nils Artiges (Artiges, 2016).

Une fois cela effectué, nous corrigeons notre modèle de simulation thermique dynamique. Cela nous permet d'obtenir une nouvelle référence, corrigée par rapport au climat et au comportement des usagers.

Dans un troisième temps, nous analysons ces données in-situ afin de trouver des périodes où les occupants sont absents. De plus, l'analyse des données sur ces périodes nous permet de connaître les équipements électroniques en marche ou en veille par exemple. Nous travaillons ainsi sur des données qui ne subissent pas l'influence de la présence de l'habitant, ce qui nous permet d'étudier le comportement du bâtiment en minimisant les apports internes.

La quatrième étape de cette méthodologie consiste en une analyse de sensibilité. Nous utiliserons ici la méthode de Morris (Morris, 1991) afin de connaître les éléments qui vont le plus perturber notre modèle thermique. Nous générons un ensemble de valeurs pour les paramètres dont nous souhaitons étudier l'influence. Cela peut être par exemple les caractéristiques thermiques d'un matériau. Cet ensemble correspond aux entrées de notre analyse. Nous modifions alors le fichier de simulation thermique dynamique selon cet ensemble de valeurs.

En sortie, nous considérons l'erreur entre simulation et mesure d'un paramètre choisi par l'utilisateur du programme. Pour cela, il est nécessaire de connaître les mesures effectuées au sein de la maison considérée.

Enfin, nous appliquerons sur notre modèle, et plus particulièrement sur les paramètres les plus influents définis à l'étape précédente l'algorithme ABC-PMC (Approximate Bayesian Computation - Population Monte-Carlo) présenté par (Wilkinson, 2013). Cela nous permet de calibrer notre modèle, ou en d'autres termes, nous cherchons la gamme de valeurs où les paramètres identifiés ont le plus de chance de se trouver.

3 DÉVELOPPEMENT DES OUTILS

3.1 PRÉSENTATION DE LA TOOLBOX

Cette méthodologie se présente sous la forme d'une toolbox où toutes les techniques présentées ci-dessus sont orchestrées via un programme en Python, langage de programmation scientifique libre. Le principe de cette toolbox est le suivant : l'utilisateur choisit son modèle thermique, sélectionne les paramètres sur lesquels il souhaite effectuer les différentes analyses et, finalement, choisit la précision d'exécution.

Dans cet article, nous proposons de nous concentrer sur le développement de deux outils principaux : l'estimation d'état de notre bâtiment et l'analyse de sensibilité.

3.2 ESTIMATION D'ÉTAT

3.2.1 MODÈLE ENERGYPLUS

La première étape consiste à créer ou se procurer le modèle de simulation thermique du bâtiment compatible avec le logiciel EnergyPlus, provenant du bureau d'études chargé de la conception par exemple.

En effet, celui-ci va nous servir à connaître, d'une part, les hypothèses initiales prises pour obtenir le comportement thermique du bâtiment (scénarios, matériaux, systèmes) et d'autre part, ses besoins énergétiques, comme le montre le tableau 1.

End Uses	Energy type		
	Electricity [kWh]	District Heating [kWh]	Water [m ³]
Heating	0.0	3525	0.0
Interior Equipment	1514	0.0	0.0
Water Systems	0.0	1786	51.3

TABLE 1: Consommations

Nous utilisons ce modèle comme base pour la suite de l'application de la méthodologie. Les données issues de ce modèle sont qualifiées de "théoriques".

```

for j in range(0, len(elements)):
    print "param_set[{}]: {}".format(i, j, param_set[i,j])
    elements[j] = param_set[i,j]
    ElementsList.append(elements[j])

for k in range(0, len(materials)):
    materials[k].Thickness = ElementsList[k]
    materials[k].Conductivity = ElementsList[len(materials)+k]
    materials[k].Specific_Heat = ElementsList[2*len(materials)+k]

for k in range(0, len(windows)):
    windows[k].UFactor = ElementsList[3*len(materials)+k]
    windows[k].Solar_Heat_Gain_Coefficient = ElementsList[3*len(materials)+len(windows)+k]

```

FIGURE 3. Exemple de modification d'un modèle EnergyPlus via Eppy

L'avantage de ce modèle est qu'il est identique aux modèles que pourraient utiliser les bureaux d'études dans un futur idéal où la simulation thermique seraient généralisée en phase de conception. De plus, les modèles EnergyPlus peuvent facilement être modifiés via un programme informatique. Il existe un package en python permettant de modifier tous les paramètres du modèle. Sur la figure 3 ci-dessus, nous modifions les caractéristiques des matériaux selon un ensemble de valeurs.

Cependant, il s'agit d'un modèle type boîte noire. Nous ne maîtrisons donc pas les équations internes du modèle, ce qui sera un point de vigilance dans la suite de cet article.

3.2.2 RECONSTRUCTION DES GAINS INTERNES

Afin d'écartier les causes d'erreur telles que la météo et les apports internes dus aux occupants, il est nécessaire d'effectuer une estimation de l'état du bâtiment considéré.

Pour cela, (Artiges, 2016) présente dans ses travaux un état de l'art des techniques d'estimation d'état, et notamment l'utilisation du facteur de Kalman très populaire dans les publications scientifiques. Plus particulièrement, nous pouvons citer (Radecki et Hency, 2012) qui utilisent un filtre de Kalman UKF (Unscented Kalman Filter) pour l'estimation de l'état thermique et des paramètres statiques puis valident ses résultats avec EnergyPlus.

Il note cependant que cette méthode convient parfaitement à cette fin mais devient inappropriée si l'on souhaite estimer les gains internes, ce qui est notre principal intérêt ici. Il propose donc une méthode d'estimation se basant sur la résolution d'un problème d'optimisation quadratique.

Cette méthode repose sur l'identification des gains internes en réduisant l'écart quadratique entre les températures de zone théorique et mesurée. Le problème d'optimisation alors posé se résout grâce à un algorithme de gradient conjugué. Selon cette méthode, les erreurs sont quantifiées grâce aux trois critères présentés dans le tableau 2.

Critères	Signification
e_Q	Erreur relative entre les gains internes réels et les gains théoriques
e_θ	Erreur relative entre les températures théorique et mesurée
$e_\theta(t)$	Erreur instantanée

TABLE 2: Critères de performance

Si l'on considère Q les apports internes, θ la température de zone et T le temps sur lequel nous calculons notre erreur alors les critères présentés dans ce tableau sont définis comme suit. Nous annoterons d'une étoile ces paramètres lorsque nous parlons de paramètres réels, donc mesurés.

$$e_Q = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N_z} \int_{t \in T} (Q_i - Q_i^*)^2 dt}{\sum_{i=1}^n \int_{t \in T} Q_i^2 dt}} \quad (1)$$

$$e_\theta = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N \int_{t \in T} (\theta_i - \theta_i^*)^2 dt}{\sum_{i=1}^n \int_{t \in T} \theta_i^2 dt}} \quad (2)$$

$$e_\theta(t) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\theta_i(t) - \theta_i^*(t))^2}{\sum_{i=1}^n \theta_i(t)^2}} \quad (3)$$

Cependant, cette méthode nécessite d'avoir accès aux équations de notre modèle. Comme expliqué dans la partie précédente 3.2.1, le modèle EnergyPlus que nous utilisons est un modèle de type boîte noire. Nous ne disposons donc pas des équations nécessaires. C'est pourquoi nous allons utiliser la toolbox BRCM¹ permettant d'extraire les matrices d'un bâtiment développé en EnergyPlus.

1. <http://www.brcm.ethz.ch/doku.php>

3.3 ANALYSE DE SENSIBILITÉ

3.3.1 DESCRIPTION

Lorsque l'on parle d'analyse de sensibilité, nous différencions deux principaux types de méthode :

- les méthodes d'analyses de sensibilité locales
- les méthodes d'analyses de sensibilité globales

Il existe ensuite les méthodes de criblage sur lesquelles nous reviendrons par la suite.

Les analyses de sensibilité locales calculent les dérivées partielles de la sortie considérée par rapport aux paramètres d'entrée autour d'un point de référence.

Cette méthode consiste en l'application d'un plan OAT (One At a Time) (Munaretto, 2014), ce qui permet d'évaluer le modèle un faible nombre de fois induisant un gain important sur le temps de calcul, tout en apportant une information quant à l'influence des paramètres d'entrée.

Dans le cas d'un modèle non-linéaire, cette méthode montre cependant ses limites. En effet, les indices de sensibilité n'auraient pas la même valeur sur l'ensemble des intervalles d'incertitude des paramètres d'entrée. Les informations obtenues ne seraient donc plus pertinentes.

Il est donc conseillé d'utiliser des méthodes d'analyse de sensibilité globale. Celles-ci évaluent parallèlement l'incertitude globale et la sensibilité de chaque paramètre d'entrée sur la sortie considérée. Ces méthodes reposent en grande partie sur la décomposition de la variance, celle-ci étant la sortie du modèle.

3.3.2 ANALYSE DE MORRIS

Dans le cas de notre méthodologie, nous avons choisi d'utiliser la méthode de Morris (Morris (1991), Campolongo et al. (2007)). Comme le décrit Maxime Robillart (Robillart, 2015) dans ses travaux de thèse, cette méthode combine de nombreux avantages.

Tout d'abord, il s'agit d'une méthode de criblage. Ce type de méthode ressemble aux analyses de sensibilité locales mais permet de traiter des modèles complexes dont le temps de simulation est relativement long. En effet, les méthodes de criblages évaluent le modèle un nombre de fois plus faible que les méthodes classiques d'analyse mais conservent cependant des résultats très satisfaisants.

Ensuite, la méthode de Morris a l'avantage de ne pas nécessiter de connaissances a priori sur le modèle. Autre avantage non négligeable, elle donne des informations sur les effets principaux et totaux des facteurs d'entrée du modèle.

Le principe de la méthode de Morris est le suivant :

- 1/ Pour chaque i , soit simulation, nous calculons l'effet élémentaire E pour chaque paramètre d'entrée θ_j sur la variation de la sortie M entre deux pas de temps. Soit :

$$E_j^{(i)} = \frac{M(\theta_j^{(i)} + \Delta) - M(\theta_j^{(i)})}{\Delta} \quad (4)$$

- 2/ Une fois les n simulations terminées, nous déterminons les indices de sensibilité suivant :
 - l'effet moyen :

$$\mu_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n E_j^{(i)} \quad (5)$$

— l'effet absolu moyen :

$$\mu_j^* = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |E_j^{(i)}| \quad (6)$$

— l'écart-type :

$$\sigma_j = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (E_j^{(i)} - \mu_j)^2} \quad (7)$$

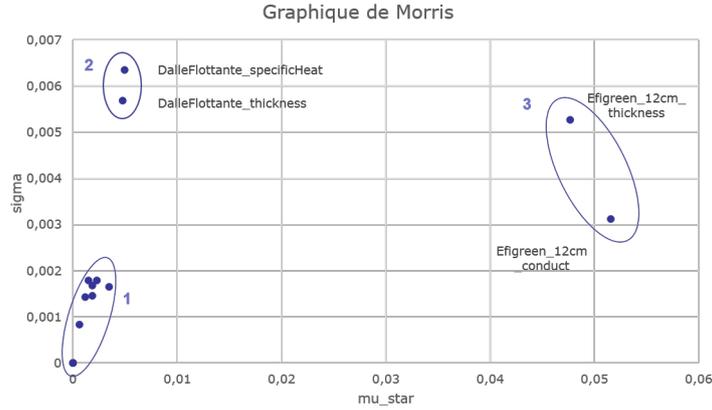


FIGURE 4. Graphique de Morris sur la température intérieure moyenne d'un séjour d'une maison BBC

Une fois cela effectué, nous pouvons classer les paramètres selon trois catégories (figure 4) :

- ceux ayant des effets négligeables (1)
- ceux ayant des effets linéaires (2)
- et ceux ayant des effets non-linéaires et/ou avec interactions (3)

Dans notre cas d'étude, nous faisons tout d'abord un calcul de la RMSE sur la différence entre la valeur théorique et la valeur réelle de paramètres choisis (températures, débits d'air, etc.), à chaque simulation.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\theta_i - \theta_i^*)^2}{N}} \quad (8)$$

Nous appliquons ensuite la méthode de Morris à la RMSE calculée. Cela nous permet d'obtenir les facteurs d'entrée ayant le plus d'influence sur l'erreur entre mesure et estimation en phase conception.

4 ARCHITECTURE DU PROGRAMME

En termes de programmation, nous avons séparé d'un côté le programme principal et de l'autre le module contenant les fonctions développées.

Si nous regardons plus en détails la programmation de l'analyse de Morris, nous avons séparé en huit méthodes, chacune ayant une utilité propre (tableau 3).

Nous pouvons remarquer l'utilisation de packages tels que SALib permettant d'effectuer des analyses de sensibilité diverses (Sobol, FAST et Morris) ou encore eppy facilitant le travail avec des fichiers EnergyPlus.

Méthodes	Fonction
def openIDF()	Ouvre, modifie et enregistre le fichier EnergyPlus
def generateSamples()	Génère le set de valeurs pour l'analyse de sensibilité
def generateSimul()	Génère les simulations EnergyPlus selon le set de valeurs
def choixOutputs()	Permet le choix des sorties à étudier
def readhtml()	Lit le fichier HTML généré par EnergyPlus
def CalculOutputs()	Calcule la RMSE
def runEnergyPlus()	Active EnergyPlus

TABLE 3: Description des méthodes

```

#### DEBUT IMPORT PACKAGES ####
import os
import sys
from eppy.modeditor import IDF
from eppy import readhtml
import SALib.analyse.morris as moA
import SALib.sample.morris as moS
from SALib.plotting.morris import horizontal_bar_plot, \
    covariance_plot, \
    sample_histograms

import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import pandas as pd
import csv

#### FIN IMPORT PACKAGES ####

def openIDF():...
def generateSamples(EnergyPlusPath, materials, windows):...
def generateSimul(EnergyPlusPath, WeathersFileName, data , param_set,
    idfInput, idfOutput, simulCSV):...
def analyseMorris(problem,X,Y,N):...
def choixOutput(idf_file,idfOutput):...
def readHTML(htmlfile):...
def CalculOutputs(SimulationData, ColumnsList,index):...
def runEnergyPlus(EnergyPlusPath, WeathersFileName):...

```

FIGURE 5. Méthodes utilisées pour l'analyse de Morris

5 CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Dans cet article, nous avons présenté la méthodologie développée pour la garantie de performance d'une maison à énergie positive habitée.

Celle-ci permet l'identification des défaillances des éléments mis en œuvre dans le bâtiment.

Nous avons amorcé le développement des outils nécessaires à la mise en œuvre de la méthodologie élaborée. Celle-ci se base sur des techniques couramment utilisées sur des modèles de bâtiment. Nous nous sommes ici efforcés de les utiliser afin de confronter les données du modèle avec celles des mesures in-situ.

Nous avons ensuite expliqué deux étapes clés de cette méthodologie : l'estimation d'état (partie 3.2) et l'analyse de sensibilité (partie 3.3).

La première permet d'identifier les gains internes réels auxquels la maison considérée a été soumise. Cela nous permet de réinitialiser notre modèle thermique et ainsi de pouvoir analyser le comportement thermique réel de la maison lors des périodes d'absence des occupants.

La seconde permet de connaître les paramètres influençant le plus l'erreur entre les mesures et les données de simulation. Cela nous informe donc des paramètres ayant le plus de chance de présenter un défaut ou, en d'autres termes, ceux n'étant pas conformes à ce qui était supposé être mis en place.

Par la suite, nous optimiserons également les méthodes présentées afin que celles-ci répondent précisément à nos besoins. En d'autres termes, nous identifierons les données mesurées qui nous apportent les meilleures informations, afin de limiter le champ d'études et ainsi optimiser le temps de calcul de la méthodologie.

6 BIBLIOGRAPHIE

RÉFÉRENCES

- Artiges, N. (2016). *De l'instrumentation au contrôle optimal prédictif pour la performance énergétique du bâtiment*. PhD thesis, Université Grenoble Alpes.
- Campolongo, F., Cariboni, J., et Saltelli, A. (2007). An effective screening design for sensitivity analysis of large models. *Environmental Modelling Software*, 22 :1509–1518.
- Derouineau, S., Alessandrini, J.-M., Boisson, P., Bouchille, R., Bougrain, F., Hans, J., Lahrech, R., Laurenceau, S., Millet, J.-R., et Nibel, S. (2013). *Bilan de recherche 2011-2013 : Projet Retex, Outils pour le RETour d'EXpérience sur les performances en service des bâtiments de dernière génération*.
- Morris, M. D. (1991). Factorial sampling plans for preliminary computational experiments. *Technometrics*, 33 :161–179.
- Munaretto, F. (2014). *Etude de l'influence de l'inertie thermique sur les performances énergétiques des bâtiments*. PhD thesis, MINES Paristech.
- Radecki, P. et Hancey, B. (2012). Online building thermal parameter estimation via unscented kalman filtering. In *American Control Conference (ACC)*.
- Robillart, M. (2015). *Étude de stratégies de gestion en temps réel pour des bâtiments énergétiquement performants*. PhD thesis, MINES Paristech.
- Wilkinson, R. D. (2013). Approximate bayesian computation (abc) gives exact results under the assumption of model error. *Statistical Applications in Genetics and Molecular Biology*, 12 :129–162.

Articulation d'un logiciel de simulation énergétique et d'un logiciel d'ACV à l'échelle quartier, illustration à travers une étude de cas

Adélaïde Mailhac^{*1,2,3}, Nicolas Perez¹, Olivier Tournaire^{1,3}, Nicoleta Schiopu^{1,3}, Galdric Sibiude^{1,3}, Luc Adolphe^{3,4}, Marion Bonhomme⁴

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

² Université Toulouse, INSA, Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions (LMDC), Toulouse, France

³ Efficacity-Institut de R&D pour la transition énergétique de la ville, Champs-sur-Marne, France

⁴ Université Toulouse, ENSA, Laboratoire de Recherche en Architecture (LRA), Toulouse, France

*adelaide.mailhac@cstb.fr

RESUME. A travers une étude de cas, ce papier présente les plus-values décisionnelles apportées par le couplage étude énergétique – ACV – méthode d'aide à la décision multicritère dans le processus de conception d'un projet urbain. Dans cette chaîne de simulation multi-modèle, le rôle de la maquette numérique au format standard CityGML est central et assure l'interopérabilité des outils. Ce travail est basé sur l'étude des performances de plusieurs variantes d'un projet de quartier en région Parisienne. L'étude repose sur une modélisation du projet sous forme d'une maquette numérique au format CityGML permettant de coupler les simulations énergétiques réalisées avec l'outil DIMOSIM (District Modeller and Simulator) et d'évaluer les performances environnementales grâce à l'outil ELODIE (logiciel d'ACV bâtiments). Les résultats obtenus permettent de comparer finement les variantes du projet à l'aune d'une dizaine d'indicateurs environnementaux. Pour accompagner l'interprétation de ces résultats, la méthode ATLAS, méthode d'aide à la décision multicritère, a été utilisée et permet de réduire à un seul index les résultats de l'ACV, aboutissant ainsi à un classement exhaustif des variantes envisagées.

MOTS-CLÉS : Simulation énergétique, ACV, Maquette Numérique Urbaine

ABSTRACT. Through a case study, this paper presents knowledge gains made by coupling Energy study – LCA – multiple Criteria Decision Aiding method. To do so, the digital model in a standard format is essential and supports the interoperability of simulation tools. The work presented here is based on the study of different alternatives of a project located in the Paris region. This comparison is based on a digital model of the project in the CityGML format allowing to couple energy simulations performed with the tool DIMOSIM (District Modeller and Simulator) and environmental performance assessment made with ELODIE (a building LCA software). Obtained results allow fine comparison of simulated alternatives in the light of nine environmental indicators. To support the interpretation of these results, the ATLAS method, a multiple Criteria Decision Aiding method, is used and reduces the LCA results to a single index, resulting in a comprehensive ranking of simulated alternatives.

KEYWORDS: Energetic simulation, LCA, digital model

1. INTRODUCTION

Lieu de concentration de la population et des activités économiques, les villes sont de fait un lieu majeur de consommation énergétique. Selon un rapport des Nations Unies, elles sont à l'origine de 40 à 70% des émissions de gaz à effet de serre et consomment près de 70% de l'énergie mondiale (principalement dû aux secteurs du transport et du bâtiment) (UN-HABITAT 2011). Les actions à l'échelle urbaine sur les bâtiments et les transports offrent ainsi des leviers d'actions d'envergure pour atteindre les objectifs nationaux de la transition énergétique et écologique.

Parallèlement, dans les projets d'aménagement urbain, les thématiques environnementales et énergétiques sont devenues prégnantes. Au regard des enjeux (e.g. changement climatique) et de la complexité des systèmes urbains, il est nécessaire que les outils pour évaluer les performances énergétiques et environnementales d'un projet urbain soient basés sur :

- Une modélisation physique du quartier,
- Une approche multicritère pour éviter les transferts de pollution entre impacts environnementaux,
- Une perspective cycle de vie pour éviter les transferts de pollution entre phases de cycle de vie.

Pour l'étude des bâtiments à l'échelle d'un quartier, l'association de la simulation énergétique et de l'Analyse du Cycle de Vie (ACV) permet de répondre à ces critères. Depuis quelques années, certains outils matures à l'échelle bâtiment ont été développés et appliqués à l'échelle urbaine (Popovici and Peuportier 2004; Schiopu et al. 2014). Bien que ces outils se basent sur des méthodes reconnues comme pertinentes pour l'évaluation des performances environnementales, peu d'acteurs les utilisent effectivement dans leur exercice professionnel. Cette étude propose plusieurs pistes pour faciliter l'intégration de la simulation et de l'évaluation des performances environnementales dans le processus de conception urbaine.

A travers une étude de cas, nous présentons le couplage d'un modèle de simulation énergétique quartier avec un outil d'ACV bâtiments. L'interopérabilité entre ces modèles experts est renforcée par la mise en œuvre d'une maquette numérique au format standard CityGML du projet étudié. Et l'interprétation des résultats issus du couplage simulation énergétique-ACV est facilitée par l'utilisation d'une méthode d'aide à la décision multicritères (MADMC).

2. PRINCIPE DE LA MODELISATION MULTI-OUTILS

Pour cette étude, nous avons évalué les performances environnementales d'un projet urbain en se basant sur la simulation énergétique du projet couplée à l'ACV et à une MADMC. Dans cet enchaînement, la maquette numérique joue un rôle central pour assurer l'interopérabilité entre outils.

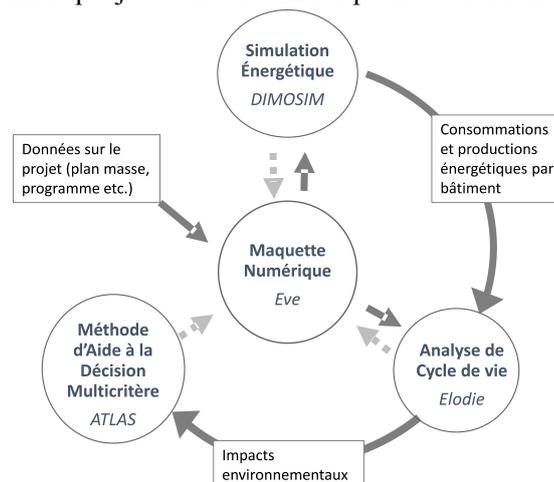


Figure 1: Chaîne d'outils pour évaluer les performances environnementales d'un quartier

Comme indiqué figure 1, les données relatives au projet (plan masse ou plan directeur) sont stockées dans une maquette numérique. Pour cette étude nous avons utilisé la plateforme Eve du CSTB (<http://www.decision3d.com/techno.html>). Il s'agit d'un démonstrateur logiciel qui permet

d'exploiter une maquette numérique centrale au format CityGML (Kolbe, Gröger, & Plümer, 2005). Ce format, qui est un standard, présente l'avantage d'être un format libre et ouvert et donc potentiellement exploitable par un grand nombre de logiciel métier (Lebègue and Celnik 2014). Il permet de stocker à la fois l'information géométrique et sémantique des objets urbains. Dans le cas des bâtiments, ces informations peuvent par exemple être les propriétés des parois (ratio de surfaces vitrées) ou les propriétés physiques des matériaux (valeurs U). Des extensions spécifiques à certains métiers, notamment à l'énergie (Nouvel, et al., 2015) sont en cours de développement et permettent un enrichissement du format de base, permettant ainsi de spécialiser l'information et de définir différents niveaux de granularité. Ainsi, la maquette numérique permet à la fois de fournir des données d'entrée aux outils de calcul, mais aussi de stocker les résultats issus des simulations. Sur la figure 1, les flèches allant des logiciels de simulation vers la maquette numérique indiquent la possibilité de stocker et d'afficher les résultats de simulation dans l'environnement de la maquette.

Une fois la maquette numérique créée, les données sur les bâtiments (localisation, géométrie et éventuellement la composition et la performance de leur enveloppe) sont transmises au logiciel de simulation énergétique quartier. Ici, nous avons utilisé la plateforme de simulation dynamique DIMOSIM (District Modeller and Simulator). Cette plateforme a été développée au sein du CSTB (Riederer et al. 2015) pour modéliser et simuler l'ensemble des flux énergétiques d'un quartier prenant en compte: les consommations liées aux bâtiments (besoins thermiques et électriques, interactions avec leur environnement), les systèmes de production et de stockage d'énergie (locaux et décentralisés) et les réseaux de distribution (électrique et thermique).

Les résultats de la simulation énergétique ainsi que les données sur les bâtiments (métrés) sont ensuite compilées dans un logiciel d'ACV pour évaluer les performances environnementales des bâtiments sur l'ensemble de leur cycle de vie. Nous avons utilisé ELODIE (www.elodie-cstb.fr), outil conçu pour réaliser l'ACV des bâtiments conformément à la norme En 15 978 (Comité Européen de Normalisation 2012). Dans les travaux présentés ici, le périmètre de l'ACV est limité à l'évaluation des impacts liés (1) aux produits de construction (fabrication, mise en-œuvre, maintenance et fin de vie) et (2) à l'utilisation d'énergie durant la vie en œuvre du bâtiment. Les indicateurs d'impacts environnementaux évalués sont listés dans le tableau 1.

Indicateurs environnementaux	Abréviation	Unité
Consommation totale d'Energie primaire	E primaire tot	kWh
Consommation d'Energie Primaire non renouvelable	E non renouv.	kWh
Changement climatique	CC	kg équivalent CO ₂
Consommation d'eau	Eau	L
Production de Déchets dangereux	D dang.	Kg
Production de Déchets non dangereux	D non dang.	Kg
Production de Déchets radioactifs	D rad.	Kg
Acidification atmosphérique	Acid. Atm.	kg équivalent SO ₂
Formation d'ozone photochimique	Ozone Photo.	kg équivalent éthylène

Tableau 1 : Indicateurs environnementaux

Enfin dans le cas où l'on cherche à comparer plusieurs variantes d'un même projet, une MADMC est utilisée pour effectuer le tri et le classement de ces variantes. Dans la littérature, on trouve plusieurs exemples du couplage ACV – MADMC (Hermann, Kroeze, and Jawjit 2007; Linkov and Seager 2011; Karmperis et al. 2013) utilisé pour pondérer et additionner les résultats de l'ACV en un

seul index. Ici, nous avons utilisé la méthode ATLAS, cette méthode de surclassement décrite dans (Perez et al. 2016) est une méthode hybride entre les méthodes PROMETHEE II et ELECTRE III. ATLAS permet d'obtenir le classement des configurations simulées à partir de (1) l'ensemble des scores de chaque configuration issus de l'ACV (i.e. les valeurs d'impacts environnementaux) et (2) la pondération des critères environnementaux.

3. CAS D'ETUDE

Le cas d'étude choisi porte sur une portion du projet d'aménagement du boulevard du Ru de Nesles à Champs-sur-Marne. Ce projet est prévu dans le cadre de l'arrivée du Grand Paris Express. Le périmètre de l'étude est d'une surface de 4ha et inclut 7 îlots. Au moment de l'étude, le projet est en phase programmation et prévoit la construction de 25 bâtiments (logements, bureaux, commerces), ainsi que le réaménagement et la construction de routes et d'espaces publics.

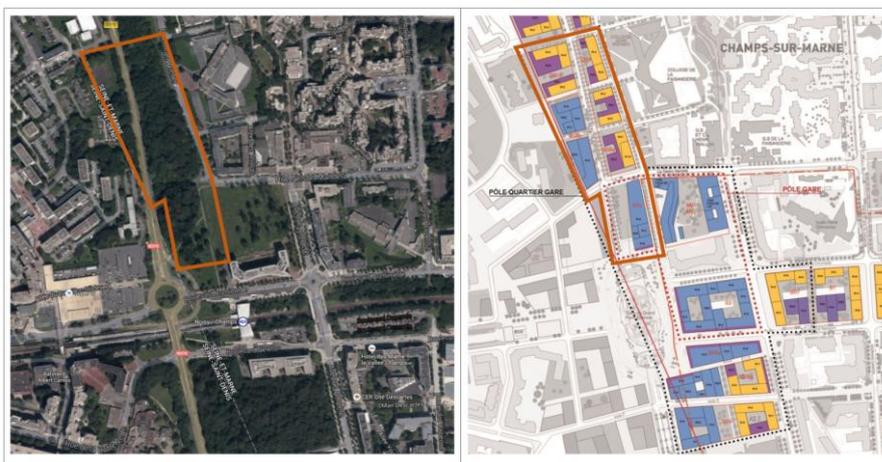


Figure 2: En orange: périmètre de l'étude de cas: état actuel (à gauche) et projet (à droite)

L'Établissement Public d'Aménagement (EPA) Marne-la-Vallée, maître d'ouvrage de l'opération, souhaite que le projet respecte les principes du développement durable, notamment en termes de qualité environnementale. Conformément à cet objectif, nous avons simulé 8 variantes du projet avec différents niveaux de performances énergétiques choisis raisonnablement (voir tableau 2).

Configuration	Production d'énergie	Couverture	Isolation	Vitrages
		PV	(U en W/ m K)	
1	Chaudière sans condensation	10 %	Intérieure U=0,4	Triple U=1
2	Chaudière sans condensation	10 %	Extérieure U=0,2	Triple U=1
3	Chaudière à condensation	20 %	Intérieure U=0,2	Double U=2
4	Chaudière à condensation	10 %	Extérieure U=0,4	Double U=2
5	Pompe à chaleur (air/eau)	20 %	Intérieure U=0,4	Triple U=1
6	Pompe à chaleur (air/eau)	40 %	Extérieure U=0,2	Double U=2
7	Cogénération (strirling)	20 %	Extérieure U=0,4	Double U=2
8	Géothermie (aquifère)	10 %	Intérieure U=0,2	Double U=2

Tableau 2 : Caractéristiques des configurations

3.1. PRINCIPALES HYPOTHESES DE SIMULATION

Les principales hypothèses utilisées pour réaliser l'ACV du projet sont détaillées ci-après :

- La durée d'analyse choisie est de 50 ans.

- Pour évaluer les impacts liés à la mise à disposition des bâtiments nous distinguons :
 - a. Les éléments faisant partis de l’enveloppe du bâtiment. Les quantités (surfaces ou volumes) de ces éléments sont évaluées par l’intermédiaire de la maquette numérique. Ils sont paramétrés pour correspondre aux niveaux de performance décrit dans le tableau 2. La base de données ELODIE permet de calculer leurs impacts.
 - b. Les autres éléments du bâtiment (escaliers, équipements etc.). Pour ces éléments, en phase programmation d’un projet, nous ne disposons pas d’informations permettant de les décrire finement. Leurs impacts sont estimés à partir de ratios issus de la capitalisation sur les résultats d’ACV pour différentes typologies de bâtiments (Lebert et al. 2013).
- Enfin pour évaluer les impacts liés à l’utilisation d’énergie durant la vie en œuvre des bâtiments, les résultats de consommation issus de DIMOSIM sont associés à des vecteurs d’impacts environnementaux. La production d’énergie locale est prise en compte conformément à la norme EN 15 978 (Comité Européen de Normalisation 2012).

Pour utiliser la méthode ATLAS, nous avons regroupé et classé par ordre de priorité les critères environnementaux (voir tableau 3 ligne 1). Ce classement a été choisi pour correspondre à ce que pourrait être les priorités environnementales d’un aménageur en France. La méthode ATLAS a ensuite été appliquée suivant les trois méthodes de pondération proposées par ATLAS (voir tableau 3) et avec les fonctions de surclassement de type linéaire.

Pondération	E non renouv. CC	E primaire tot Eau D rad.	D dang. D non dang.	Acid. Atm. Ozone photo.
Logarithmique	0,149	0,128	0,099	0,059
Linéaire	0,19	0,13	0,08	0,03
Exponentielle	0,26	0,11	0,05	0,02

Tableau 3 : Pondérations des critères environnementaux

4. RESULTATS

Les résultats issus de l’ACV présentés dans de la figure 4 permettent de comparer les performances relatives des 8 configurations à l’aune de chaque indicateur. Ces résultats apportent de nombreuses informations. Par exemple, sur l’indicateur changement climatique les configurations 5, 6 et 8 présentent les meilleures performances (-40% par rapport à la configuration 1). Pour ces trois configurations, l’énergie nécessaire pour chauffer les bâtiments est issue de sources renouvelables : PAC et géothermie où seul le fonctionnement des systèmes nécessite de l’électricité. Le mix électrique français étant largement issu du nucléaire (à environ 78%) les solutions « renouvelables » telles que les configurations 5, 6 et 8 sont relativement peu émettrices de gaz à effet de serre (GES). Les autres configurations modélisées sont des solutions « gaz », donc plus fortement émettrices de GES. A l’inverse, au regard de l’indicateur production de déchets nucléaires, les performances des variantes 5, 6 et 8 sont les moins bonnes.

De fait, aucune des configurations n’est meilleure sur l’ensemble des critères. Un post traitement des résultats utilisant la méthode ATLAS a permis de trier et classer les variantes. Nous concentrons d’abord notre analyse sur les résultats obtenus avec la pondération logarithmique. Avec cette

pondération, le poids des critères décline faiblement avec leur ordre de priorité. Ainsi tous les critères ont leur importance dans les résultats, c'est pourquoi nous préférons ce type de pondération.

Les résultats figure 5 montrent que la configuration 7, caractérisée par la mise en œuvre d'un système de cogénération, est la meilleure parmi celles modélisées. Bien que cette configuration soit la moins bonne sur l'aspect changement climatique, elle obtient de bons résultats sur les autres indicateurs, ce qui lui permet de se classer 1^{ère}. Par ailleurs, l'application d'ATLAS avec la fonction logarithmique fait ressortir des cas d'incomparabilité entre les paires de configurations (1/8), (3/6) et (4/8), ce qui indique pour ces paires que les qualités de l'une ne peuvent compenser ses défauts au regard de l'autre et inversement. Avec la fonction linéaire, les résultats aboutissent au même classement pour les quatre premières configurations (7, 2, 6 et 3), avec toutefois des écarts moins importants. Avec une pondération exponentielle, les indicateurs changement climatique et énergie non renouvelable sont prépondérants. La configuration 6, qui présente les meilleures performances ACV sur ces deux indicateurs, se classe 1^{ère} devant les configurations 7 et 2.

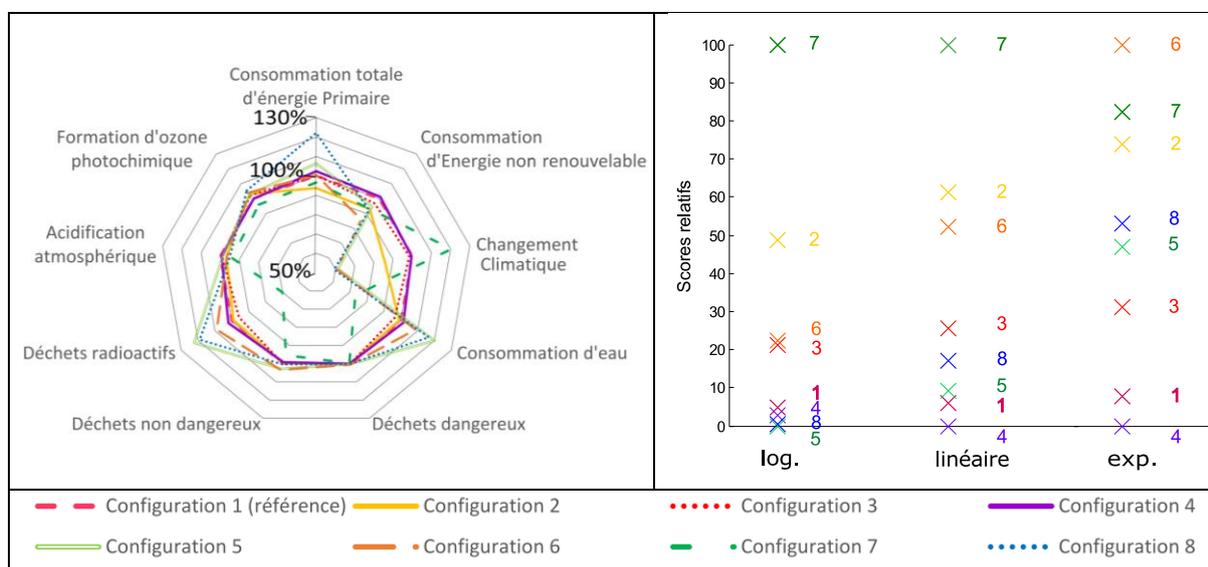


Figure 3 (à gauche) : résultats d'ACV

Figure 5 (à droite) : Classements ATLAS

Enfin, pour chaque configuration, il est possible de représenter en 3D dans la maquette les résultats issus de l'ACV ou de la simulation énergétique. A titre d'exemple, nous présentons dans les figures 6 et 7, la visualisation de l'impact changement climatique pour les configurations 7 et 2 respectivement 1^{ère} et 2^{ème} selon la méthode ATLAS appliquée avec les pondérations logarithmique et linéaire.

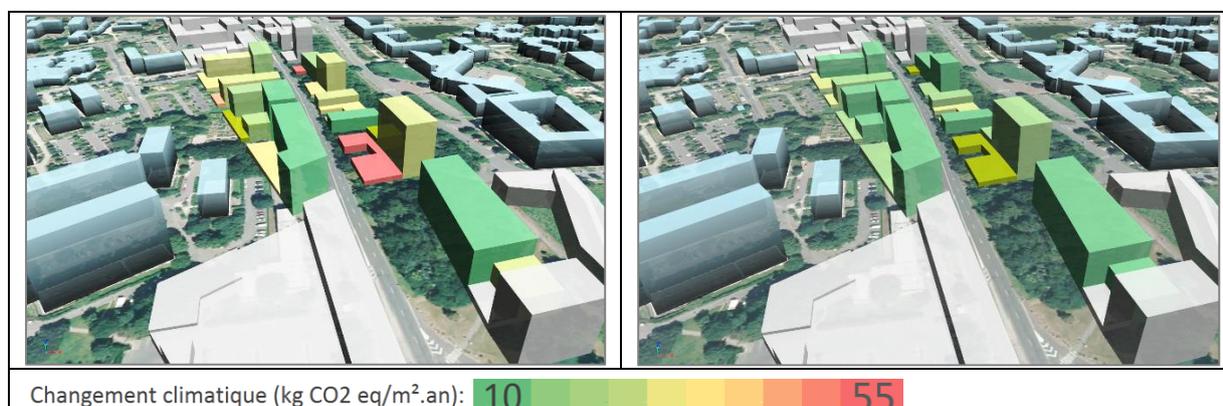


Figure 6 et 7: Impact Changement Climatique pour les configurations 7 (à gauche) et 2 (à droite)

5. DISCUSSION

A l'échelle du quartier le couplage de l'ACV avec la simulation énergétique permet de prendre en compte l'influence de l'environnement et de la forme urbaine sur les performances des bâtiments, par exemple via la prise en compte des ombres portées en énergétique. Ce couplage permet également de modéliser et évaluer les mutualisations possibles entre bâtiments, par exemple la mutualisation des systèmes énergétiques et d'infrastructures.

Du point de vue d'un non-expert, les résultats d'ACV peuvent être complexes à interpréter, ce qui peut limiter leur influence dans un processus décisionnel. En résumant les résultats d'ACV en un seul index, l'utilisation d'une méthode d'aide à la décision multicritères peut faciliter l'interprétation et l'utilisation des résultats d'ACV. L'exemple présenté ici a démontré qu'à partir de résultats d'ACV où aucune variante n'était meilleure sur l'ensemble des critères environnementaux, l'application de la méthode ATLAS a permis de sélectionner la variante n°7 comme meilleure au regard des priorités du décideur et selon une pondération logarithmique. Toutefois les résultats varient largement en fonction des priorités du décideur (Karmperis et al. 2013).

Enfin l'étude de cas présentée ici a permis d'illustrer quelques-uns des apports de la maquette numérique dans le processus de simulation multi-outils. La maquette permet de stocker et gérer de nombreuses données relatives au projet et qui peuvent être communes à plusieurs outils. Pour cela l'utilisation d'un format standard de maquette numérique est recommandée. En addition, la représentation graphique 3D des résultats a pour objectif de faciliter la communication avec des acteurs non professionnels (citoyen, élu, futurs usagers etc.) et ainsi favoriser l'appropriation et la compréhension du projet par le plus grand nombre très tôt dans le processus de conception. A ce titre, les modes de représentations des résultats représentent un enjeu important et une piste de travail de futures recherches.

6. CONCLUSION

Pour l'étude présentée ici, le couplage simulation énergétique-ACV-MADMC a permis d'évaluer les performances environnementales de plusieurs variantes d'un même projet pour finalement aboutir à un classement de ces variantes du point de vue environnemental. Les résultats de cette étude peuvent s'exprimer de plusieurs manières pour s'adapter au public concerné : des résultats détaillés de simulation pour une analyse technique, un score unique en vue d'une prise de décision par un jury ou une visualisation 3D des résultats pour une revue de projet visant un public large.

Dans un contexte environnemental de plus en plus tendu, la simulation multi-outils proposée ici a pour objectif de renforcer la prise en compte des enjeux environnementaux dans les projets d'aménagement urbain.

7. REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient Efficacity (www.efficacity.com) qui a permis d'initier ces travaux et l'EPA-Marne-la-Vallée qui a fourni l'essentiel des données utilisées pour l'étude de cas.

8. BIBLIOGRAPHIE

- Comité Européen de Normalisation. 2012. “Norme EN 15978; Contribution Des Ouvrages de Construction Au Développement Durable - évaluation de La Performance Environnementale Des Bâtiments- Méthode de Calcul.”
- DEE/EICV, CSTB. 2015. “Guide méthodologique_ELODIE.” March. [http://www.elodie2-cstb.fr/Documentation/Guide méthodologique_ELODIE_Mars_202015.pdf](http://www.elodie2-cstb.fr/Documentation/Guide_méthodologique_ELODIE_Mars_202015.pdf).
- Hermann, B. G., C. Kroeze, et W. Jawjit. 2007. “Assessing Environmental Performance by Combining Life Cycle Assessment, Multi-Criteria Analysis and Environmental Performance Indicators.” *Journal of Cleaner Production* 15 (18): 1787–96. doi:10.1016/j.jclepro.2006.04.004.
- Karmperis, Athanasios C., Konstantinos Aravossis, Ilias P. Tatsiopoulos, et Anastasios Sotirchos. 2013. “Decision Support Models for Solid Waste Management: Review and Game-Theoretic Approaches.” *Waste Management* 33 (5): 1290–1301. doi:10.1016/j.wasman.2013.01.017.
- Kolbe, Thomas H., Gerhard Gröger, et Lutz Plümer. 2005. “CityGML – Interoperable Access to 3D City Models”. *Proceedings of the Int. Symposium on Geo-information for Disaster Management, Delft*.
- Lebègue, Eric, and Olivier Celnik. 2014. *BIM & maquette numérique : Pour l'architecture, le bâtiment et la construction*. Paris, Marne-la-Vallée: Eyrolles.
- Lebert, Alexandra, Sébastien Lasvaux, Francis Grannec, Sylviane Nibel, Fanny Achim, and Nicoleta Schiopu. 2013. “Capitalisation des résultats de l’expérimentation HQE Performance. Analyse Statistique Action 22.”
- Linkov, Igor, and Thomas P. Seager. 2011. “Coupling Multi-Criteria Decision Analysis, Life-Cycle Assessment, and Risk Assessment for Emerging Threats.” *Environmental Science & Technology* 45 (12): 5068–74. Doi:10.1021/es100959q.
- Nouvel, Romain, Jean-Marie Bahu, Robert Kaden, Jerome Kaempf, Piergiorgio Cipriano, Moritz Lauster, Karl-Hainz Haefele, Esteban Munoz, Olivier Tournaire, et Egbert Casper. 2015. “Development of the CityGML Application Domain Extension Energy for Urban Energy Simulation”. *In Proceedings CISBAT, Hyderabad - India*
- Popovici, Emil, and Bruno Peuportier. 2004. “Using Life Cycle Assessment as Decision Support in the Design of Settlements.” *In Proceedings of the 21st Conference on Passive and Low Energy Architecture*, 19–22. <http://alexandria.tue.nl/openaccess/635611/p0664final.pdf>.
- Schiopu, Nicoleta, Adélaïde Mailhac, Didier Beloin-Saint-Pierre, Sébastien Lasvaux, Galdric Sibiude, et Jacques Chevalier. 2014. “A Hybrid Methodology for the Environmental Assessment of Anthropic Systems in Urban Areas.” *Conférence Sustainable Buildings 2014, Barcelone*.
- UN-HABITAT. 2011. “Global Report on Human Settlements 2011: Cities and Climate Change.” United Nations Human Settlements Program, Earthscan.
- Perez, Nicolas, Adélaïde Mailhac, Christian Inard, Peter Riederer. 2016. “Outil aide à la décision multicritère pour la conception de systèmes énergétiques à l’échelle du quartier”. *Conférence IBPSA France 2016*.
- Riederer, Peter, Vincent Partenay, Nicolas Perez, Christophe Nocito, Romain Trigance, Thierry Guiot. 2015. “Development of a Simulation Platform for the Evaluation of District Energy System Performances”. *Fourteenth IBPSA Conference: 2499-2506*.

Modélisation à l'échelle de la ville de la demande énergétique de chauffage et de refroidissement des bâtiments

Loïc Frayssinet^{*1}, Frédéric Kuznik¹, Jean-Luc Hubert², Maya Milliez², Jean-Jacques Roux¹

¹ CETHIL UMR5008, INSA-Lyon

9 rue de la Physique, 69621 Villeurbanne Cedex

² EDF R&D - Département EnerBaT

Avenue des Renardières - Ecuellen, 77818 Moret sur Loing

*loic.frayssinet@insa-lyon.fr

RESUME. Il existe de nombreuses approches permettant de modéliser la demande énergétique en chauffage-refroidissement des bâtiments à l'échelle de la ville, mais peu sont basées sur des représentations explicites de la ville. Parmi celles-ci, encore moins permettent de calculer cette demande à un pas de temps infra-horaire. Ce défaut est mis en évidence à l'aide d'une analyse bibliographique. L'état de l'art permet aussi d'identifier les principaux axes de modélisation à améliorer dans cette optique. Nous nous intéressons en particulier à la modélisation de l'enveloppe. L'objectif est de créer un modèle de bâtiment suffisamment simple et numériquement performant pour être utilisé à l'échelle du quartier ou de la ville, tout en garantissant une précision suffisante pour la détermination de l'appel de puissance aussi bien en chauffage qu'en refroidissement. Les premiers résultats obtenus dans ce cadre sont présentés ici.

MOTS-CLÉS. chauffage et refroidissement des bâtiments ; demande de puissance ; échelle du quartier.

ABSTRACT. Many approaches exist to estimate heating and cooling energy demand of buildings at city level, but few models are able to consider explicitly all buildings of the domain, and even less can determine hourly—or less—energy demand. This lack is highlighted thanks to a review of the main tools developed. The major ways of improvements are identified thanks to the state of the art of the models used, focusing on the envelope. The final objective is to develop a building model for district or city energy simulation as simple and computationally efficient as possible, able to accurately predict the heating and cooling power demand. First results obtained in this way are shown.

KEYWORDS. Heating and cooling in buildings ; Power demand prediction ; District scale.

1 INTRODUCTION

L'étude des consommations énergétiques à l'échelle des quartiers, voire même de la ville, est un sujet de plus en plus récurrent (Keirstead et al., 2012). Cet intérêt est poussé, d'une part par l'essor démographique considérable des aires urbaines, notamment dans les pays en développe-

ment, et d'autre part par les problématiques, aussi bien énergétiques (production, distribution, etc.) que sanitaires (pollution, îlot de chaleur, etc.), engendrées par cette concentration urbaine.

Dans le cadre de cette étude, nous nous intéresserons exclusivement aux consommations liées aux bâtiments et particulièrement au chauffage et au refroidissement, car ceux-ci représentent la majeure partie de l'énergie consommée et font l'objet d'importantes politiques de réductions.

Il existe diverses méthodes pour étudier et estimer les consommations énergétiques à l'échelle de la ville (Swan et Ugursal, 2009). Cependant, seule l'approche *bottom-up* permet d'étudier en détail la consommation à l'échelle d'un ensemble urbain à partir des caractéristiques de chaque bâtiment. Dans ce cas, la consommation totale de la ville est donc calculée de façon "désagrégée", comme la somme des consommations individuelles de chaque bâtiment. Ce niveau de détail permet de distinguer les variations spatiales de la consommation, bâtiment par bâtiment. On parle alors de *micro-simulation* (Perez, 2014) dans le cas où chaque bâtiment de l'aire urbaine considérée est modélisé explicitement, selon ses propres caractéristiques.

Dans un premier temps, nous analyserons les différentes approches utilisées dans la littérature pour la modélisation énergétique des bâtiments à l'échelle du quartier et de la ville, ainsi que les modèles associés. Ensuite, nous illustrerons brièvement l'une des principales difficultés rencontrées dans le cas de la simulation de la puissance.

2 ÉTAT DE L'ART

Les principales motivations menant à la micro-simulation énergétique des bâtiments en milieu urbain sont :

1. l'étude des interactions entre l'environnement urbain, y compris le microclimat, et les consommations des bâtiments ;
2. l'identification des bâtiments et des quartiers les plus énergivores et l'estimation des potentielles réductions énergétiques ;
3. le dimensionnement et la gestion de réseaux intelligents (*smart-grids*) pour une meilleure intégration des sources d'énergie décentralisées et intermittentes.

2.1 ÉTUDE DES INTERACTIONS AVEC L'ENVIRONNEMENT URBAIN

Les bâtiments en milieu urbain s'impactent mutuellement : directement par les masquages et les réflexions des rayons solaires, ainsi que par les échanges thermiques en grandes longueurs d'ondes ; et indirectement via le microclimat urbain engendré. Ainsi, à cause de la concentration urbaine, l'environnement et les sollicitations extérieures ne peuvent pas être paramétrées aussi simplement que comme cela est fait usuellement pour des bâtiments supposés situés dans un environnement isolé. Les sollicitations extérieures sont donc spécifiques à chaque bâtiment et doivent donc être calculées de façon différenciée. Mais encore, des couplages apparaissent entre les différents bâtiments (microclimat, échanges de grandes longueurs d'ondes), engendrant des rétroactions. Ces éléments complexifient les modèles et augmentent d'autant plus les temps de calculs pour les simulations.

Les simulations thermiques dynamiques classiques n'ont pas été conçues pour prendre en compte précisément le milieu urbain. C'est pourquoi certains auteurs les ont modifiées ou couplées avec d'autres outils de simulation pour prendre en compte plus finement le microclimat et les échanges infrarouges (p. ex. Yang et al., 2012) ou la modification du rayonnement solaire (p. ex. Strømman-Andersen et Sattrup, 2011).

Pour dépasser les limitations des STD usuelles pour prendre en compte précisément les interactions en milieu urbain, des outils spécifiques ont été créés afin d'intégrer la modélisation de l'environnement urbain. Il s'agit généralement de modèles thermo-radiatifs, initialement conçus pour étudier l'éclairement et le confort des piétons en milieu urbain, complétés pour prendre en compte le comportement thermique détaillé et les besoins énergétiques des bâtiments, tels ceux

développés par He et al. (2009) et Bouyer et al. (2011). Ce dernier utilise le logiciel SOLENE, avec lequel il est possible de prendre en compte le microclimat grâce à un couplage avec un programme de mécanique des fluides (SOLENE-Microclimat). Cependant, ces modèles sont souvent très détaillés, donc très lourds numériquement, d'autant plus si le microclimat est simulé. Les simulations se focalisent donc généralement sur un seul bâtiment. Néanmoins, des efforts ont été faits pour les étendre à un plus grand nombre de bâtiments ; par exemple : Kawai et al. (2014) utilisent le modèle de He et al. (2009) pour l'étude de la consommation de plusieurs bâtiments mais seulement pour quelques jours, et Gros et al. (2014, 2015) utilisent EnviBatE (composé de SOLENE et d'un modèle simplifié de microclimat) pour simuler la consommation d'un quartier sur une saison.

Les outils présentés ici permettent de modéliser finement l'impact de l'environnement urbain, notamment vis-à-vis des radiations, mais aussi parfois par rapport au microclimat. Des simplifications sont nécessaires pour pouvoir réaliser des simulations à plus grande échelle et donc parler de micro-simulation à proprement dit. Des pistes ont été proposées, notamment par Robinson et Stone (2005) pour le calcul des radiations, et par Gros et al. (2014) et Obrecht et al. (2014) pour le microclimat (méthodes respectivement basées sur des modèles empiriques et sur une formulation particulière des équations de la mécanique des fluides permettant de paralléliser les calculs).

2.2 CALCUL DES CONSOMMATIONS

La micro-simulation exige de simuler individuellement chaque bâtiment constituant la ville ou le quartier. Cependant, le nombre d'éléments à considérer peut rapidement devenir très important, et les temps de calcul, avec les outils classiques de simulation thermique dynamique (STD), devenir prohibitifs. Toutefois, lorsque l'on cherche à déterminer quels sont les bâtiments les plus énergivores et quelles économies peuvent être réalisables, on ne s'intéresse alors généralement qu'à la consommation annuelle. Il est alors possible d'utiliser des modèles thermiques quasi-statiques, bien plus simples que les modèles dynamiques et donc bien plus rapide à simuler. De plus, étant donné que l'on cherche à comparer les bâtiments entre eux, et donc à mettre en évidence des écarts notables, le microclimat est souvent ignoré. En revanche, les masques solaires sont généralement considérés, même de façon approximative, car la diminution des gains solaires a des conséquences non-négligeables sur les consommations. Les plateformes existantes (telles que SimStadt (Nouvel et al., 2015), Curtis (Bahu et al., 2013), et celles utilisées dans Energy Atlas Berlin project (Kaden et Thomas H. Kolbe, 2013) et EnerCity project (Agugiario, 2015), et par Li et al. (2015)) exploitent des systèmes d'informations géographiques (SIG) pour extraire les propriétés géométriques de chaque bâtiment qui sont ensuite utilisées pour le calcul des consommations.

Néanmoins, certaines plateformes estiment les consommations des bâtiments de façon dynamique au pas de temps horaire, telles CitySim (Robinson et al., 2009) et celle développée par Tian et al. (2015). Pour parvenir à cela, la première utilise des modèles d'enveloppe et radiatif simplifiés, mais ne permet pas la simulation d'une ville complète (exemple d'application : Orehounig et al., 2010), alors que la seconde parallélise les calculs ce qui permet de simuler un grand nombre de bâtiments sans augmenter considérablement le temps de calcul.

2.3 SIMULATION DE LA COURBE DE CHARGE

Le dimensionnement des réseaux énergétiques est basé sur la courbe de charge des bâtiments, notamment sur les pics de demandes. A l'échelle du quartier ou de la ville, une attention particulière doit être apportée au comportement des occupants, notamment parce que leurs impacts sont non-négligeables sur la consommation des bâtiments, mais aussi et surtout parce qu'à l'échelle agrégée du quartier on observe un foisonnement des courbes de charges (fait que le maximum à l'échelle agrégée ne correspond pas à la somme des maxima à l'échelle désagrégée

dû aux variations temporelles des comportements des occupants).

La démarche utilisée dans ce cas est similaire à l'approche présentée précédemment, mis à part qu'il est indispensable que les modèles énergétiques des bâtiments soient dynamiques et que le foisonnement soit incorporé dans les modèles de comportement des usagers. De tels modèles sont inclus, par exemple, dans les plateformes suivantes : Smart-E (Berthou et al., 2015), DIMOSIM (Riederer et al., 2015), OPENIDEAS (Baetens et al., 2015) et AMBASSADOR project (Béguery et al., 2015).

Les modèles thermiques dynamiques utilisés pour les enveloppes sont généralement basés sur des modèles de Résistances-Capacités afin de simplifier et d'accélérer les calculs par rapport à des modèles détaillés. La méthode des facteurs de réponses utilisée par Gros et al. (2014) est une alternative. Cependant, ces simplifications ne permettent pas de considérer l'ensemble de la dynamique thermique, ce qui peut engendrer des erreurs sur le calcul de la courbe de charge. Autrement, la méthode de réduction proposée par Kim et al. (2014) permet de considérer l'essentiel des dynamiques avec peu de paramètres, mais elle suppose que les propriétés thermiques sont invariantes dans le temps.

2.4 BILAN ET DISCUSSION

La figure 1 récapitule le domaine d'utilisation des différents types de micro-simulations présentés précédemment, dans le plan "taille du domaine d'étude - résolution temporelle des sorties". A titre d'illustration, certaines études sont reportées sur la figure avec leur résolution spatiale (le niveau de résolution pour le calcul des sollicitations externes modifiées par l'environnement urbain) et la période simulée. Les croix indiquent les études où le microclimat est simulé.

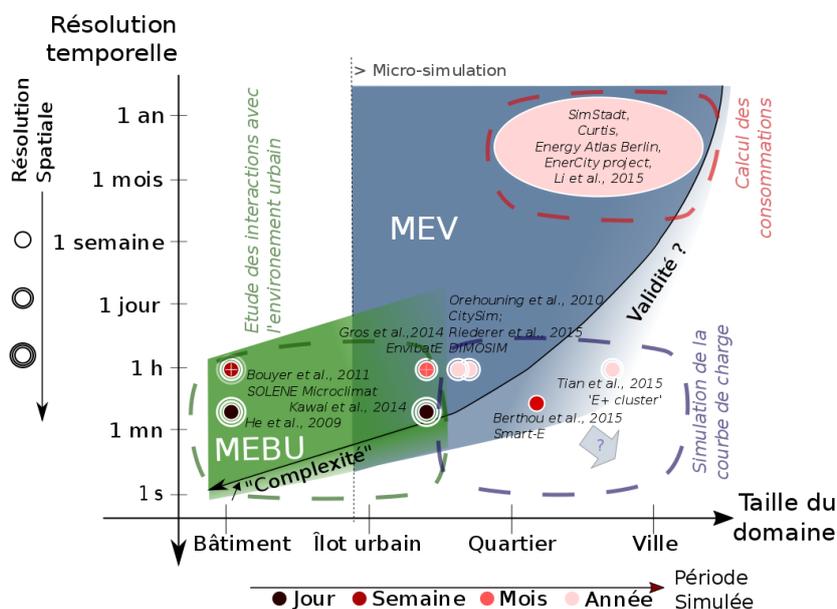


FIGURE 1. Domaines d'utilisation des différentes modélisations des bâtiments en milieu urbain.

On observe que les modèles énergétiques des bâtiments urbains les plus détaillés sont ceux qui se focalisent sur l'étude des interactions avec l'environnement urbain. Néanmoins, étant donné la complexité des interactions et les nombreux couplages, ceux-ci sont utilisés pour des études portant sur un faible nombre de bâtiments et sur de courtes périodes. On parle alors de modélisation énergétique de bâtiments urbains (MEBU).

Les deux autres approches intègrent pleinement l'échelle du quartier, il s'agit bien de micro-simulations. On les désignera par le terme de "modélisation énergétique des villes" (MEV). A l'opposé des MEBU, on trouve les modèles utilisés pour le calcul des consommations. Ceux-

ci sont très simplifiés, ce qui permet de calculer aisément les consommations pour un grand nombre de bâtiments, mais uniquement pour des bilans annuels voir mensuels (faible résolution temporelle). Entre les deux types de modélisations précédents, se situent les modèles conçus pour estimer la courbe de charge. Afin de modéliser la courbe de charge, des modèles détaillés sont nécessaires pour prendre en compte les interactions et les couplages qui jouent un rôle certain sur la dynamique de la demande énergétique (puissance). Mais leur simulation nécessite une capacité de calcul très importante, ce qui limite grandement leur extension à un nombre important de bâtiments. On observe d'ailleurs bien que la résolution est fortement liée à la taille spatiale et temporelle (période) de la simulation. Il est pour le moment difficile de réaliser des simulations pour un nombre conséquent de bâtiment tout en effectuant des calculs à un faible pas de temps. Les pistes pour y parvenir reposent sur deux approches :

1. augmenter les capacités de calcul ou utiliser des techniques numériques performantes (parallélisation, algorithmes efficaces, etc.) ;
2. utiliser des techniques de modélisation et des simplifications numériquement performantes qui impactent le moins possible l'exactitude des sorties.

Des travaux sont aussi nécessaires pour valider les hypothèses effectuées vis-à-vis de l'exactitude de la courbe de charge calculée. Notamment, les erreurs engendrées par l'incertitude sur les caractéristiques des bâtiments, y compris les charges internes liées aux comportements des occupants, doivent être étudiées. En effet, à une échelle spatiale aussi large, la détermination de l'ensemble des données nécessaires pour alimenter les modèles ne peut être envisagée de façon exhaustive, car cela nécessiterait d'importants moyens matériels et beaucoup de temps. D'autant plus que leur détermination peut s'avérer très complexe (composition exacte des façades, rendement des systèmes, etc.) et que leur valeur peut varier dans le temps (vieillesse, malfaçon, rénovation, etc.). De même, l'impact des hypothèses simplificatrices couramment utilisées, telles que la modélisation mono-zone et le fait de négliger ou d'approximer le microclimat, doit être étudié.

3 EXEMPLE : TEST DE LA VALIDITÉ DU MODÈLE MONO-ZONE

Dans les micro-simulations, notamment pour le calcul des consommations, il est courant de ne considérer qu'une seule zone par bâtiment par simplicité et par manque d'informations concernant l'intérieur. L'objectif de cette partie est de tester la validité de cette hypothèse pour la simulation de la courbe de charge en chauffage-refroidissement.

3.1 MODÈLES

Les modèles utilisés sont construits sous Dymola à l'aide de la bibliothèque Modelica BuildSysPro¹ développée par le département d'EnerBaT d'EDF R&D (Plessis et al., 2014).

Le modèle détaillé de référence correspond à un hypothétique bâtiment de base carrée de 10 m de côté et de trois niveaux de 2,7 m de haut. Chaque étage est divisé en 4 zones et chaque zone est délimitée par des cloisons internes et par un seul mur extérieur orienté dans une direction cardinale, de sorte que chaque zone soit soumise aux sollicitations solaires d'une seule orientation. La composition des murs extérieurs, des cloisons, des planchers et de la toiture sont pris dans le catalogue de données de BuildSysPro pour des logements collectifs construits entre 1974 et 1982. Cette période a été choisie comme représentative du parc moyen. Le coefficient de déperdition du vitrage est pris égal à 4,6 W/(m².K). Le taux de ventilation a été fixé à 0,7 vol/h, le ratio de vitrage à 0,4 quelle que soit l'orientation. Le plancher inférieur est supposé en contact avec un local non chauffé, la température limite sur sa face extérieure est prise égale à la

1. Une version libre existe sous OpenModelica, disponible ici : <https://github.com/edf-enerbat>.

moyenne pondérée par le coefficient réglementaire b , fixé à 0,6, entre la température extérieure et la température intérieure. En première approximation, aucun masque n'est pris en compte, et l'effet du vent est ignoré. Les sollicitations météorologiques extérieures sont la température extérieure, la température de ciel (rayonnement grandes longueurs d'ondes) et le rayonnement solaire. Les données météorologiques proviennent des données METEONORM pour la ville de Trappes. Le flux solaire transmis à l'intérieur de chaque zone est supposé entièrement absorbé par le plancher de la zone. La température de consigne pour le chauffage est fixée à 19°C , et pour le refroidissement à 26°C . Les puissances sont estimées de façon idéale (non prise en compte du comportement des systèmes énergétiques) à l'aide d'un contrôleur PID.

Le modèle détaillé est comparé à un modèle mono-zone ayant les mêmes caractéristiques que le précédent mais avec une seule zone thermique pour l'ensemble du bâtiment. Pour obtenir la même inertie interne, une cloison interne virtuelle est ajoutée avec la même surface exposée que l'ensemble des cloisons internes du modèle détaillé. Un plancher virtuel interne correspondant au deux étages est aussi ajouté. Le flux solaire transmis est divisé entre le plancher bas et le plancher virtuel au prorata du nombre d'étages auquel il correspond.

3.2 RÉSULTATS

La comparaison entre les deux modèles (figure 2) montre que le modèle mono-zone reproduit plutôt fidèlement la courbe de charge totale du bâtiment (en valeurs absolues : erreur max = 4549 W, erreur moyenne = 611 W, soit resp. 19 et 3 % de la puissance maximale), sauf pour les faibles puissances. La figure 3 représente un agrandissement de l'une des périodes, en saison de chauffe, où ces écarts sont observés, avec désagrégation zone par zone de la puissance totale du modèle détaillé. On se rend compte que l'appel de puissance minimal résiduel correspond uniquement aux zones non exposées au soleil. En effet, dans le modèle mono-zone, l'ensemble du bâtiment bénéficie des apports solaires, alors que dans le modèle détaillé, les zones non-exposées n'en profitent pas directement et nécessitent donc d'être chauffées. De même le modèle mono-zone a tendance à plus se refroidir en période nocturne ce qui tend à surestimer globalement le chauffage. On observe une situation similaire en période estivale avec une surchauffe des zones exposées au soleil et donc une sous-estimation de la consommation de froid avec le modèle mono-zone.

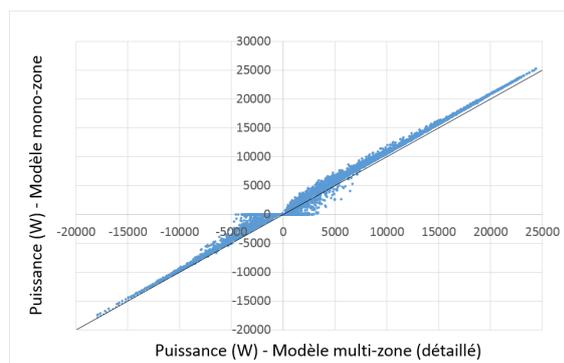


FIGURE 2. Comparaison des modèles

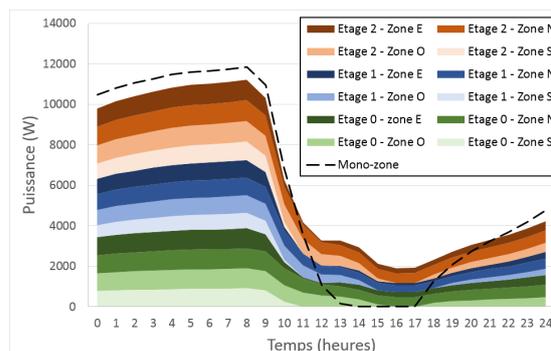


FIGURE 3. Détail des consommations

3.3 DISCUSSIONS

Ainsi, dans notre cas, l'hypothèse mono-zone permet de reproduire assez fidèlement l'allure de la courbe de charge, avec une légère surestimation en hiver et une sous-estimation en été, sauf pour les minima qui sont largement sous-estimés (ce qui concerne principalement les intersaisons). En règle générale les zones fortement isolées les unes des autres et ayant des sollicitations très différents doivent être différenciées. Il conviendrait donc, dans notre cas, d'effectuer au moins des zonages par orientations principales.

Toutefois, ces conclusions ne sont valables que dans notre cas d'étude. Dans un cas plus représentatif du milieu urbain, il faudrait notamment prendre en compte l'environnement urbain, et notamment les masques solaires qu'ils engendrent, car ceux-ci peuvent augmenter les hétérogénéités d'une zone à une autre et d'un étage à l'autre. De même, avant de généraliser, différentes typologies de bâtiments devraient être testées, avec différentes morphologies et pour différents climats. De plus, ces études devront nécessairement être aussi effectuées à l'échelle du quartier, et non pas seulement à celle du bâtiment, à cause de l'effet du foisonnement.

4 CONCLUSIONS

A l'aide de l'état de l'art, nous avons vu qu'il est difficile d'atteindre le niveau de modélisation nécessaire pour les simulations de la courbe de charge des bâtiments urbains. Nous avons illustré cela par un exemple montrant qu'une hypothèse couramment utilisée pour le calcul des consommations annuelles n'est pas totalement valable dans ce cas, car un haut niveau de détail est nécessaire. Des travaux sont donc encore nécessaires pour déterminer le bon niveau de modélisation, c'est-à-dire pour identifier les hypothèses simplificatrices acceptables et les données sensibles à connaître avec précision.

5 BIBLIOGRAPHIE

RÉFÉRENCES

- Agugiario, G. (2015). Energy planning tools and CityGML-based 3d virtual city models : experiences from Trento (Italy). *Appl Geomat*, 2015.
- Baetens, R., De Coninck, R., Jorissen, F., Picard, D., Helsen, L., et Saelens, D. (2015). OPENIDEAS – An Open Framework for Integrated District Energy Simulations. In *14th International Conference of IBPSA*, Hyderabad, India.
- Bahu, J.-M., Koch, A., Kremers, A., et Murshed, S. (2013). Towards a 3d spatial urban energy modelling approach. Istanbul, Turkey.
- Berthou, T., Duplessis, B., Rivière, P., Stabat, P., Casetta, D., et Marchio, D. (2015). Smart-E : A Tool for Energy Demand Simulation and Optimization at the City Scale. In *14th International Conference of IBPSA*, Hyderabad, India.
- Bouyer, J., Inard, C., et Musy, M. (2011). Microclimatic coupling as a solution to improve building energy simulation in an urban context. *Energy and Buildings*, 43(7) :1549–1559.
- Béguery, P., Pflaum, P., Rousset, N., Bourry, F., et Wantier, A. (2015). Simulation for the Evaluation of Energy Management Algorithms at the district Level – Example of Use Case from the AMBASSADOR Project. In *14th International Conference of IBPSA*, Hyderabad, India.
- Gros, A., Bozonnet, E., et Inard, C. (2014). Cool materials impact at district scale—Coupling building energy and microclimate models. *Sustainable Cities and Society*, 13 :254–266.
- Gros, A., Bozonnet, E., Inard, C., et Musy, M. (2015). Simulation tools to assess microclimate and building energy – A case study on the design of a new district. *Energy and Buildings* (2015).
- He, J., Hoyano, A., et Asawa, T. (2009). A numerical simulation tool for predicting the impact of outdoor thermal environment on building energy performance. *Applied Energy*, 86(9) :1596–1605.

- Kaden, R. et Thomas H. Kolbe (2013). City-wide total energy demand estimation of buildings using semantic 3d city models and statistical data.
- Kawai, H., Asawa, T., Saito, R., et Sato, R. (2014). Numerical study : How does a high-rise building affect the surrounding thermal environment by its shading? In *30th International PLEA Conference*, CEPT University, Ahmedabad.
- Keirstead, J., Jennings, M., et Sivakumar, A. (2012). A review of urban energy system models : Approaches, challenges and opportunities. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(6) :3847–3866.
- Kim, E.-J., Plessis, G., Hubert, J.-L., et Roux, J.-J. (2014). Urban energy simulation : Simplification and reduction of building envelope models. *Energy and Buildings*, 84 :193–202.
- Li, Q., Jige Quan, S., Augenbroe, G., Pei-Ju Yang, P., et Brown, J. (2015). Building Energy Modelling at Urban Scale : Integration of Reduced Order energy Model with Geographical Information. In *14th International Conference of IBPSA*, Hyderabad, India.
- Nouvel, R., Brassel, K.-H., Bruse, M., Duminiel, E., Coors, V., Eicker, U., et Robinson, D. (2015). SimStadt, a new workflow-driven urban energy simulation platform for CityGML city models. In *Proceedings of International Conference CISBAT 2015 Future Buildings and Districts Sustainability from Nano to Urban Scale*, pages 889–894. LESO-PB, EPFL.
- Obrecht, C., Kuznik, F., Merlier, L., Roux, J.-J., et Tourancheau, B. (2014). Towards aerodynamic simulations at urban scale using the lattice Boltzmann method. *Environmental Fluid Mechanics*, 15 :753–770.
- Orehounig, K., Mavromatidis, G., Evins, R., Dorer, V., et Carmeliet, J. (2010). Predicting energy consumption of a neighborhood using building performance simulations. *ENERGY*, 2011.
- Perez, D. (2014). *A framework to model and simulate the disaggregated energy flows supplying buildings in urban areas*. PhD thesis, École polytechnique fédérale de Lausanne.
- Plessis, G., Kaemmerlen, A., et Lindsay, A. (2014). BuildSysPro : a Modelica library for modelling buildings and energy systems. pages 1161–1169.
- Riederer, P., Partenay, V., Perez, N., Nocito, C., Trigance, R., et Guiot, T. (2015). Development of A simulation Platform For The Evaluation Of District Energy System Performance. In *14th International Conference of IBPSA*, Hyderabad, India.
- Robinson, D., Haldi, F., Kämpf, J., Leroux, P., Perez, D., Rasheed, A., et Wilke, U. (2009). CitySim : Comprehensive micro-simulation of resource flows for sustainable urban planning. In *Eleventh International IBPSA Conference*, pages 1083–1090.
- Robinson, D. et Stone, A. (2005). A simplified radiosity algorithm for general urban radiation exchange. *Building Services Engineering Research and Technology*, 26(4) :271–284.
- Strømmand-Andersen, J. et Sattrup, P. (2011). The urban canyon and building energy use : Urban density versus daylight and passive solar gains. *Energy and Buildings*, 43(8) :2011–2020.
- Swan, L. G. et Ugursal, V. I. (2009). Modeling of end-use energy consumption in the residential sector : A review of modeling techniques. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(8) :1819–1835.
- Tian, W., Rysanek, A., Choudhary, R., et Heo, Y. (2015). High Resolution Energy Simulations at City Scale. In *14th International Conference of IBPSA*, Hyderabad, India.
- Yang, X., Zhao, L., Bruse, M., et Meng, Q. (2012). An integrated simulation method for building energy performance assessment in urban environments. *Energy and Buildings*, 54 :243–251.

Energy efficiency of existing buildings: A case study of a French higher education campus

Y. Allab^{1,4}, M. Pellegrino^{2,4,*}, X. Guo^{3,4}, A. Kindinis^{1,4}, E. Nefzaoui^{3,4,5}

¹ Université Paris-Est, Institut de Recherche en Constructibilité, ESTP, 28, avenue du président Wilson, 94230 Cachan, France.

² Université Paris-Est Marne-la-Vallée, Lab'Urba-GU, Cité Descartes, 5 Boulevard Descartes, 77420 Champs-sur-Marne, France.

³ ESIEE Paris, Université Paris-Est, 2 Bd Blaise Pascal, 93162 Noisy-le-Grand, France.

⁴ Efficacity, 14-20 boulevard Newton, 77447 Marne la Vallée Cedex 2, France.

⁵ Université Paris-Est, ESYCOM Lab., 2 Bd Blaise Pascal 93162 Noisy-le-Grand, France.

*margot.pellegrino@u-pem.fr

RESUME. Les bâtiments d'enseignement supérieur, souvent anciens, peuvent être très énergivores. Leurs consommations électrique et thermique sont liées à l'occupation (étudiants, enseignants-chercheurs, administratifs, etc.) et à des processus particuliers (équipements de laboratoires, salles informatiques, etc.). Un bâtiment d'une surface de 30 546 m² d'une école d'ingénieurs en région parisienne a été étudié afin de proposer des préconisations d'amélioration de sa performance énergétique. Pour ce faire, un protocole intégré d'audit énergétique a été mis en place à travers : i) la réalisation d'une campagne de mesures ; ii) la mise en place d'une enquête sur le confort et les usages à retombée énergétique des occupants ; iii) l'étude de l'efficacité de la ventilation dans le bâtiment ; et iv) la réalisation d'une simulation thermique dynamique du bâtiment qui a permis d'évaluer l'impact des différents scénarii préconisés.

MOTS-CLÉS : audit énergétique ; bâtiments d'enseignement ; confort thermique

ABSTRACT. Higher education buildings, often old, are highly energy-consumer. Their electrical and thermal consumption is related to the occupation (students, faculty and administration staff, etc.) and specific processes (laboratory equipment, computers, etc.). The building of an engineering school in Paris region with a floor area of 30 546 m² has been studied in order to propose recommendations to improve its energy performance. An integrated energy audit protocol was implemented through: i) the completion of a measurement campaign; ii) the implementation of a survey on occupants' comfort and energy uses; iii) the study of the efficiency of ventilation in the building; and iv) the implementation of a dynamic thermal simulation of the building that was used to assess the impact of different recommended scenarios.

KEYWORDS : energy audit; educational buildings; thermal comfort

1. INTRODUCTION

The growing interest for users comfort leads to a dilemma in the building sector concerning two key issues: energy efficiency and indoor environmental quality (IEQ) which implies indoor air quality, thermal, visual and acoustic comfort. Indeed, in addition to the increasing interest for energy efficiency during the last decades, the users comfort is nowadays considered as “an integral part of the total building performance approach” (Wong et al. 2008) and is inevitably linked to the energy performance. The increasing importance of IEQ is due to more demanding comfort standards as well

as economic considerations as pointed out by recent studies on the impact of a good IEQ in tertiary buildings on workers' productivity (Wargocki et Seppänen 2006; El Asmar et al. 2014).

In the particular case of educational buildings (EB), due to their specific character, the dilemma of energy and comfort issues requires a special attention. EB represent a good opportunity to promote building energy efficiency and environmental quality towards the pupils and their families (Theodosiou et Ordoumpozanis 2008). In addition, they offer a huge potential of energy savings because of their large number and since energy represents the second largest expense in schools after the payroll (Das Pereira et al. 2014). Among tertiary buildings, IEQ in EB is even stronger since IEQ impacts both the productivity of workers and the learning performances of students (Lee et al. 2012; Wargocki et Wyon 2013) as well as their health status (Turunen et al. 2014).

The present work reports an audit on a University Campus (UC) from January to July 2015. It was aimed to implement an assessment protocol which addresses simultaneously thermal comfort, indoor air quality (IAQ) and energy efficiency issues in higher EB. Thereby, the main steps of the present study are: (i) the energy audit through an analysis of the energy consumption and the energy management strategies; (ii) in situ measurements to verify the implemented strategies and identify possible problems; (iii) a comfort study through objective (physical measurements) and subjective (questionnaire survey) assessment; (iv) finally, the development of a building energy model to quantify the energy and economic cost of a set of recommendations.

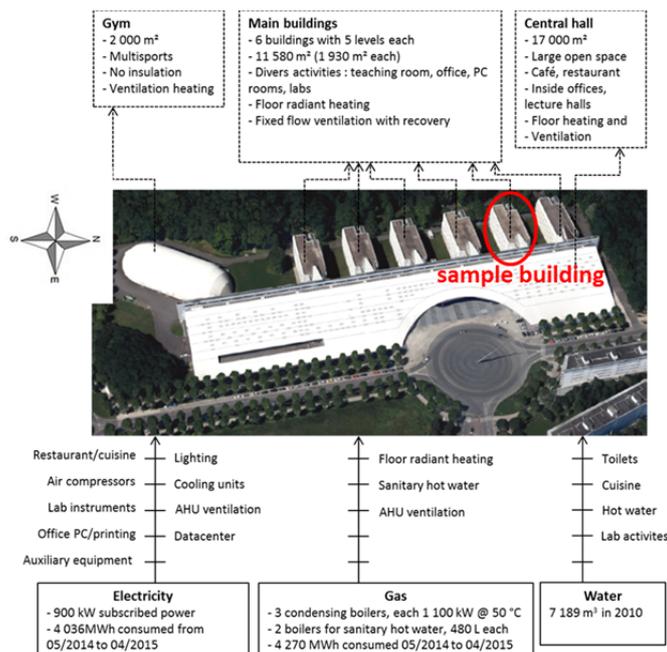


Figure 1 : details of the UC buildings, utilities and energy supplies. The red circle indicates the building sample instrumented and analysed in the following sections

The studied site is a French university campus located in Champs sur Marne (around 15 km east of Paris). The UC was built in 1987 and presents a total net floor surface of 30 580 m². The UC consists of a central hall connected with six buildings (5 floors), and a gym. The UC is obviously devoted to teaching with classrooms in each buildings, research with a number of laboratories and administrative offices. Specific processes such as clean room facilities and server rooms, mainly relying on electricity, are out of the scope of the present work. The building indoor environment is controlled by

two systems: an air handling system and a heating floor system where water is the heat transfer fluid. Under local climate, there is no need for cooling except for special utilities such as the data centres and the clean rooms. The detailed configuration of the buildings, their utilities, as well as their main energy supplies are shown in Figure 1.

2. METHODOLOGY

The adopted audit process includes two main tasks which were held simultaneously: an energy audit of the building and a comfort assessment.

The building energy audit was performed at two levels: a global level and a local one. In the former, the consumption of the UC was studied by means of the analysis of final energy bills and physical measurements. Heat meters were used to measure the thermal energy delivered to subsystems such as that of the gym and the central hall and the six buildings. The total electric consumption was estimated monthly (through bills) and in real time with a 10-minutes step during the year 2015. In the latter, the audit focused on the operation of the building through the analysis of a representative sample (the 2nd floor of building #2). Thereby, additional measurements (indoor air temperature, relative humidity and CO₂ concentrations) were performed in order to validate a building energy model developed on TRNSYS 17 before its use to test various scenarios. The sample HVAC system was also equipped with water and air temperature as well as flow rates sensors.

Moreover, additional measurements on the ventilation system performances were implemented in order to investigate different ventilation strategies as candidates for the air quality improvement. In addition to measurements in the air handling unit for an overall estimation of the whole mechanical ventilation rates, an experimental campaign was conducted to investigate on the local operation/behaviour of the ventilation system (including natural and mixed mode ventilation strategies). The experimental campaign was conducted on one sample office. A methodology based on 3 steps was set: i) auxiliary measurements for the characterization of the experimental conditions i.e. the studied room and indoor and outdoor climate conditions; ii) the measurements of ventilation rates based on tracer gas techniques as described in (Sherman 1990) and according to (ASTM E741 2006) where CO₂ was used as a tracer gas; iii) ventilation effectiveness measurements expressed through age of the air and air exchange efficiency (Sandberg 1981) according to the NORDEST method (NTVVS019 1988). The detailed results on the ventilation system performances will not be presented in the present paper.

Thermal comfort assessment was conducted by combining objective and subjective surveys. The objective assessment consists of the measurement of physical parameters regarding thermal comfort according to (ISO 7726 2002) and (ISO 7730 2002) including air temperature, mean radiant temperature and relative humidity measurements. The subjective assessment was based on questionnaires survey according to (ISO 10551 1995). The thermal comfort assessment includes both short term measurements (offices) and long term assessment in three representative classrooms and seven representative offices.

In addition to the measurements of ages of air held during the ventilation performance assessment, IAQ was assessed using CO₂ concentrations above outdoor as indicator, according to the EN 15251 standard (EN 15251 2007). Two classrooms were monitored continuously during 2 weeks in April and three offices were observed using short measurements (5 min spot measurements).

3. RESULTS AND DISCUSSION

Electricity, gas and thermal energy consumption are presented in Figure 2. Data presented in *Figure 2-a* and *Figure 2-b* are obtained through bills while *Figure 2-c* shows the thermal energy consumption as deduced from measured fluids flow and temperatures in the distribution system. A significant difference can be observed between *Figure 2-a* and *2-b* due to the thermal energy production and distribution system yield.

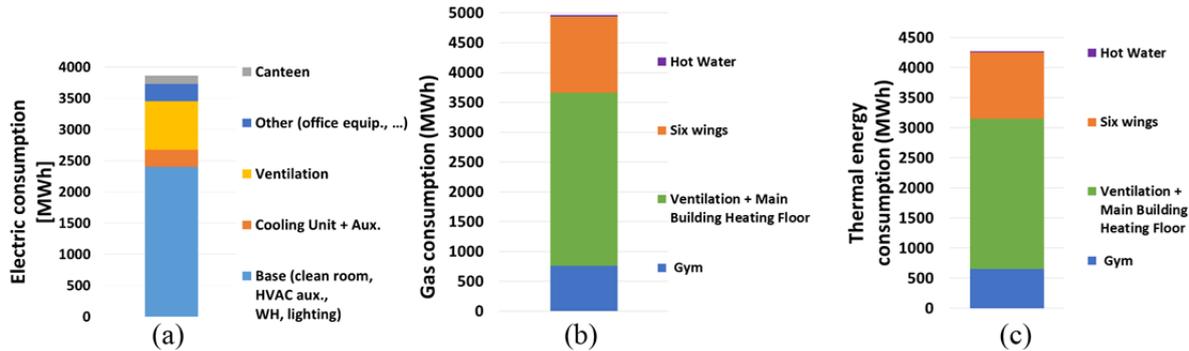


Figure 2 : Annual (a) electricity, (b) gas and (c) thermal energy consumption for each energy consumer of the UC.

The overall annual consumption is of 3860 MWh and 4960 MWh for electricity and gas, respectively. Monthly energy consumption including that of gas and electricity are shown in *Figure 3-a*. For electricity, monthly consumption goes from 145 MWh in Aug 2015 to 429 MWh in Jan-2015.

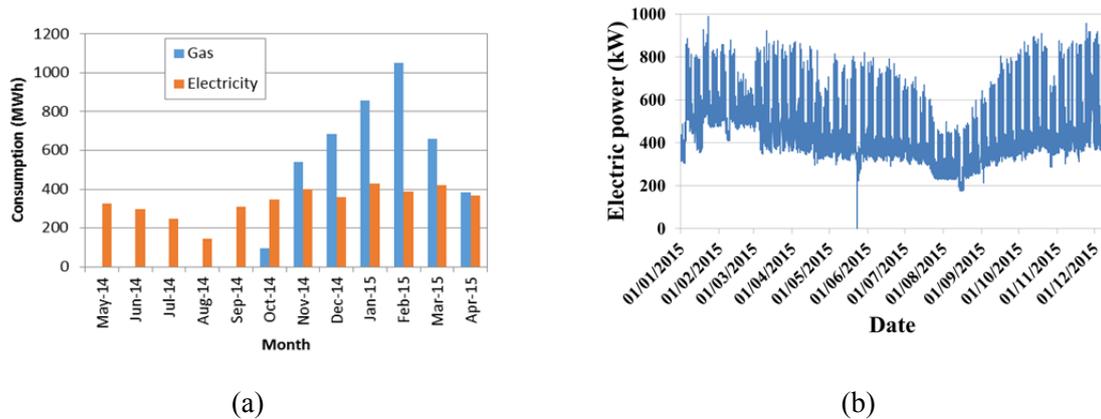


Figure 3 : Total energy consumption from May-2014 to Apr-2015(a) and hourly electric power demand from January 1st, 2015 and December 31st, 2015(b)

A lower consumption can be observed in May, June, July and August (*Figure 3*). This variation highlights the impact of occupation. Nevertheless, note that electricity consumption is not negligible even in August, when the building is completely closed with near zero occupation (*Figure 3-b*). Regarding gas, which is mainly used to provide heating (the sanitary hot water service started on Oct-2014), its consumption varies from 94 MWh in Oct-2014 to 1050 MWh in Feb-2015. This is obviously in agreement with seasonal heating demands.

The heating curves of the six buildings were retrieved through in situ measurements of the heating fluid and the outdoor temperatures (*Figure 4*). Large differences between the different wings can be observed. Recent refurbishment operations are probably the cause of these differences. Indeed, the low

curves correspond to wings which heating floor equipment (substations) were recently renovated. In addition, an inverted heating curve (Figure 5 in green) was measured. The impact of the optimization of these heating curves will be estimated later through the numerical simulations.

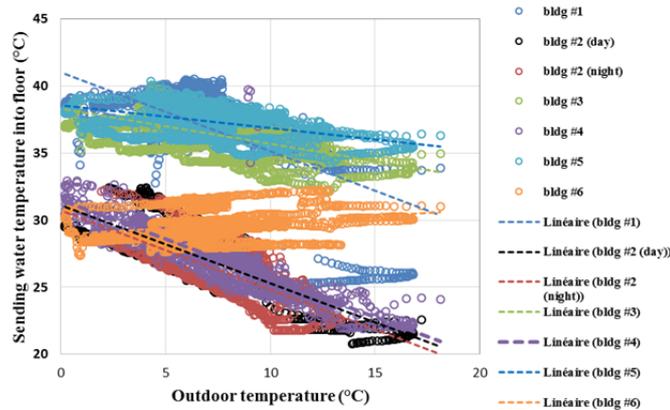


Figure 4: heating curves of the substations of the different buildings (bldg.) of the considered campus.

Figure 5-a presents the gas and electricity consumptions during the 7 months of heating (from Oct 2014 to Apr-2015) as a function of monthly HDD. A clear increase in gas consumption was observed under increasing HDD values. Moreover, the electricity consumption increases with HDD, suggesting longer operating times of auxiliary equipment. We also observe large gas consumption differences for comparable, and large HDD. This can be explained by winter academic holidays in December and February. Occupation is then very low as well as the heating needs. Figure 5-b presents the consumption as a function of daily HDD during the measurement campaign (from Jan-13-2015 to Feb-13-2015) while distinguishing weekdays and weekends. The occupation impact is obvious in electricity consumption where the consumption is lower during weekends. This is not the case for gas consumption.

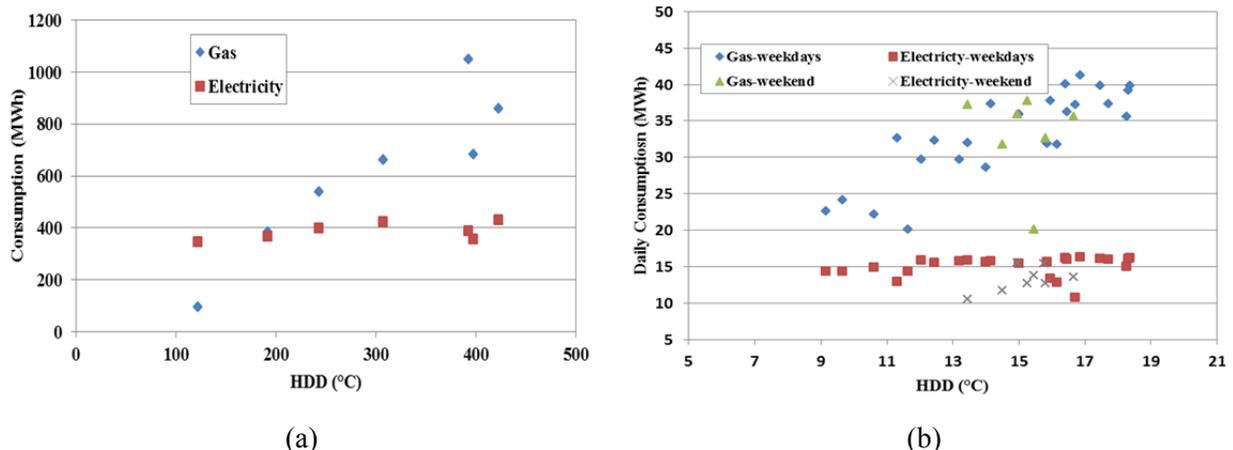


Figure 5 : Monthly (a) and daily (b) Gas and electricity consumption as a function of the Heating Degree Days (HDD) during 2014-2015 heating season (a) and the measurement campaign from Jan-13-2015 to Feb-13-2015 (b), respectively. In the latter, weekdays and weekends are distinguished.

Three thermal comfort surveys were carried out during three periods (winter, mid-season and summer). The adopted methodology simultaneously addresses the comfort and the analysis of practices related to comfort and energy use. A total of 610 questionnaires were collected (158 in offices and 452 in classrooms). Thermal comfort assessment concerned a subjective (thermal sensation

vote, thermal preference vote) and objective (measured parameters) analysis. The results were expressed using the PMV-PPD approach according to ISO7730 standard during winter period (mechanical ventilation) and adaptive thermal approach during the summer period (mixed mode ventilation). During the first campaign (February 2015) the frequency distribution of PMV in the classrooms (*Figure 6*) highlights a significant overheating with more than 25 % of the PMV values over the upper limits of the category III fixed by the EN15251(EN 15251 2007). The overheating is less significant in the offices with less than 5 % over the limits of the category III. During the second campaign (April 2015), the results confirmed the overheating in the classrooms with around 10 % of the estimated PMV values over the upper limits of the category III. The summer comfort analysis (July 2015) carried out on seven offices revealed a discomfort with more than 75 % of the assessed offices in the category IV, according to the method A provided by the EN 15251 (EN 15251 2007).

IAQ of two classrooms was monitored continuously during 2 weeks in April while three offices were assessed using short measurements. As expected, the IAQ was clearly poor in classrooms during occupancy. 86 % of measured ΔCO_2 values (CO_2 rates above outdoor values) during the occupancy were larger than 800 ppm which correspond to the category IV fixed by the EN15251 (EN 15251 2007). The average ΔCO_2 was around 1278 ppm with some peaks around 2400 ppm. In offices, the recorded ΔCO_2 were on average around 500 ppm.

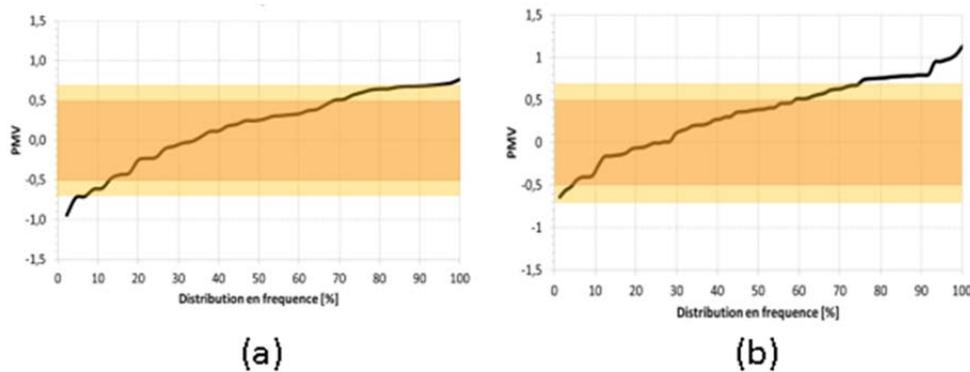


Figure 6 : distribution of PMV for offices (a) and for classrooms (b) for February. The darkest colour represents, according to (EN 15251 2007), the comfort range of PMV for buildings belonging to category II; the brightest colour the range for category III buildings.

The main results of the present study revealed recurrent discomforts both regarding thermal comfort and IAQ. This result, combined to the poor IAQ, can explain the significant presence of energy consuming behaviours such as opening windows (in February, 33 % of offices occupants declare to open the windows quite often and 65 % very often; in April percentages become 43 % and 45 %) and using additional space heaters during the heating season (in February, 10 % of offices occupants declare to use additional heaters quite often and 33 % very often; in April percentages become 21 % and 11 %). These results may suggest some recommendations with respect to the energy systems control, namely a) the use of energy saving mode during holidays and b) the maintain of a comfortable environment during class periods by increasing ventilation rates to ensure IAQ and avoid overheating due to the occupancy. Simultaneously, providing individual controls for each room (this solution presents the risk of a rebound effect in terms of energy consumption) or alternatively a separate control for offices and classrooms may help end users in ensuring acceptable comfort levels while taking into account the large occupancy variations.

The implemented methods during comfort assessment in the present work may be questioned. Bridging the gap between the theory and the practice of an operational and professional audit reveals to be an ambitious goal. The consequence is a difficulty in transposing the indications from international standards to the specific characteristics of the context. To give an example, it was not possible to use the PMV in all situations because the environmental conditions were not stationary, which limits the application of this indicator. The variability of mid-season climate (April) raises the same type of questions.

A numerical model of the case study was implemented under TRNSYS 17 and calibrated according to the experimental data before being used to test various scenarios. The considered scenarios are: (i) the use of heating curves lower than the current ones; (ii) the optimization of the ventilation system scheduling such as its overall functioning duration is reduced while the set point temperature is always reached at 8 A.M; (iii) the implementation of a dynamic control system on the heating floor (iv) In addition to lower heating curves, an additional insulation of the envelope (a seven-mm thick stone wool layer) is considered; (v) a dynamic control system of the heating floor combined with lower heating curves.

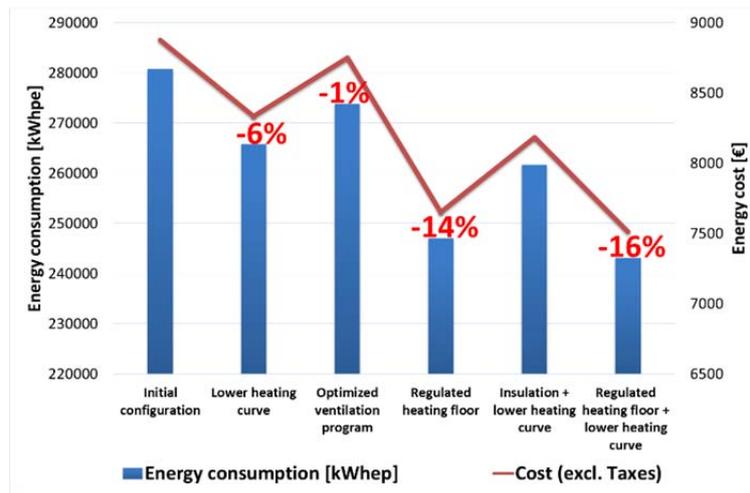


Figure 7: thermal energy consumption and energy cost of each scenario. The energy consumption savings compared to the current building configuration are indicated in red.

The thermal energy consumption and cost of the considered building for each scenario including the original situation are presented in Figure 7 according to an increasing implementation difficulty scale from left to right. It can be observed that a significant reduction in consumption (up to 16%) can be obtained by combining a dynamic control system to the heating floor and the downscaling of the heating curves. Considered independently, the room temperature control system and the heating curve downscaling result in an energy consumption reduction of 14% and 6%, respectively. Consequently, their impacts do not sum up when combined. Finally, it is worth noting that a near zero-cost scenario such as scenario 1 (lower heating curve) can lead to savings as large as 6% of the thermal energy consumption.

4. CONCLUSIONS

An audit methodology, including thermal comfort and indoor air quality assessment as well as the classical characterization of the building energy systems, was implemented in the present case study.

Such a simultaneous processing of these different aspects allows us to overcome the comfort vs energy efficiency dilemma. This methodology helps giving reliable retrofitting recommendations that simultaneously aim at reducing the energy consumption and improving the comfort level. Indeed, in several cases, it paradoxically appears that some phenomena simultaneously induce discomfort and a larger energy consumption. Addressing them by the appropriate recommendation can increase the comfort and reduce the energy consumption at the same time.

5. ACKNOWLEDGEMENTS

Authors would like to thank for their contributions the following Master's students: A. Ralahy, R. Calegari and S. Acoudad as well as P. Picard and B. Dalmais for fruitful discussions and the administration of the case study institution for active collaboration.

6. REFERENCES

- American Society for Testing and Materials International. 2008. "ASTM E 741 Standard Test Method for Determining Air Change in a Single Zone by Means of a." ASTM International Standard 00 (2006): 1–17. doi:10.1520/E0741-11.Copyright.
- Dias Pereira, Luisa, Daniela Raimondo, Stefano Paolo Corgnati, and Manuel Gameiro Da Silva. 2014. "Energy Consumption in Schools - A Review Paper." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 40: 911–22. doi:10.1016/j.rser.2014.08.010.
- El Asmar, Mounir, Abbas Chokor, and Issam Srouf. 2014. "Are Building Occupants Satisfied with Indoor Environmental Quality of Higher Education Facilities?" In *Energy Procedia*, 50:751–60. doi:10.1016/j.egypro.2014.06.093.
- EN 15251. Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics. CEN, European Committee for Standardization; 2007.
- ISO 10551. Ergonomics of the Thermal Environment - Assessment of the Influence of the Thermal Environment Using Subjective Judgement Scales, International Standardization Organization, Geneva, 1995.
- ISO 7726. Ergonomics of the thermal environment - Instruments for measuring physical quantities. Geneva: International Standardization Organization; 2002.
- 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. Geneva: International Standardization Organization; 2005.
- Lee, M. C., K. W. Mui, L. T. Wong, W. Y. Chan, E. W M Lee, and C. T. Cheung. 2012. "Student Learning Performance and Indoor Environmental Quality (IEQ) in Air-Conditioned University Teaching Rooms." *Building and Environment* 49 (1): 238–44. doi:10.1016/j.buildenv.2011.10.001.
- NT vvs 019, Buildings - ventilation air, Local mean age, Nordtest Method, Edition 2, 1988.
- Sandberg, Mats. 1981. "What Is Ventilation Efficiency?" *Building and Environment* 16 (2): 123–35. doi:10.1016/0360-1323(81)90028-7.
- Sherman, M. H. 1990. "Tracer-Gas Techniques for Measuring Ventilation in a Single Zone." *Building and Environment* 25 (4): 365–74. doi:10.1016/0360-1323(90)90010-O.
- Turunen, M, O Toyinbo, T Putus, A Nevalainen, R Shaughnessy, and U Haverinen-Shaughnessy. 2014. "Indoor Environmental Quality in School Buildings, and the Health and Wellbeing of Students." *Int J Hyg Environ Health* 217 (7): 733–39. doi:10.1016/j.ijheh.2014.03.002.
- Wargocki, Pawel and Seppänen, Ole, REHVA Guidebook 6: Indoor climate and productivity in offices, REHVA Guideb. (2006).
- Wargocki, Pawel, and David P. Wyon. 2013. "Providing Better Thermal and Air Quality Conditions in School Classrooms Would Be Cost-Effective." *Building and Environment* 59: 581–89. doi:10.1016/j.buildenv.2012.10.007.
- Wong, L. T., K. W. Mui, and P. S. Hui. 2008. "A Multivariate-Logistic Model for Acceptance of Indoor Environmental Quality (IEQ) in Offices." *Building and Environment* 43 (1): 1–6. doi:10.1016/j.buildenv.2007.01.001.

Etude numérique du comportement hygrothermique d'une paroi en béton de chanvre

Georges Costantine¹, Chadi Maalouf¹, Elias Kinab², Guillaume Polidori¹

¹Laboratoire de Thermomécanique, GRESPI, Faculté des Sciences, Moulin de la Housse, 51100 Reims.

georges.costantine@univ-reims.fr

²Université Libanaise, Faculté de Génie, Branche II, Roumieh, Liban.

RESUME. Dans un contexte de réchauffement climatique associé à un abus de consommation de l'énergie, les réglementations thermiques de nos jours sont de plus en plus sévères. Minimiser la facture énergétique issue du secteur du bâtiment revient à mettre en place des matériaux de construction innovants, tels que les matériaux à base végétale, vu leur effet positif sur les plans thermique et environnemental. De ce fait, le béton de chanvre a connu un grand essor dans les deux dernières décennies, et nombreuses sont les études élaborées à propos de ses propriétés physiques et de son comportement hygrothermique à l'échelle du matériau et de la paroi. On vise, à travers ce travail, l'étude d'une paroi en béton de chanvre, en modélisant les transferts de chaleur et d'humidité. La procédure abordée consiste à valider, par simulation numérique sous le logiciel SPARK, le comportement hygrothermique du béton de chanvre dans une paroi, en tenant compte des effets de l'hystérésis créés par les isothermes de sorption et de désorption relatives à ce matériau.

MOTS-CLÉS: Béton de chanvre, comportement hygrothermique, simulation.

ABSTRACT. In a global warming context associated to the abuse of energy consumption, thermal regulations nowadays have become more severe. Reducing energy costs in the building sector could be achieved by using innovative building materials, such as plant-based materials, due to their positive impacts on the thermal and environmental levels. Therefore, hemp concrete has boomed in the last two decades, and many studies have been developed to determine its physical properties and hygrothermal behavior at the material and wall scales. The aim of this work is to carry out a study of hemp concrete wall, by modeling the heat and moisture transfer. The chosen procedure has to validate, under the SPARK numerical simulation tool, the hygrothermal behavior of the hemp concrete at the wall scale, taking into account the hysteresis effects caused by the sorption and desorption isotherms of this material.

KEYWORDS: Hemp concrete, hygrothermal behavior, simulation.

1. INTRODUCTION

A l'horizon 2020, les nouvelles réglementations thermiques imposent des normes de plus en plus critiques dans le secteur du bâtiment, visant à réduire sa contribution dans le réchauffement climatique et la consommation abusive de l'énergie. Les écoconstructions constituent donc l'une des alternatives les plus efficaces, ce qui a mis en valeur l'utilisation des matériaux bio-sourcés dans les constructions modernes, en particulier le béton de chanvre, qui a réussi à prouver, via les études réalisées à l'échelle du matériau et de la paroi ((Collet 2004), (Cerezo 2005), (Elfordy et al. 2008)), son rôle efficace en tant que bon amortisseur de température et excellent régulateur de l'humidité de l'air avoisinant.

En premier lieu, on s'intéresse dans ce papier à valider, par le biais de la simulation numérique sur SPARK (Tran Le 2010), les résultats des mesures de la capacité tampon hydrique du matériau (Lelievre

et al. 2014), menées suivant le protocole NORDTEST (Rode Pedersen 2005), puis en second plan, à valider le comportement hygrothermique d'une paroi en béton de chanvre soumise à des conditions réelles de température et d'humidité (Lelievre et al. 2014), tout en mettant l'accent sur l'importance de prendre en considération les effets de l'hystérésis du béton de chanvre sur les transferts hydriques et thermiques à travers la paroi étudiée.

2. ETUDE NUMERIQUE

2.1. MODELES DE TRANSFERTS HYGROTHERMIQUES DANS UNE PAROI SIMPLE

Les modèles complets de transfert de chaleur et d'humidité sont étudiés dans plusieurs travaux de recherche : Künzle (Künzle Hartwig 1995) a développé un modèle dans lequel le transfert d'humidité en phase liquide est dû au gradient de l'humidité relative et où la diffusion de vapeur est gouvernée par le gradient de la pression partielle de vapeur. Seul l'effet de changement de phase est pris en compte ; en 1999, Mendes et al. (Mendes et al. 1999) ont travaillé sur un modèle en se basant sur la théorie de Philip et De Vries (Philip & De Vries 1957), avec des hypothèses semblables à celles de Künzle, mais cette fois, l'effet du gradient de température sur le transport de l'humidité y est inclu ; le modèle d'Ozaki et al. (Ozaki et al. 2001) prend en compte les transferts d'humidité sous les deux phases liquide et vapeur ainsi que la chaleur générée liée au dégagement de phase par le processus de sorption de l'humidité.

2.2. MODELE NUMERIQUE DE L'ARTICLE

Dans cet article, on utilise le modèle d'Umidus (Mendes et al. 1999) pour décrire les mécanismes de transport de l'humidité au sein du béton de chanvre qui ont lieu sous les formes liquides et vapeur. Ainsi, l'équation de conservation de la masse sera :

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_T \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(D_\theta \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) \quad (1)$$

Avec les conditions aux limites suivantes ($x = 0$ and $x = L$) :

$$-\rho_l \left(D_T \frac{\partial T}{\partial x} + D_\theta \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) \Big|_{x=0,e} = h_{M,e} (\rho_{v,a,e} - \rho_{v,s,e}) \quad (2)$$

$$-\rho_l \left(D_T \frac{\partial T}{\partial x} + D_\theta \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) \Big|_{x=L,i} = h_{M,i} (\rho_{v,s,i} - \rho_{v,a,i}) \quad (3)$$

Tels que $D_T = D_{Tl} + D_{Tv}$ et $D_\theta = D_{\theta l} + D_{\theta v}$, où D_{Tl} est le coefficient de transport liquide associé à un gradient de température, D_{Tv} est le coefficient de transport vapeur associé à un gradient de température, $D_{\theta l}$ est le coefficient de transport liquide associé à un gradient d'humidité, $D_{\theta v}$ est le coefficient de transport vapeur associé à un gradient d'humidité, D_T , est le coefficient de transport de masse associé à un gradient de température et D_θ , le coefficient de transport de masse associé à un gradient d'humidité.

D_θ est donné par :

$$D_\theta = \frac{\delta_a P_{vs}}{\mu \rho_0 \xi} \quad (4)$$

Le coefficient de transport de vapeur sous gradient de température est donné par la relation :

$$D_{T,v} = \phi \frac{\delta_a dP_{vs}}{\rho_l \mu dT} \quad (5)$$

L'équation de conservation de l'énergie prend en considération la chaleur due aux phénomènes d'adsorption et de désorption comme suit :

$$\rho C p_m \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda(T, \theta) \frac{\partial T}{\partial x} \right) + L_v \rho_l \left(\frac{\partial}{\partial x} \left(D_{T,v} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(D_{\theta,v} \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) \right) \quad (6)$$

$$Cp_m = Cp_0 + Cp_l \frac{\rho_l}{\rho_\theta} \quad (7)$$

Cp_m est la capacité spécifique moyenne qui prend en considération la capacité thermique du matériau sec et la contribution de la capacité thermique de la phase liquide. λ est la conductivité thermique du matériau. L'expression de $D_{\theta,v}$ est regroupée sous celle de λ , et l'ensemble aboutit à la conductivité thermique apparente du matériau (celle montrée dans le tableau 1 où T est en Kelvin et w est l'humidité absolue en kg/kg).

Les conditions aux limites comprennent les échanges radiatifs, ainsi que la chaleur libérée par changement de phase :

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0,e} - L_v \rho_l \left(D_{T,v} \frac{\partial T}{\partial x} + D_{\theta,v} \frac{\partial T}{\partial x} \right) \Big|_{x=0,e} = h_{T,e} (T_{a,e} - T_{s,e}) + L_v h_{M,e} (\rho_{ve,a,e} - \rho_{ve,s,e}) + \Phi_{ray,e} \quad (8)$$

2.3. MODELISATION DU PHENOMENE D'HYSTERESIS

Dans cette partie, on va utiliser le modèle proposé par Merakeb et al. (Merakeb et al. 2009b) pour modéliser le phénomène d'hystérésis dans le bois et on va l'adapter pour le cas du béton de chanvre. En effet, ce modèle étudie la thermodynamique de l'équilibre de phase de l'eau avec sa pression de vapeur saturante : l'adsorption et la désorption de l'eau liée correspondent respectivement à la vaporisation et la condensation de l'eau libre. L'équilibre monovalent de l'eau liquide avec sa pression de vapeur est exprimé par :

$$\Delta H_s = R.T \ln(\varphi) + H_s \quad (9)$$

H_s et ΔH_s sont respectivement l'enthalpie de référence et l'enthalpie molaire. Lorsque l'adsorption se fait, l'eau libre passe d'un état d'énergie à un état plus bas caractérisé par la chaleur dégagée ΔH_s :

$$\Delta H_s = A. \ln\left(\frac{u}{u_s}\right) \quad (10)$$

Où u_s est la teneur maximale en eau (kg/kg) pour une température fixée, et A une constante.

A partir des équations (9) et (10), nous obtenons :

$$\ln\left(\frac{u}{u_s}\right) = a. \ln(\varphi). \exp(b. \varphi) \quad (11)$$

a étant un paramètre thermodynamique et b une constante de calibration.

Afin de décrire les courbes de sorption sur n'importe quelle plage d'humidité relative, il est nécessaire d'ajouter un terme de raccord (Merakeb et al. 2009a) entre les isothermes d'adsorption et de désorption :

$$\ln\left(\frac{u}{u_s}\right) = a. \ln(\varphi). \exp(b. \varphi) + \Delta a. \ln(\varphi). \exp(\Delta b. \varphi) \quad (12)$$

Δa et Δb sont définis selon les phases d'adsorption (s) et de désorption (d). Soit $(\varphi_0 ; u_0)$ l'état correspondant au point d'équilibre lors d'une inversion de sens de variation de φ , on aura :

$$\Delta a_s = \frac{\ln\left(\frac{u_0}{u_s}\right) - a_s \times \ln(\varphi_0) \times \exp(b. \varphi_0)}{\ln(\varphi_0) \times \exp(\Delta b_s. \varphi_0)} \quad (13)$$

$$\Delta b_s \times \varphi_0 = \ln\left(\frac{u_0}{u_s}\right) - a_s \times \ln(\varphi_0) \quad (14)$$

$$\Delta a_d = \frac{\ln\left(\frac{u_0}{u_s}\right) - a_d \times \ln(\varphi_0) \times \exp(b. \varphi_0)}{\ln(\varphi_0) \times \exp(\Delta b_d. \varphi_0)} \quad (15)$$

$$\Delta b_d \times \varphi_0 = \ln \frac{\ln\left(\frac{u_{0d}-u_{0s}}{u_s}\right)}{a_d \times \ln \varphi_0} \quad (16)$$

Un coefficient de correction est appliqué sur ces équations afin de les adapter au béton de chanvre en se basant sur les travaux de Lelievre 2015.

2.4. ENVIRONNEMENT DE SIMULATION

Nous précisons que dans son travail, Lelievre s’est servi du logiciel COMSOL, alors que les équations différentielles et linéaires de notre modèle sont implémentées sous l’environnement de simulation SPARK (Simulation Problem Analysis and Research Kernel). SPARK résoud ce système d’équations par la méthode des différences finies.

3. VALIDATION

En se basant sur les données de la littérature (Lelievre et al. 2014) (Lelievre 2015), on a :

Propriétés	Densité (kg/m ³)	Capacité thermique (J.kg ⁻¹ .K ⁻¹)	Emissivité	Conductivité (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)
Béton de chanvre	$\rho = 450 \pm 20$	$C_p = 1000$	$\varepsilon = 0,8$	$\lambda = 0,00818 + 2,76 \times 10^{-4}T + 0,0024w$

Tableau 1 : Propriétés du béton de chanvre

Dans une première partie, on vise à valider les propriétés hydriques du béton de chanvre à l’échelle du matériau obtenues par Lelievre dans ses expériences sur une paroi en béton de chanvre d’épaisseur $e = 10$ cm et suivant les conditions du protocole « Nordtest ». On suit les variations de température et d’humidité au sein de la paroi ($x = 14$ mm et $x = 50$ mm) suite à des thermocouples K et des capteurs d’humidité plantés aux endroits d’investigation. Ensuite, dans une seconde partie, on validera le comportement hygrothermique du béton de chanvre (figure (1)) lorsqu’il est soumis à des conditions réelles de température et d’humidité (figure (2)).

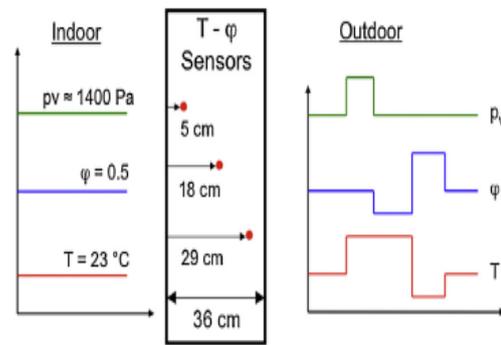


Figure (1): schématisation de l’expérience réalisée par Lelievre

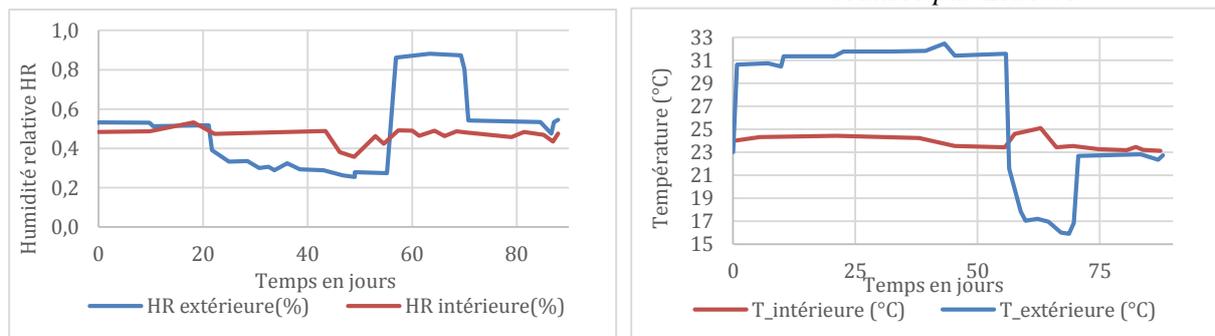


Figure (2) : Variations des conditions expérimentales de température et d’humidité

Dans ce cadre, on s'intéresse à suivre les résultats à 3 positions différentes suivant l'épaisseur de la paroi considérée : à 5cm, à 18cm et à 29cm (voir figure 1).

4. RESULTATS

4.1. VALIDATION DU POTENTIEL HYDRIQUE DU BETON DE CHANVRE

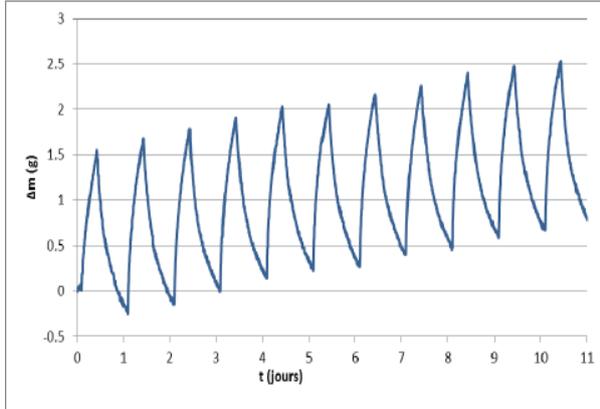


Figure (3-a) : Variations expérimentales de la masse de l'échantillon

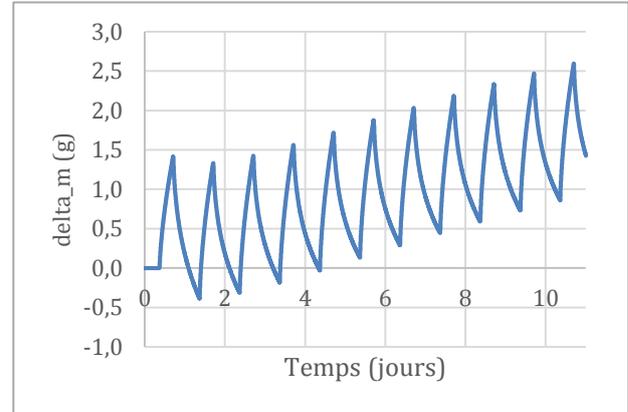


Figure (3-b) : Variations de la masse de l'échantillon par la simulation

SPARK fournit les variations de la masse de la paroi sur laquelle on travaille représentées dans la figure (3-b). Au bout de 11 cycles, son évolution présente des résultats conformes à ceux obtenus expérimentalement par Lelievre dans son travail de thèse. Passons maintenant aux évolutions des résultats au sein du matériau. Les figures (4-a/4-b) montrent la comparaison entre les températures mesurées par Lelievre dans sa thèse et celles obtenues par la simulation numérique. On s'intéresse à deux endroits différents de la pièce : à $x=14$ mm, et $x=50$ mm.

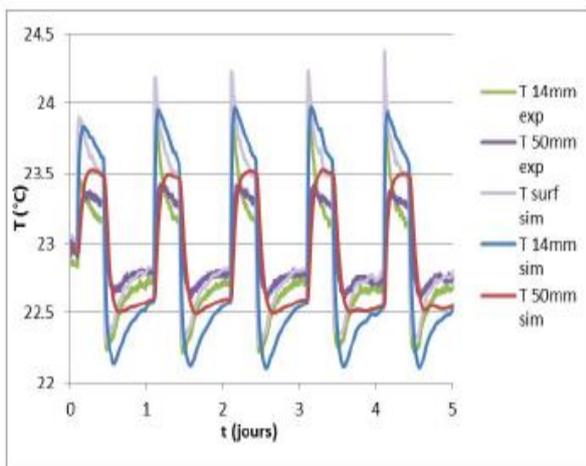


Figure (4-a) : Températures simulées et mesurées (données de Lelievre)

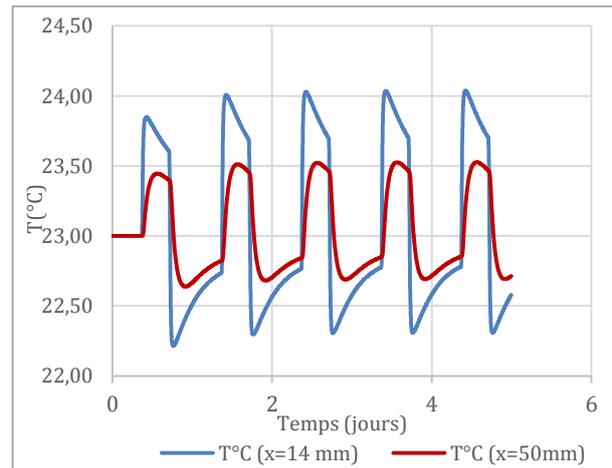


Figure (4-b) : Températures simulées (SPARK)

On constate que les résultats de la simulation valident d'un côté les valeurs mesurées expérimentalement, et d'un autre côté les résultats de simulation obtenus par Lelievre. D'ailleurs, on

représente ci-dessous une comparaison des résultats des humidités relatives mesurées et simulées (figures (5-a) et (5-b)).

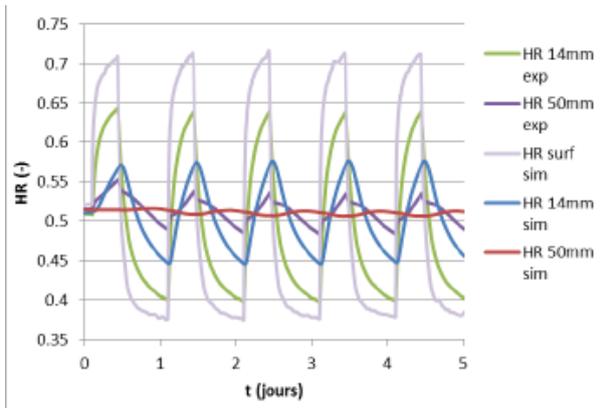


Figure (5-a) : Humidités relatives simulées et mesurées (données de Lelievre)

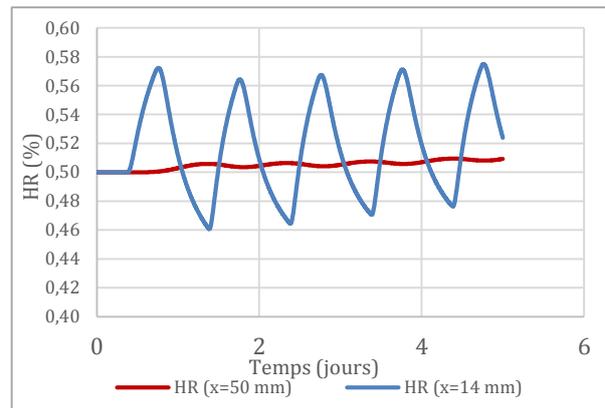


Figure (5-b) : Humidités relatives simulées (SPARK)

Nos résultats valident ceux que la simulation donne par le modèle numérique de Lelievre développé dans sa thèse, mais restent écartés des valeurs expérimentales qu'il a fournies. Et si on essaie de tracer la variation de la teneur volumique en humidité θ en fonction de l'humidité relative, on obtient la figure (6) ci-dessous, conformément au résultat obtenu dans l'article de Lelievre et al. (Lelievre et al. 2014).

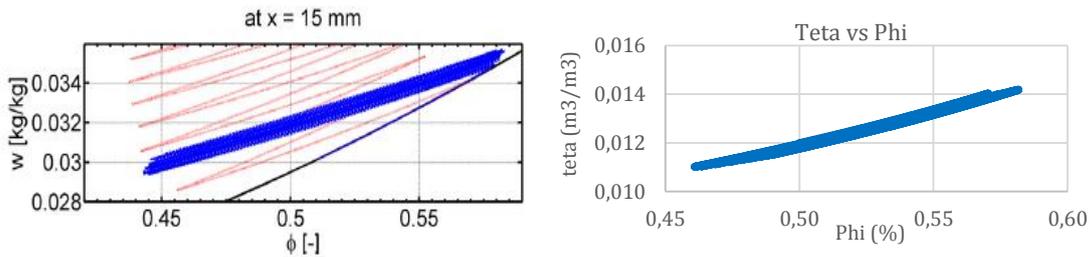


Figure (6) : Variations de la teneur volumique d'humidité en fonction de l'humidité relative à $x=15$ mm selon Lelievre (gauche) et d'après SPARK (droite)

4.2. VALIDATION DES ESSAIS SOUS CONDITIONS REELLES

Tout d'abord, on représente les résultats issus de la simulation de la paroi en béton de chanvre

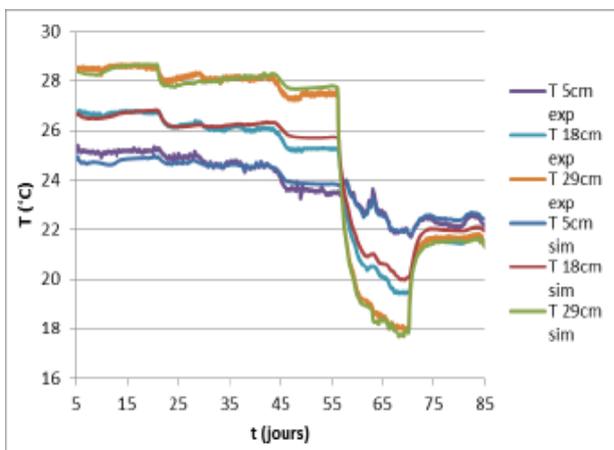


Figure (7-a) : Températures simulées et mesurées (données de Lelievre)

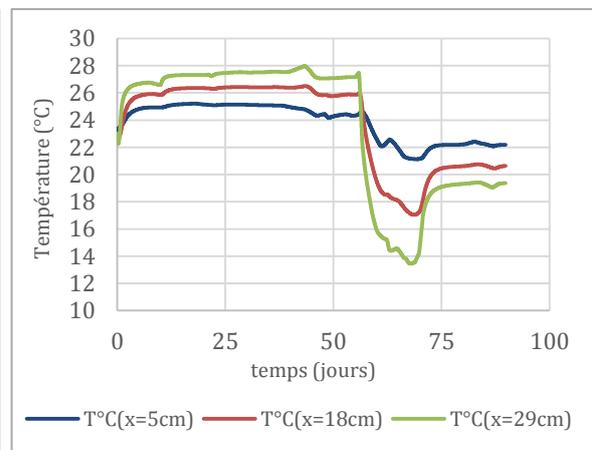


Figure (7-b) : Températures simulées (SPARK)

d'épaisseur 36 cm sous des conditions réelles de température et d'humidité, mais sans prendre en compte le phénomène d'hystérésis dans le béton de chanvre (figures (7) et (8)).

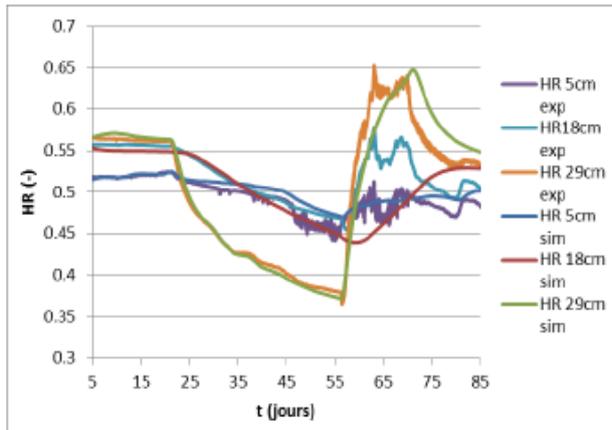


Figure (8-a) : Humidités relatives simulées et mesurées (données de Lelievre)

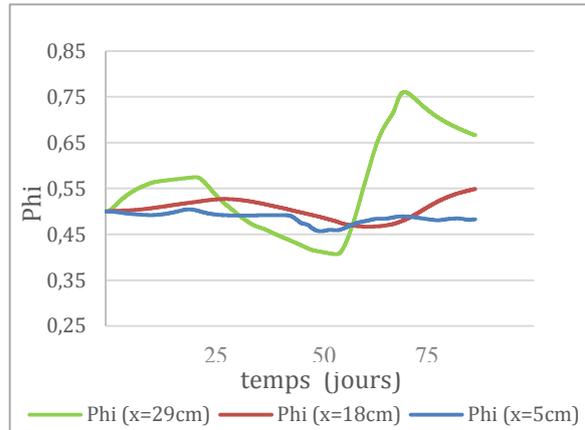


Figure (8-b) : Humidités relatives simulées (SPARK)

On note tout d'abord que dans le cas sans hystérésis, on travaille sur la courbe moyenne entre les courbes d'adsorption et de désorption. On voit que, sans hystérésis, on n'arrive pas à bien modéliser les transferts hygrothermiques au sein de la paroi : l'humidité relative dépasse 75% en $x=29$ cm, et la température du côté extérieur présente des altérations au bout du 55^{ème} jour, sachant que la température du côté intérieur est bien compatible avec les résultats de Lelievre (expérimentaux et simulés).

On passe maintenant au cas où l'hystérésis est prise en compte dans les simulations :

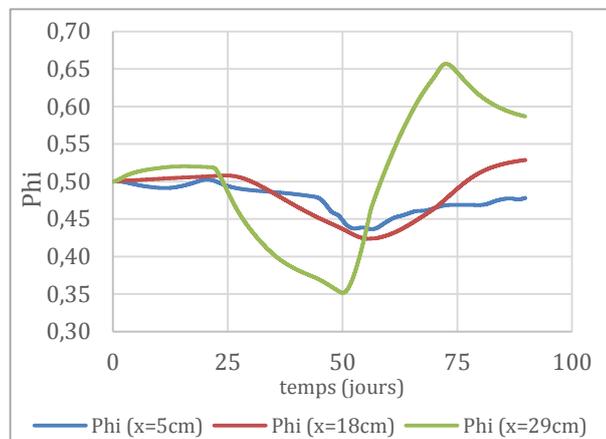


Figure (9) : Humidités relatives simulées avec hystérésis (SPARK)

Avec hystérésis, on constate que la modélisation de Phi en $x=29$ cm est bien en accord avec l'expérience et la simulation de Lelievre, l'humidité relative en $x=18$ cm coïncide avec celle obtenue dans les simulations de Lelievre (mais écartée de l'allure expérimentale) et celle en $x=5$ cm traduit bien les résultats déjà obtenus.

5. CONCLUSION

Les écoconstructions de nos jours requièrent la mise en œuvre de nouveaux matériaux bio-sourcés comme le béton de chanvre à des fins écologiques et environnementales cruciales. Nous avons cherché dans ce papier à valider le comportement hygrothermique du béton de chanvre au sein de cette paroi suite aux travaux de D. Lelievre et ceci dans le but de bien valoriser son rôle en tant que bon régulateur de température et d'humidité. Les transferts de chaleur et d'humidité dans les essais suivant le NordTest Protocole ont été bien validés par le modèle numérique qu'on a proposé dans une première partie ; Les essais menés sous des conditions réelles de température et d'humidité ont donné des résultats plus conformes à l'expérience avec la prise en compte de l'effet de l'hystérésis dans la modélisation, et surtout les courbes d'humidités relatives. Ce résultat pourrait être amélioré en prenant en considération la variation de l'hystérésis en fonction de la température, qui sera l'objet de futures investigations et recherches.

6. BIBLIOGRAPHIE

- Cerezo, V., 2005. *Propriétés mécaniques, thermiques et acoustiques d'un matériau à base de particules végétales : approche expérimentale et modélisation théorique*. Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat.
- Collet, F., 2004. *Caractérisation hydrique et thermique de matériaux de génie civil à faibles impacts environnementaux*. Institut National des Sciences Appliquées de Rennes.
- Elfordy, S. et al., 2008. Mechanical and thermal properties of lime and hemp concrete ("hemcrete") manufactured by a projection process. *Construction and Building Materials*, 22(10), pp.2116–2123.
- Künzel Hartwig, M., 1995. *Simultaneous Heat and Moisture Transport in Building Components: One and two dimensional calculation using simple parameters*, Stuttgart.
- Lelievre, D., 2015. *Simulation numérique des transferts de chaleur et d'humidité dans une paroi multicouche de bâtiment en matériaux biosourcés*. Université Bretagne-Sud.
- Lelievre, D., Colinart, T. & Glouannec, P., 2014. Hygrothermal behavior of bio-based building materials including hysteresis effects: Experimental and numerical analyses. *Energy and Buildings*, 84, pp.617–627.
- Mendes, N. et al., 1999. Umidus: a PC Program For The Prediction Of Heat And Mass Transfer In Porous Building Elements. In Kyoto: International Conference on Building Performance Simulation (IPBSA 1999).
- Merakeb, S., Dubois, F. & Petit, C., 2009a. Modeling of the sorption hysteresis for wood. *Wood Science and Technology*, 43(7-8), pp.575–589.
- Merakeb, S., Dubois, F. & Petit, C., 2009b. Modélisation des hystérésis de sorption dans les matériaux hygroscopiques. *Comptes Rendus Mécanique*, 337(1), pp.34–39.
- Ozaki, A. et al., 2001. Systematic analysis on combined heat and water transfer through porous materials based on thermodynamic energy. *Energy and Buildings*, 33(4), pp.341–350.
- Philip, J.R. & De Vries, D.A., 1957. Moisture movement in porous materials under temperature gradients. *Transactions, American Geophysical Union*, 38(2), p.222.
- Rode Pedersen, C., 2005. *Moisture buffering of Building Materials*, Denmark.
- Tran Le, A.D., 2010. *Etude des transferts hygrothermiques dans le béton de chanvre et leur application au bâtiment*. Université de Reims-Champagne-Ardenne.

BuildSysPro : une bibliothèque Modelica open-source pour l'énergétique des bâtiments et des quartiers

Mathieu Schumann, Benoit Charrier, Gilles Plessis, Bénédicte Wall-Ribot

EDF R&D – EnerBaT

Site des Renardières, 77818 Moret sur Loing CEDEX, France

mathieu.schumann@edf.fr, benoit.charrier@edf.fr, gilles.plessis@edf.fr, benedicte.wall-ribot@edf.fr

RESUME. Cette publication présente la bibliothèque Modelica BuildSysPro Open Source, son contenu, ses applications, ainsi que son positionnement vis-à-vis des travaux de l'Annexe 60 de l'AIE. BuildSysPro est développée par le département EnerBaT (Energie dans les Bâtiments et les Territoires) d'EDF R&D depuis 2009. Son placement en open source est effectif depuis février 2016. L'objectif est de favoriser l'usage de Modelica et les coopérations de recherche dans la communauté de la simulation énergétique du bâtiment. Multi-physiques par le biais de Modelica, BuildSysPro est également conçue pour être multi-métiers (recherche amont en physique du bâtiment, évaluation de performances globales, développement technologique...) et multi-échelles (du composant de paroi à l'échelle du quartier). Ces aspects sont appuyés par la présentation de cas de validation et d'étude.

MOTS-CLÉS : BuildSysPro, bibliothèque Modelica, open-source, bâtiment, simulation thermique dynamique

ABSTRACT. This paper presents the BuildSysPro Open Source Modelica library, its content, use cases, as well as its position with respect to IEA EBC Annex 60. BuildSysPro is developed by EDF R&D EnerBaT Dpt. (Energy in Buildings and Territories) since 2009. The first open source version was released February 2016. The aim is to promote the use of Modelica, and boost research cooperation in the building energy simulation community. With a multi-physics approach thanks to Modelica, BuildSysPro is designed to be used in several contexts including upstream research in building physics, global performance assessment or technology development. BuildSysPro is also multi-scale and a basis for urban and building stock simulation. BuildSysPro's features are illustrated with further validation and use cases.

KEYWORDS: BuildSysPro, Modelica library, open source, building, energy dynamical simulation

1. INTRODUCTION

Le secteur du bâtiment est un important consommateur d'énergie, et l'évolution des réglementations thermiques a conduit à des améliorations importantes de la performance des bâtiments neufs et rénovés. Ces évolutions dans les performances du bâti, des systèmes et de leur régulation posent toutefois de nombreuses questions sur la capacité de ces bâtiments à assurer conjointement une baisse de la consommation d'énergie et le confort et la santé des occupants. Par ailleurs, le bâtiment est désormais un composant actif au sein du système énergétique global via la production locale, le stockage d'énergie ou les stratégies d'effacement.

L'étude de ces problématiques se base fortement sur des représentations multi-physiques des phénomènes, incluant la thermique, l'électricité, l'hydraulique ou les process. Le langage de modélisation équationnel et orienté objet Modelica est bien adapté à l'étude de ces problématiques

couplées et des systèmes complexes. Un certain nombre de bibliothèque Modelica open source pour l'énergétique des bâtiments existent, parmi lesquelles *Buildings*, *IDEAS*, *AixLib* et *BuildingSystems*, avec souvent un fort positionnement académique et des objectifs propres.

Le département EnerBaT (Énergie dans les Bâtiments et les Territoires) d'EDF R&D développe la bibliothèque Modelica *BuildSysPro*, dédiée à la modélisation et la simulation dynamique des bâtiments, avec une vision multi-domaines, multi-échelle et multi-métiers. Le choix de réaliser une nouvelle librairie Modelica plutôt que d'utiliser l'existant a été dicté par les besoins de recherche spécifiques aux activités d'EDF, ainsi que par la multiplicité des profils des utilisateurs de la bibliothèque. Sous-tendus par les quatre grands leviers d'action de l'efficacité énergétique des bâtiments (réduction des besoins, performance des systèmes, pilotage et valorisation des énergies locales), les domaines d'application de *BuildSysPro* sont multiples : recherche théorique en physique du bâtiment, prospective énergétique, conception et dimensionnement d'équipements innovants ou encore développement d'outils opérationnels pour les directions métiers d'EDF.

Depuis février 2016, EDF met à disposition de la communauté de la simulation énergétique des bâtiments la bibliothèque *BuildSysPro Open Source*, issue des travaux de recherche scientifique et industrielle d'EDF. À ce titre, sont inclus dans *BuildSysPro Open Source* les modèles dédiés à la recherche théorique et appliquée et suffisamment stabilisés pour une utilisation en production.

Les objectifs de ce placement en open source sont multiples : favoriser la collaboration et la transparence des outils dans le cadre des projets de recherche, fédérer une communauté, réaliser des développements mutualisés. Ceux-ci sont depuis longtemps le choix d'EDF dans d'autres domaines (mécanique des fluides, mécanique des milieux solides), afin d'enrichir les outils de modélisation disponibles au service de la recherche. EDF souhaite également par ce biais donner un élan pour améliorer les outils open source tels qu'OpenModelica.

Enfin, s'appuyer sur le langage Modelica permet de faciliter les échanges en s'intégrant plus fortement dans le processus de partage de l'Annexe 60 de l'AIE et dans l'écosystème des bibliothèques Modelica existantes.

2. VUE D'ENSEMBLE ET CONTENU DE BUILDSYSPRO OPEN SOURCE

Les principes de modélisation de l'enveloppe du bâtiment et des systèmes de *BuildSysPro* sont explicités dans (Plessis et al. 2014). Ainsi, seuls les points clefs et nouveautés sont synthétisés ici.

La Figure 1 détaille l'arborescence de la bibliothèque. Cette structure est similaire à l'organisation du package *Thermal* de la Bibliothèque Standard Modelica : la bibliothèque est formée de packages métiers, et structurée par des packages classiques *Examples*, *Interfaces*, *Components*, et *Utilities* à différents niveaux hiérarchiques. Les modèles et leur documentation sont en langue anglaise.

Afin de faciliter la compréhension et l'usage de la bibliothèque, sa structure reflète une priorité donnée à l'utilisateur final : les modèles les plus directement utilisables se situent en haut de l'arborescence, tandis que les modèles élémentaires sont regroupés en bas dans un package *BaseClasses*.

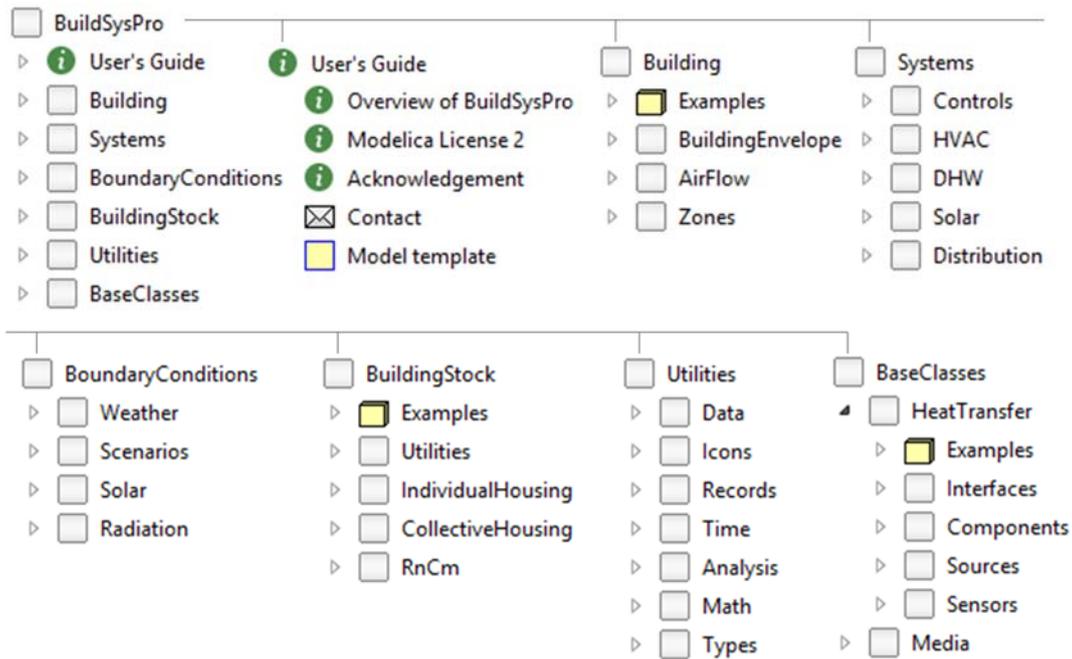


Figure 1 : Arborescence principale et sous-packages de BuildSysPro Open Source

Le package *User's Guide* contient une vue d'ensemble de la bibliothèque et sa licence.

Le package *Building* est composé de modèles d'enveloppe du bâtiment et de renouvellement d'air selon une approche thermique ou thermo-fluide. Il contient également des modèles de zones thermiques génériques. Un modèle de zone thermique typique est constitué par assemblage, manuel ou automatique, de parois opaques ou vitrées, nœud d'air et renouvellement d'air, comme illustré sur la Figure 2.

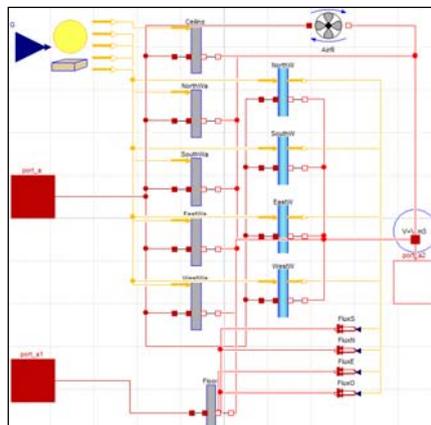


Figure 2 : Diagramme d'une zone thermique simple

Le package *Systems* est composé de modèles pour la simulation des systèmes de chauffage, ventilation et climatisation, eau chaude sanitaire et des systèmes solaires thermiques et électriques. Le sous-package *Controls* inclut des modèles pour la régulation des équipements. Le niveau de détails des modèles de systèmes énergétiques doit être choisi avec précaution en fonction de l'objectif et des contraintes de l'étude (consommation annuelle, courbe de charge horaire, contrôle infra-horaire...).

Le package *BoundaryConditions* contient différents types de modèles pour la lecture, l'interpolation et le pré-traitement de fichiers de données servant de conditions aux limites pour la simulation, tels que des données météorologiques ou des scénarios réglementaires de présence d'occupants. Il inclut également des modèles de casquettes et masques solaires pour moduler les conditions limites solaires.

Le package *BuildingStock* est une base de donnée de bâtiments de référence pré-assemblés issus de typologies ou de bâtiments réels, tels que la maison individuelle Mozart. Une bibliothèque de modèle RC est également en développement pour traiter l'échelle du quartier ou de la ville avec des temps de calculs raisonnables vis-à-vis de l'objectif de l'étude.

Le package *Utilities* inclut des types Modelica particuliers, icônes, fonctions, blocs élémentaires composant la bibliothèque, ainsi que les *records* (tableaux de données). Ces *records* sont utilisés pour paramétrer les modèles de manière hiérarchique (matériau, couches, murs, zones, bâtiment). Le sous-package *Analysis* contient des modèles pour l'analyse en simulation, comme par exemple l'estimation du confort thermique dans l'habitat ou le calcul d'une consommation par intégration.

Enfin, le package *BaseClasses* contient les modèles décrivant les phénomènes physiques et composants élémentaires de la thermique du bâtiment (échanges thermiques, matériau discrétisé, ...). Les connecteurs thermiques sont ceux du package *Modelica.HeatTransfer* de la bibliothèque standard Modelica. Ils sont copiés dans BuildSysPro afin de maîtriser l'impact d'éventuelles évolutions de la bibliothèque standard Modelica. L'objectif est cependant bien d'être aligné sur celle-ci afin de faciliter et favoriser les échanges avec les autres bibliothèques existantes.

L'Annexe 60 de l'AIE a vu naître la bibliothèque Modelica *Annex60*, qui vise à apporter une convergence des différentes bibliothèques Modelica traitant de l'énergétique des bâtiments, en particulier sur la modélisation des fluides par le concept des *Stream* (Wetter et al. 2015). L'intégration des modèles de la bibliothèque *Annex60* est un objectif de BuildSysPro Open Source afin de s'intégrer pleinement dans ces travaux communs. Toutefois l'utilisation des *Stream* ne s'adapte pas nécessairement à toutes les situations rencontrées en énergétique des bâtiments, ainsi plusieurs niveaux de modélisations fluides pourront cohabiter dans BuildSysPro Open Source en fonction de l'objectif de la simulation (performance des systèmes à air, qualité d'air intérieur et modélisation du transport des polluants...).

3. DEMARCHE DE VALIDATION DES MODELES DE BUILDSYSPRO OPEN SOURCE

Les modèles élémentaires de la bibliothèque (conduction, transmission des vitrages) ont été validés par comparaison à l'outil de recherche en énergétique des bâtiments CLIM2000 (Murphy et Deque 1997). CLIM2000 est lui-même validé à partir de mesures expérimentales sur la plate-forme ETNA d'EDF Lab Les Renardières, confortées par des tests comparatifs tels que les IEA BESTEST, une procédure de benchmark établie à partir d'outils de simulation de référence (Judkoff et Neymark 2006).

La procédure BESTEST est bien adaptée à l'intercomparaison d'outils de simulation thermique dynamique et a déjà été exploitée pour la qualification de bibliothèques Modelica (Nouidui et al. 2012). L'ensemble des cas tests décrits dans (Judkoff et Neymark 1995) a été passé avec BuildSysPro, qui obtient des résultats comparables aux outils de référence (Plessis et al. 2014).

Plusieurs laboratoires d'EDF Lab Les Renardières servent aujourd'hui à la validation des modèles de BuildSysPro open source : BESTLab (enveloppe, systèmes intégrés bâti) (Bontemps et al. 2013), PV Zen et PV Lab (photovoltaïque), ConceptGrid (modèles électriques), la Maison Multi-Énergie (bâtiment) et le Climatron (systèmes énergétiques). L'état de validation des modèles est une section exigée du *template* de documentation des modèles BuildSysPro Open Source.

4. CAS D'APPLICATION

4.1. INTERACTIONS BATI-SYSTEMES

La modélisation des bâtiments utilisée dans BuildSysPro open source est similaire à l'approche traditionnelle de la simulation énergétique des bâtiments. Enveloppe et systèmes peuvent être simulés de manière séparée comme des consommateurs et producteurs d'énergie, mais peuvent également être simulés conjointement en boucle fermée, ce qui permet également de rendre compte plus finement des leurs interactions.

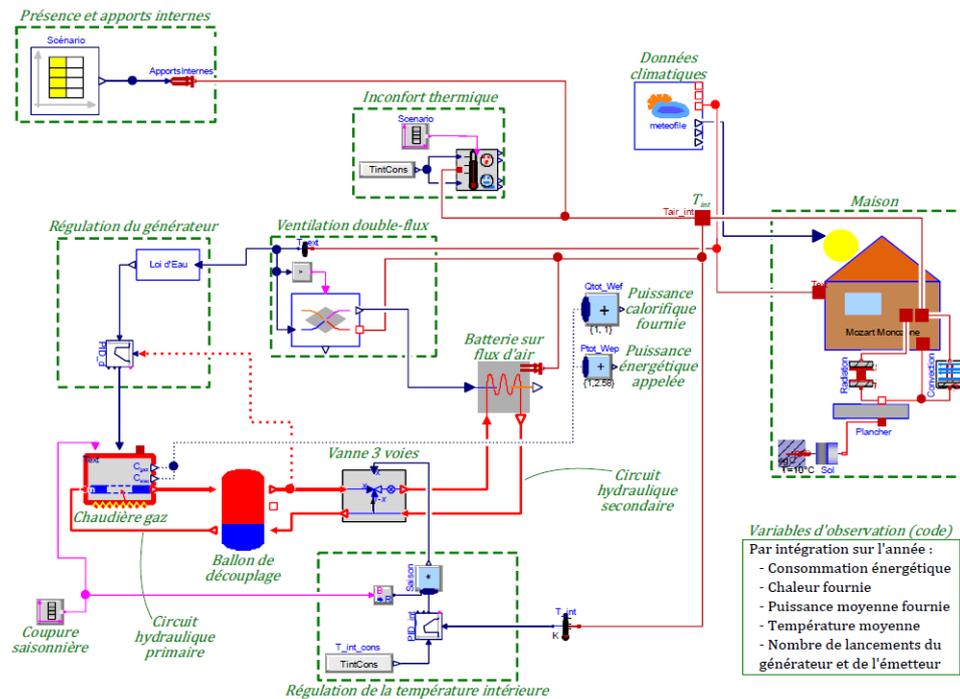


Figure 3 : Assemblage complet de bâtiment avec couplage bâti-système via un plancher chauffant

À l'aide d'assemblages de modèles de *BuildSysPro* et *Buildings*, (Blervaque 2014) montre par une telle modélisation que la prise en compte des interactions entre le bâti et les systèmes énergétiques est nécessaire pour une évaluation correcte des puissances appelées dans les bâtiments BBC. Une modélisation dynamique précise permet de corriger un mauvais dimensionnement des systèmes énergétiques du bâtiment issus de procédures normatives non adaptées aux bâtiments BBC.

4.2. ANALYSE DYNAMIQUE DE LA CHARGE PARTIELLE D'UNE POMPE A CHALEUR DANS UNE MAISON INDIVIDUELLE BBC

Ce cas d'application est décrit en détail dans (Plessis et al. 2014). Il vise à réaliser une analyse dynamique du fonctionnement d'une pompe à chaleur (PAC) air-eau contrôlée de manière intermittente. Le modèle de PAC utilisé est un modèle empirique dynamique prenant en compte la dégradation des performances due à la charge partielle (Blervaque et al. 2012). Le COP nominal de la PAC est de 4,2.

L'analyse dynamique réalisée avec BuildSysPro dans le logiciel Dymola permet de fournir des informations sur la structure de la demande en énergie et en puissance au cours de l'année, et sur le fonctionnement de la PAC au cours de l'année, qui doit faire face à des besoins de chaleur et de froid très faibles qui l'éloignent de ses conditions nominales de fonctionnement.

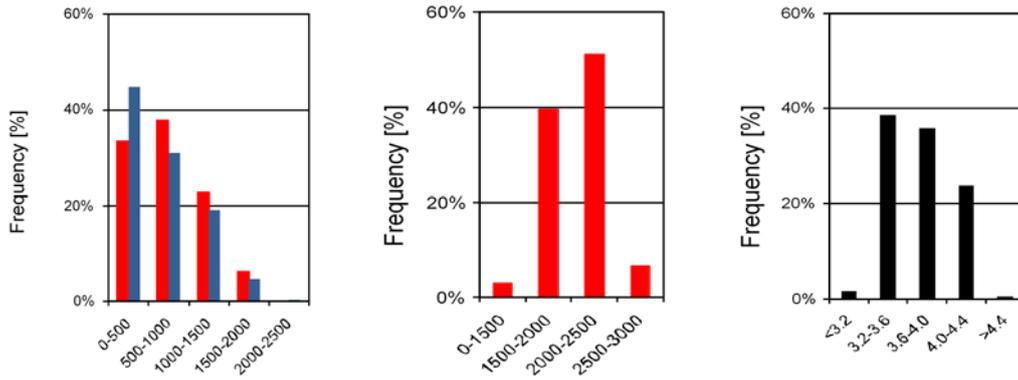


Figure 4 : Distribution (a) des besoins horaires en chaud et froid (Wh), (b) de la chaleur fournie (Wh) et (c) des coefficients de performance (COP) de la PAC

Les écarts entre besoin et chaleur fournie (Figure 4 (a) et (b)) montrent que la PAC intermittente n'est pas adaptée pour répondre aux besoins du bâtiment BBC modélisé. De plus, on observe une dégradation des performances de la PAC, qui fonctionnent plus souvent sous son COP nominal. Une PAC à vitesse variable serait plus adaptée dans ce cas de figure.

4.3. GENERATION AUTOMATIQUE DE MODELES DE QUARTIER

La chaîne de modélisation mise en place dans le cadre du projet ANR MERUBBI et illustrée dans la Figure 5 permet de générer automatiquement une étude BuildSysPro à partir de données décrivant les bâtiments d'un quartier, structurées dans un format pivot XML. Un outil de génération de code écrit en Python profite de la dualité code/visuel et de l'aspect orienté objet du langage Modelica pour lire le fichier de données et écrire le code Modelica associé aux composants du cas d'étude (instanciation des parois, zones, systèmes). Les liaisons physiques entre éléments instancié sont alors écrites, en fonction de la configuration du quartier et des phénomènes physiques étudiés (fonction Modelica *connect*).

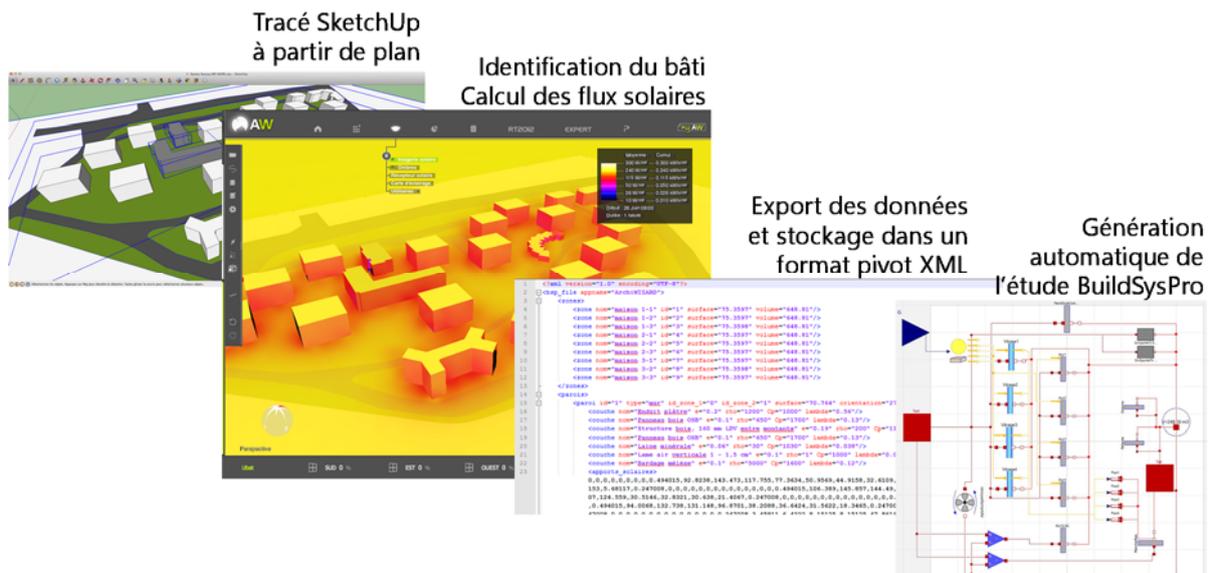


Figure 5 : Illustration de la démarche de génération de modèle de quartier BuildSysPro à partir d'un plan SketchUp et des sorties du logiciel ArchiWIZARD

5. GESTION DU PROJET OPEN SOURCE, LOGICIELS, LICENCE

Afin de permettre à chacun d'exploiter BuildSysPro Open Source, les sources ainsi que des supports d'autoformation sont hébergés sur le site de développement collaboratif Github :

Version de développement	https://github.com/edf-enerbat/buildsyspro
Versions stables	https://github.com/edf-enerbat/buildsyspro/releases
Supports d'auto-formation	https://github.com/edf-enerbat/buildsyspro-doc

Tableau 1 : hébergement du projet open source

La gestion des versions de BuildSysPro est réalisée par le groupe « Simulation énergétique et bâti » du département EnerBaT d'EDF R&D. La version actuelle de BuildSysPro Open Source est compatible avec Dymola 2016FD01 et son pendant open source [OpenModelica 1.9.3](#).

La bibliothèque BuildSysPro Open Source est publiée sous licence [Modelica License Version 2](#).

6. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Plus qu'un logiciel mono-usage, BuildSysPro open source est une boîte à outils permettant de répondre à des questions de recherche spécifiques en simulation énergétique des bâtiments et des quartiers, en interface avec toutes les composantes dynamiques du système énergétique (réseau électrique, réseaux de chaleur, systèmes de production décentralisée...). En continuels développements, la bibliothèque va accueillir de nombreuses évolutions dès 2016, et s'inscrire pleinement dans le processus de travail collaboratif open source de l'Annexe 60 de l'AIE et des projets IBPSA.

Au-delà des problématiques thermiques, le bâtiment s'intègre aujourd'hui plus largement au système énergétique global, comme consommateur et producteur d'énergie. Ce contexte favorise l'émergence de domaines de recherche multi-domaines et multi-métier (connexion du bâtiment aux réseaux électrique et de chaleur...), qui impliquent des physiques et des approches de modélisation parfois très différentes. L'usage du langage Modelica facilite le couplage de modèles provenant de différents domaines métiers, par exemple le bâtiment et le réseau électrique (Bonvini et al. 2014). Le développement parallèle de bibliothèques Modelica variées telles que *BuildSysPro* pour le bâtiment (Plessis et al. 2014), *ThermoSysPro* pour les systèmes de production (El Hefni et al. 2011) ou *GridSysPro* pour les réseaux électriques (Chilard et al. 2015) permet ainsi d'accélérer l'interopérabilité des domaines de recherche.

Une autre approche pour le couplage de différents domaines métiers est liée au fort développement du standard d'interopérabilité FMI (Functional Mock-up Interface). L'encapsulation de composants métiers sous forme de FMU (Functional Mock-up Unit) permet de s'affranchir de l'outil de modélisation initial et de faciliter l'export ou la co-simulation des différents modèles. À titre d'exemple, dans le cadre du projet ANR SUPERBAT, les modèles de bâtiments BuildSysPro ont été couplés au logiciel SMACH de simulation multi-agents du comportement des occupants via le wrapper JFMI (Plessis et al. 2014). Le développement de la plate-forme de co-simulation [DACCOSIM](#) (Galtier et al. 2015) dans le cadre de l'institut RISEGrid (EDF & CentraleSupélec), vise à faciliter la co-simulation des modèles issus de domaines métiers différents, afin d'étudier par la simulation l'intégration des bâtiments dans le système énergétique global.

7. REMERCIEMENTS

Certains cas d'application de BuildSysPro présentés ont été soutenus par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR) au travers du programme Habitat Intelligent et Solaire Photovoltaïque (projets FIABILITÉ, ANR SUPERBAT) et Villes et Bâtiments Durables (ANR MERUBBI), ainsi que par l'Agence Internationale de l'Energie au travers de l'IEA EBC Annex 60.

8. BIBLIOGRAPHIE

- Blervaque, Hubert. 2014. « Règles de modélisation des systèmes énergétiques dans les Bâtiments Basse Consommation ». Thèse de doctorat, Mines ParisTech, <http://www.theses.fr/2014ENMP0032>
- Blervaque, Hubert, Sila Filfli, Pascal Stabat, Mathieu Schumann et Dominique Marchio. 2012. « Comparative Analysis of Air-To-Air Heat Pump Models for Building Energy Simulation » *Proceedings of SimBuild 2012*.
- Bontemps, Stéphanie, Aurélie Kaemmerlen, Géraud Blatman et Laurent Mora. 2013. « Reliability Of Dynamic Simulation Models For Building Energy In The Context Of Low-energy Buildings ». *Proceedings of IBPSA 2013*.
- Bonvini, Marco, Michael Wetter et Thierry S. Noudui. 2015. « A Modelica package for building-to-electrical grid integration ». *BauSIM 2015, Fifth German-Austria IBPSA Conference*.
- Chilard, Olivier, Jérémy Boes, Alexandre Perles, Guy Camilleri, Marie-Pierre Gleizes, Jean-Philippe Tavella et Dominique Croteau. 2015. « The Modelica language and the FMI standard for modeling and simulation of Smart Grids ». *11th International Modelica Conference*.
- El Hefni, Baligh, Daniel Bouskela et Grégory Lebreton. 2011. « Dynamic modelling of a combined cycle power plant with ThermoSysPro ». *Proceedings of the 8th Modelica Conference*.
- 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 ». *SCS Spring Simulation Multi-Conference 2015*
- Judkoff Ron et Joel Neymark. 2006. « Model validation and testing: the methodological foundation of ASHRAE Standard 140 ». *ASHRAE Transactions 112(2)*, 367-37.
- Judkoff, Ron et Joel Neymark. 1995. *International Energy Agency Building Energy Simulation Test (IEA BESTEST) and Diagnostic Method*. NREL/TP-472-6231. Golden, CO: NREL.
- Murphy, Kevin M. et Francis Deque. 1997. « An open ended modular interface and controller library for CLIM2000 ». *International Building Performance Simulation Association 1997*.
- Noudui, Thierry Stephane, Kaustubh Phalak, Wangda Zuo et Michael Wetter. 2012. « Validation and Application of the Room Model of the Modelica Buildings Library ». *Proceedings of the 9th International Modelica Conference*.
- Plessis, Gilles, Aurélie Kaemmerlen et Amy Lindsay. 2014. « BuildSysPro: a Modelica library for modelling buildings and energy systems ». *10th International Modelica Conference*.
- Plessis, Gilles, Edouard Amouroux et Yvon Haradji. 2014. « Coupling occupant behaviour with a building energy model - A FMI application ». *10th International Modelica Conference*.
- Wetter, Michael, Marcus Fuchs, Pavel Grozman, Lieve Helsen, Filip Jorissen, Moritz Lauster, Dirk Müller, Christoph Nytsch-Geusen, Damien Picard, Per Sahlin et Matthis Thorade. 2015. « IEA EBC Annex 60 modelica library – An international collaboration to develop a free open-source model library for buildings and community energy systems ». *Building Simulation International Conference 2015*. Hyderabad, India.

Modélisation d'un système de stockage de chaleur à basse température utilisant un matériau cimentaire

Khadim Ndiaye^{*1}, Stéphane Ginestet¹, Martin Cyr¹

¹ Université de Toulouse; INSA; UPS,
LMDC (Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions de Toulouse)
135, avenue de Rangueil; 31 077 Toulouse cedex 4, France, Phone: 33-5- 61-55-99-16,
[*kndiaye@insa-toulouse.fr](mailto:kndiaye@insa-toulouse.fr)

RESUME. L'ettringite, hydrate principal des liants sulfoalumineux, présente l'avantage d'avoir une grande densité de stockage de chaleur à basse température (60°C). Un matériau de stockage monolithe à base de ciment sulfoalumineux a été développé dans un travail antérieur. Pour stocker de l'énergie thermique, ce matériau poreux est intégré dans un réacteur thermochimique cylindrique où la chaleur est chargée et déchargée, respectivement, par déshydratation endothermique et réhydratation exothermique. Le bilan d'énergie et le bilan de masse dans le réacteur thermochimique (adsorbeur cylindrique) génère un système d'équations différentielles non-linéaires et fortement couplées. La résolution numérique de ce système est effectuée par discrétisation spatiale en utilisant la méthode des différences finies et par intégration temporelle des variables d'état (température et pression de vapeur d'eau) à l'aide du logiciel MatLab. L'évolution de ces variables d'état a permis de prédire le comportement du système de stockage en phase de chargement et en phase de déchargement de chaleur, puis de le comparer à des résultats expérimentaux obtenus sur un prototype réalisé en laboratoire.

MOTS-CLÉS : stockage thermochimique, ettringite, modélisation.

ABSTRACT. Ettringite, main product of the hydration of sulfoaluminate binders, has advantage of high energy storage density at low temperature (60°C). A calcium sulfoaluminate cement based material was developed in a previous work. To store thermal energy, the resulting porous material is integrated into a thermochemical reactor (cylindrical adsorber) where heat is charged and discharged by endothermic dehydration and exothermic rehydration, respectively. The heat and mass balance in the thermochemical reactor generates a system of non-linear and strongly coupled differential equations. The numerical resolution is first made by spatial discretization using the finite difference method, then by temporal integration of variables (temperature and water vapor pressure) in MatLab. This variables evolution yielded a complete prediction of the spatiotemporal behavior of heat storage system knowing cementitious material properties, and then compare it with experimental data from a prototype.

KEYWORDS : thermochemical storage, ettringite, modelling.

NOMENCLATURE

a	Diffusivité thermique, m^2/s	K	Perméabilité au gaz du matériau, m^2
c_e	Capacité thermique massique de l'eau liquide, $J/(kg.K)$	k_{LFD}	Coefficient de transfert de masse, $1/s$
c_g	Capacité thermique massique de la vapeur d'eau, $J/(kg.K)$	L	Longueur du réacteur thermochimique, m
c_s	Capacité thermique massique du matériau cimentaire, $J/(kg.K)$	M	Masse molaire de la phase adsorbée, eau, kg/mol
C_h	Capacité thermique massique homogénéisée des trois phases, $J/(kg.K)$	n_f	Nombres de mailles radiales dans le fluide caloporteur, -
HR	Humidité relative, %	n_s	Nombre de mailles radiales dans le matériau solide, -
D_v	Coefficient de diffusion de vapeur d'eau, m^2/s	n_z	Nombre de mailles longitudinales, -
		NUT	Nombre d'Unités de Transfert, -

p	Pression partielle de vapeur d'eau, Pa
p_{vs}	Pression de vapeur saturante, Pa
q	Quantité d'eau présente dans le matériau,
kg/m^3	
r	Coordonnée radiale du repère cylindrique, m
R	Constante des gaz parfaits, J/(mol.K)
R_1	Rayon intérieur du tube métallique, m
R_2	Rayon extérieur du tube métallique, m
R_3	Rayon extérieur du matériau, m
t	Temps, s
T	Température, K
\bar{T}	Température adimensionnée, -

u	Vitesse de la phase adsorbée (vapeur d'eau) dans le matériau, m/s
v	Vitesse du fluide caloporteur (eau liquide) dans le tube métallique, m/s
z	Coordonnée axiale du repère cylindrique, m

Lettres grecques

ε	Porosité du matériau monolithe, %
ρ	Masse volumique, kg/m^3
λ	Conductivité thermique, W/(m.K)
ΔH	Chaleur de sorption, J/kg
μ	Viscosité dynamique, Pa.

1. INTRODUCTION

Le bâtiment est l'un des secteurs d'activité le plus consommateur d'énergie devant l'industrie et le transport. L'utilisation de sources d'énergie renouvelable comme l'énergie solaire est nécessaire pour rationaliser la gestion de l'énergie. Pour éviter l'intermittence de la source solaire par exemple, le stockage d'énergie apparaît comme une solution pour emmagasiner l'excès d'énergie solaire en été puis le restituer en hiver. L'ettringite, hydrate principal des liants sulfoalumineux, présente l'avantage d'avoir une grande densité de stockage d'énergie à basse température (Struble et Brown, 1986). Un matériau ettringitique de stockage à base de ciment sulfoalumineux a été développé et caractérisé dans un travail antérieur (Ndiaye et al. 2014). La simulation d'un réacteur thermochimique en utilisant les propriétés de ce matériau cimentaire va permettre de prédire le comportement du système de stockage durant la phase de chargement et de déchargement de chaleur, et d'aider à l'élaboration d'un prototype expérimental.

Pour atteindre ces objectifs, un modèle bidimensionnel de stockage basé sur les modèles existants dans la littérature, a été utilisé dans cet article. Le bilan d'énergie et le bilan de masse dans le réacteur thermochimique (adsorbéur cylindrique) génèrent un système d'équations différentielles non-linéaires et fortement couplées. Ce système d'équations différentielles est résolu par discrétisation spatiale et intégration temporelle des dérivées de chaque variable d'état (température et pression de vapeur d'eau dans le matériau ettringitique).

2. DESCRIPTION DU REACTEUR ETUDIE

Le réacteur thermochimique retenu (voir *Figure 1*) est composé d'un tube métallique mince (épaisseur R_2-R_1), dans lequel circule un fluide caloporteur (eau chaude $0-R_1$) permettant de chauffer le matériau ettringitique disposé autour (épaisseur R_2-R_3), durant la période de chargement de chaleur.

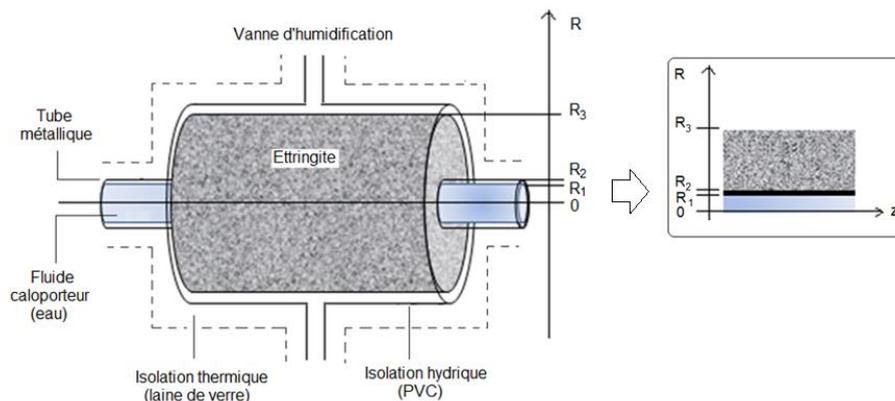


Figure 1 : Réacteur thermochimique à modéliser

En phase de charge, la chaleur (via un capteur solaire à 60°C) permet de chauffer le fluide caloporteur (eau) circulant dans le tube métallique. Par conséquent, le matériau ettringitique situé autour est chauffé à travers le tube métallique entraînant la désorption physique et la déshydratation chimique (endothermique) dans le matériau. La chaleur engendrant la réaction endothermique est stockée dans le matériau. Cette énergie thermo-chimique est conservée tant que le système reste isolé de la vapeur d'eau.

En période de décharge, la chaleur stockée est récupérée par une humidification du matériau par de la vapeur d'eau, ce qui entraîne l'adsorption (et l'hydratation) exothermique des molécules d'eau sur l'ettringite. Dans notre modélisation, l'azote humide est utilisé au lieu de l'air humide pour humidifier le matériau car la présence de CO₂ pourrait engendrer une carbonatation de l'ettringite (Nishikawa et al. 1992).

3. FORMULATION MATHÉMATIQUE DU PROBLÈME PHYSIQUE

Plusieurs modèles de stockage d'énergie 1D, 2D basés sur les zéolites (lit de poudre) existent dans la littérature (Sun et al. 1995) (Leong et Liu 2004) (Hongois, 2011) (Duquesne et al. 2014). Le réacteur est modélisé en tenant compte des spécificités du matériau cimentaire monolithique.

3.1. HYPOTHESES RETENUES

Les parois transversales de l'adsorbeur (à $z = 0$ et $z = L$) sont supposées adiabatiques contrairement à la paroi longitudinale (surface latérale du cylindre à R_3). Le modèle de diffusion simplifié (Linear Driving Force, LDF) est utilisé ici comme modèle de cinétique de sorption. On suppose que la loi de Darcy s'applique à notre matériau cimentaire poreux. La phase gazeuse est considérée comme un gaz parfait. L'écoulement du fluide caloporteur se comporte comme un écoulement de Poiseuille.

3.2. ECRITURE DES BILANS ÉNERGETIQUES ET MASSIQUES

Le modèle bidimensionnel est basé sur le bilan énergétique et le bilan de masse dans le matériau en coordonnées cylindriques.

- Bilan énergétique dans le fluide caloporteur

$$\frac{\partial T_f}{\partial t} + 2 \left(1 - \left(\frac{r}{R1}\right)^2\right) \cdot \nabla T_f - \frac{\lambda_f}{\rho_f \cdot c_f} \nabla^2 T_f = 0 \quad (1)$$

- Bilan énergétique et massique dans le matériau cimentaire

$$\begin{aligned} \frac{\partial(c_h T)}{\partial t} + \nabla(\rho u c_g T) - \nabla(\lambda \nabla T) &= (1 - \varepsilon) \Delta H \frac{\partial q}{\partial t} \\ \varepsilon \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho u) &= -(1 - \varepsilon) \frac{\partial q}{\partial t}; \quad u = -\frac{K}{\mu} \nabla p \end{aligned} \quad (2)$$

- Cinétique de sorption et isothermes de sorption

$$\frac{\partial q}{\partial t} = K_{LFD}(q_{equ} - q); \quad q_{equ}(h, T) = \frac{q_m c HR(1 - HR^n) + b n h^n(1 - HR)}{(1 - HR)((1 - HR) + c(HR + b HR^n))} \quad (3)$$

- La condition de raccordement fluide/métal et métal/matériau en tenant compte de la non-accumulation d'énergie dans le métal.

$$\frac{\partial T_f}{\partial r}(R_1, z, t) = \frac{\lambda_m}{\lambda_f} \frac{1}{R_1} \frac{T_f(R_1) - T(R_2)}{\ln\left(\frac{R_1}{R_2}\right)}; \quad \frac{\partial T_f}{\partial r}(R_2, z, t) = \frac{\lambda_m}{\lambda} \frac{1}{R_1} \frac{T_f(R_1) - T(R_2)}{\ln\left(\frac{R_1}{R_2}\right)} \quad (4)$$

Les conditions limites utilisées en phase de stockage et de déstockage de chaleur sont données au Tableau 1.

	Phase de chargement	Phase de déchargement
$z=0$	$T_f(r, 0, t) = 60^\circ\text{C}$	$T_f(r, 0, t) = 20^\circ\text{C}$
$r=R_3$	$p(R_3, z, t) = 0 \text{ Pa}$	$p(R_3, z, t) = 2200 \text{ Pa}$

Tableau 1: Conditions limites en phase de chargement et de déchargement de chaleur

Ce système d'équations différentielles est résolu par discrétisation spatiale avec un schéma de différences finies vérifié selon la méthode décrite par Sun et al. (Sun et al. 1995).

4. METHODE NUMERIQUE

Différentes méthodes numériques permettent de résoudre le problème posé. Au lieu d'utiliser un logiciel commercial multiphysique, nous avons fait le choix de nous baser sur une méthode classique que nous avons programmée à l'aide de MatLab®.

La résolution numérique est basée sur une discrétisation spatiale par différences finies puis une intégration temporelle des dérivées des variables d'état. L'intégration temporelle est faite à l'aide de la méthode Gear (Gear, 1971) (Gear, 1984) (critère de convergence, erreur absolue inférieure à 10^{-6}).

4.1. DISCRETISATION SPATIALE

La méthode des différences finies du 2^{ème} ordre avec schéma implicite est utilisée ici pour discrétiser l'espace bidimensionnel. Les dérivées sont approchées par leur développement limité (série de Taylor) d'ordre 2.

L'espace dans le réacteur est discrétisé en n_z mailles longitudinales de distance $dz = \frac{L}{n_z}$, n_r mailles radiales de distance $dr_f = \frac{R_1}{n_r}$ dans le fluide caloporteur, et n_s mailles radiales de distance $dr_s = \frac{R_3 - R_2}{n_s}$ dans le matériau disposé autour.

4.2. VERIFICATION DU SCHEMA DE DISCRETISATION

Sun et al. (Sun et al. 1995) ont modélisé un adsorbent cylindrique muni d'un tube métallique central, pourvu d'un lit de zéolite 13X (modèle monodimensionnel). Pour vérifier leur méthode numérique, Sun et al. ont considéré l'échange parfait entre le fluide caloporteur, le métal et le matériau adsorbant :

$$\bar{T}_f(\bar{z}, \bar{t}) \sim \bar{T}_m(\bar{z}, \bar{t}) \sim \bar{T}(\bar{z}, \bar{t}) \text{ et } NUT_f = H = \infty$$

Les équations sont aussi découplées : $B_p = D_T = 0$. Le modèle numérique devient :

$$\frac{\partial \bar{T}}{\partial \bar{t}} + \omega \frac{\partial \bar{T}}{\partial \bar{z}} + D_L \frac{\partial^2 \bar{T}}{\partial \bar{z}^2} = 0 \quad (5)$$

avec $w = \frac{\beta}{1+\beta+\gamma B_T}$ et $D_L = \frac{\beta}{1+\beta+\gamma B_T} \omega = 0.79$ et $D_L = 1,7 \cdot 10^{-3}$ pour la zéolite 13X

En outre, la résolution analytique de l'équation différentielle (Équation 5) génère une solution analytique simplifiée (Équation 6) :

$$\bar{T}(\bar{z}, \bar{t}) = \frac{1}{2} \left[\operatorname{erfc} \left(\frac{\bar{z} - w \cdot \bar{t}}{\sqrt{4D_L \cdot \bar{t}}} \right) + \exp \left(\frac{w \cdot \bar{z}}{D_L} \right) \operatorname{erfc} \left(\frac{\bar{z} + w \cdot \bar{t}}{\sqrt{4D_L \cdot \bar{t}}} \right) \right] \quad (6)$$

Sun et al. ont validé leur schéma numérique (un schéma de Crank-Nicolson 3^{ème} ordre) en comparant les résultats de simulation numérique (Équation 5) et de la solution analytique (Équation 6).

Pour valider notre schéma numérique en suivant la même démarche, nous avons discrétisé le modèle monodimensionnel simplifié décrit par Sun et al. (Équation 5) avec notre schéma de discrétisation (différence finie 2^{ème} ordre). Ensuite la simulation numérique a été effectuée en utilisant les paramètres physiques de la zéolite 13X fournis par Sun et al. (Sun et al. 1995).

Les résultats de la simulation montrent que l'évolution de la température du fluide au cours du temps à partir de notre schéma de discrétisation était conforme à celle obtenue de manière analytique (Figure 2). L'erreur de discrétisation est la différence entre la solution exacte du modèle mathématique et celle du système discrétisé (Oberkampf et Roy, 2010). Nous avons considéré respectivement la solution analytique et numérique comme la solution exacte du modèle mathématique et celle du système discrétisé. L'erreur absolue entre la solution analytique et numérique (erreur de discrétisation) a confirmé la stabilité de notre schéma numérique discrétisation. L'erreur absolue maximale est d'environ $2 \cdot 10^{-3}$.

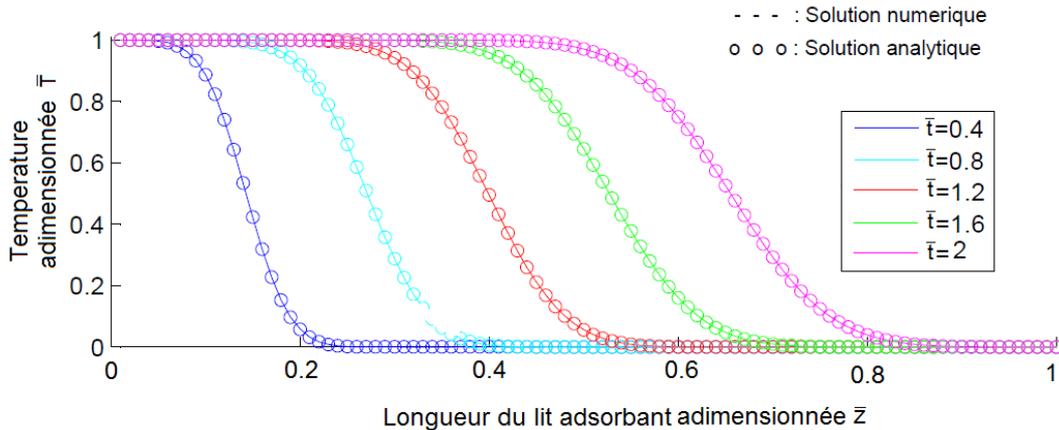


Figure 2 : Solution analytique et numérique obtenue avec notre schéma de discrétisation 2^{ème} ordre

4.3. COMPLEMENT SUR LA METHODE RETENUE PAR INTEGRATION TEMPORELLE

La problématique de l'intégration temporelle est la raideur du système, car ce dernier peut comporter des dynamiques très différentes. La raideur du système peut causer une forte perte de précision de la solution numérique (Oberkampf et Roy, 2010). Ce genre de système nécessite une méthode d'intégration robuste et efficace capable de gérer les différentes dynamiques du système. La méthode de Gear est une méthode d'intégration temporelle à pas de temps variable de type prédicteur-correcteur stable adaptée aux équations différentielles raides (Gear, 1971) (Gear, 1984). Le solveur ODE15s sur MatLab® basé sur la méthode Gear est ici utilisé pour effectuer l'intégration temporelle du système d'équation. La procédure de résolution (Oberkampf et Roy, 2010) se fait par une première itération ($n = 1$) en utilisant les conditions initiales. Ensuite le système d'équation est résolu pour trouver les variables à l'itération $n+1$ puis réactualiser les termes de non linéarité. Cette procédure est

répétée jusqu'à atteindre la convergence. Les propriétés structurales, thermiques, et hydriques (Ndiaye et al. 2014) sont utilisées pour simuler le comportement du système ettringitique de stockage de chaleur lors du cycle de stockage –déstockage.

5. SIMULATION NUMERIQUE DU REACTEUR DE STOCKAGE

5.1. PHASE DE CHARGEMENT DE CHALEUR

Dans cette phase, le fluide caloporteur (eau liquide circulant dans le tube en métal) entre à l'extrémité du tube métallique central ($z=0$) à une température de 60°C (correspondant à la sortie d'un capteur solaire par exemple). La chaleur est alors transmise au matériau, ettringitique disposé autour du tube métallique, par le fluide caloporteur (*Figure 3*).

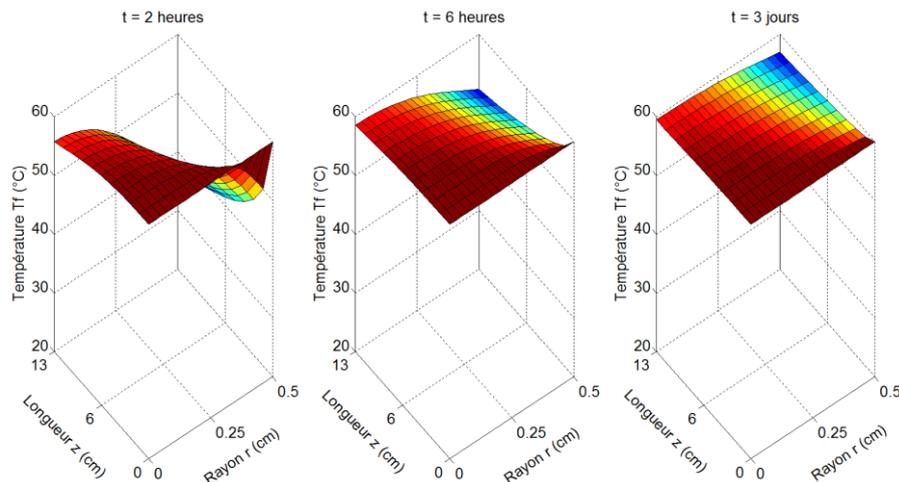


Figure 3 : Evolution spatiotemporelle de la température du fluide caloporteur (eau) dans le tube métallique en phase de chargement

L'évolution temporelle de la température du matériau ettringitique sur la *Figure 4* confirme le chauffage du matériau mais montre une répartition spatiale non uniforme de la température dans le matériau: la température diminue avec le rayon, la zone à proximité du tube étant plus chaude (chauffage radial). La déshydratation endothermique permet ainsi de stocker de la chaleur dans le matériau. Cette énergie est conservée tant que le matériau ettringitique reste isolé de la vapeur eau, elle peut être déchargée aussi bien à court terme (journée, semaine) qu'à long terme (stockage saisonnier).

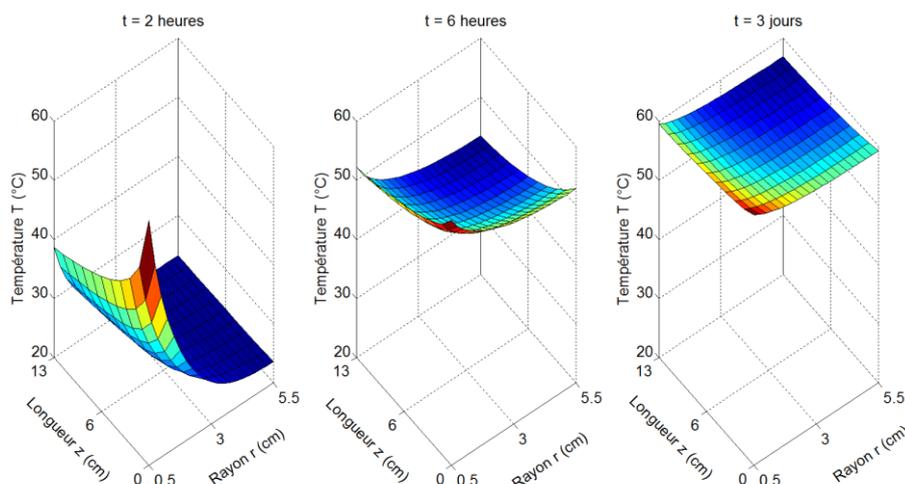


Figure 4 : Evolution spatiotemporelle de la température dans le matériau ettringitique en phase de chargement

5.2. SIMULATION DE LA PHASE DE DECHARGEMENT DE CHALEUR

La phase de déstockage de la chaleur débute par une humidification radiale du matériau initialement sec, cette humidification est réalisée en imposant une pression de vapeur plus élevée sur à la face extérieure du matériau (Conditions de Dirichlet à R_3). La vapeur d'eau diffuse radialement dans la porosité du matériau de l'extérieur vers l'intérieur (*Figure 5*).

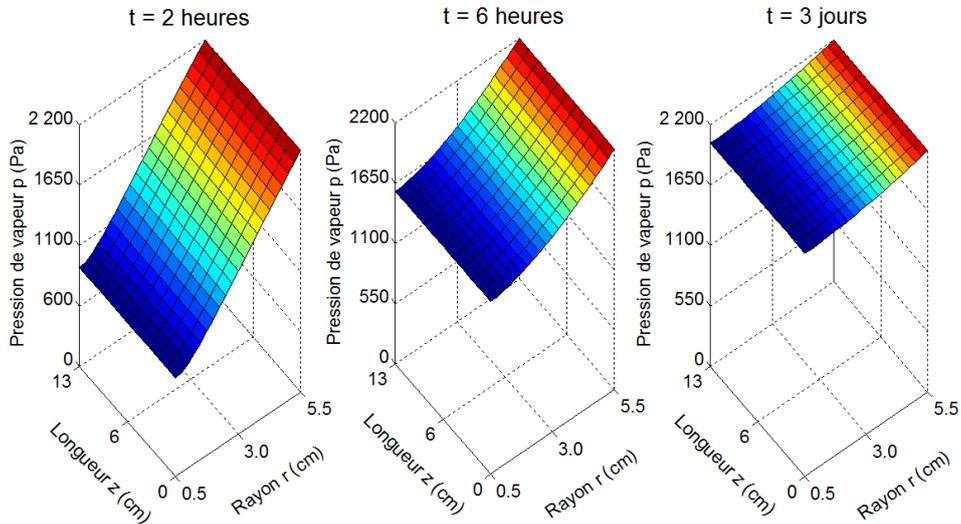


Figure 5 : Evolution spatiotemporelle de la pression de vapeur d'eau dans le matériau en phase de déchargement

L'adsorption exothermique de la vapeur d'eau sur le matériau engendre un déchargement progressif de la chaleur stockée. La restitution de la chaleur se manifeste par l'augmentation de la température du matériau jusqu'à 15°C après 6h d'humidification (*Figure 6*). Ensuite, la baisse de la température notée au 3^{ème} jour est liée à l'évacuation de la chaleur par le fluide caloporteur qui continue de circuler dans le tube métallique.

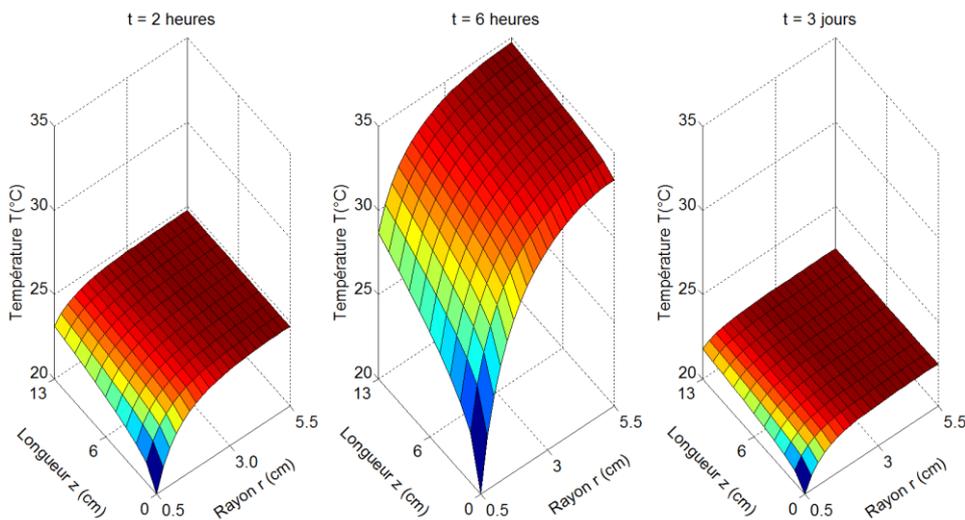


Figure 6 : Evolution spatiotemporelle de la température T(°C) dans le matériau en phase de déchargement

Les résultats de cette étude numérique ont permis de mieux connaître le comportement du matériau dans le réacteur thermochimique, mais aussi de prévoir les conditions de fonctionnement du stockage de chaleur (gamme de température et de pression) utilisées pour réaliser le prototype expérimental du réacteur.

6. CONCLUSION

Le bilan d'énergie et de masse dans le réacteur thermochimique pourvu du matériau ettringitique génère un système d'équations différentielles non-linéaires et fortement couplées. La simulation du modèle de stockage utilisant les propriétés thermiques et hydriques mesurées en laboratoire du matériau ettringitique pendant la phase de chargement et la phase de déchargement, a permis de prédire la distribution spatiale de la température, la pression de vapeur d'eau dans réacteur thermochimique, et l'évolution temporelle de ces variables.

Les résultats de cette étude numérique ont permis de mieux connaître le comportement du matériau dans le réacteur thermochimique, mais aussi de prévoir les conditions de fonctionnement du stockage de chaleur (gamme de température et de pression). Ces résultats peuvent être considérés comme une étude de conception d'un prototype expérimental du réacteur permettant de valider l'étude numérique et de servir de preuve de concept. Suite à cette étude, un premier prototype a été réalisé et testé en laboratoire. Les résultats expérimentaux ont permis de retrouver les mêmes ordres de grandeur des différentes variables, et d'effectuer un premier bilan énergétique du système. Le modèle utilisé ici fait maintenant partie, au même titre que la formulation chimique du matériau, des différents outils qui vont être mis en œuvre pour optimiser le système de stockage.

7. BIBLIOGRAPHIE

- Duquesne, M., J. Toutain, A. Sempey, S. Ginestet, E. P. del Barrio. 2014. « Modeling of a nonlinear thermochemical energy storage by adsorption on zeolites ». *Applied Thermal Engineering* 71 (1): 469 - 80.
- Gear, C.W. 1971. « The automatic integration of ordinary differential equations ». *Communications of the ACM* 14 (3): 185-190.
- Gear, C.W., L.R. Petzold. 1984. « ODE methods for the solution of Differential/Algebraic systems ». *SIAM Journal on Numerical Analysis* 21(4): 521- 716.
- Hongois, S. 2011. « Stockage inter saisonnier par voie thermochimique pour le chauffage solaire de la maison individuelle ». Thèse de Doctorat, INSA Lyon.
- Leong, K. C., Y. Liu. 2004. « Numerical modeling of combined heat and mass transfer in the adsorbent bed of a zeolite/water cooling system ». *Applied Thermal Engineering* 24 (16): 2359 - 74.
- Ndiaye, K., Ginestet S., Cyr M., 2014. « Development of a cementitious material for thermal energy storage at low temperature ». in *Eurotherm 99*, Lleida, Spain.
- Nishikawa, T., K. Suzuki, S. Ito, Sato K., and T. Takebe. 1992. « Decomposition of synthesized ettringite by carbonation ». *Cement and Concrete Research* 22: 6 - 14.
- Oberkampf, W., C. Roy. 2010. « Verification and Validation in Scientific Computing ». *Cambridge University Press*, ISBN 978 0 521 11360 1
- Struble, L. J., and Brown. P. W. 1986. « Heats of dehydration and specific heat of compounds found in concrete and their potential for thermal energy storage ». *Solar Energy Materials* 14 (1): 1 - 12.
- Sun, L. M., N. B. Amar, F. Meunier. 1995. « Numerical Study on Coupled Heat and Mass Transfers in an Adsorber with External Fluid Heating ». *Heat Recovery Systems & CHP* 15 (1): 19 - 29.

Etude expérimentale d'un système innovant de rafraîchissement de bâtiment.

Guilian Leroux*^{1,2}, Jocelyn Anger¹, Louis Stephan¹, Nolwenn Le Pierrès², Etienne Wurtz¹

¹ SBST, CEA

² LOCIE, Université de Savoie, CNRS UMR5271

50 avenue du lac Léman 73370 Le Bourget du lac, France

*guilian.leroux@univ-smb.fr

RESUME. Une étude expérimentale d'un système de rafraîchissement de bâtiment est présentée dans cet article. Ce système utilisant le phénomène d'évaporation et le potentiel de rafraîchissement de la terre est simple, peu coûteux et peu consommateur en énergie. Il a été installé à échelle réel sur une maison individuelle de 100 m² à Bordeaux et a été testé durant l'été 2015. Sur la séquence de test présentée (10 au 25 août 2015), ce système a permis d'évacuer 130 kWh de chaleur du bâtiment permettant de garder une température intérieure inférieure à 27°C.

MOTS-CLÉS : Système de rafraîchissement, Evaporation, Etude expérimentale

ABSTRACT. An experimental study of an innovative building cooling system is presented in this article. This system using both the evaporation phenomena and the cooling potential of earth is simple, cheap and energy-saving. It has been installed with real scale on a 100 m² house in Bordeaux and has been tested during the summer 2015. On the presented test sequence (10 to 25th august 2015), the system extracted 130 kWh from the building allowing to keep the indoor temperature above 27°C.

KEYWORDS : Cooling system, Evaporation, Experimental study

1. INTRODUCTION

Avec environ 16% de la consommation mondiale en énergie finale (IEA, 2013) et une croissance annuelle de 1.6% par an, le secteur du bâtiment est une des principales sources de consommation d'énergie et d'émission de gaz à effet de serre dans le monde. Cette croissance est soutenue par une utilisation de plus en plus importante des systèmes de climatisation. Des travaux menés par l'agence d'évaluation environnementale Néerlandaise (Isaac and Van Vuuren, 2009), prévoient une explosion de la consommation mondiale d'énergie liée à la climatisation au cours des prochaines décennies. Celle-ci devrait même dépasser la consommation mondiale liée au chauffage avant la fin du 21^{ème} siècle. L'explication principale de cette croissance est la forte demande dans les pays émergents ayant des climats chauds et des populations importantes (Inde, Chine, Brésil, Malaisie...). Par exemple Chaturvedi et al. (2014) prévoient une multiplication par 29 de la consommation de climatisation en Inde entre 2005 et 2095.

Actuellement, les besoins de froid sont essentiellement couverts par l'installation de climatiseurs par compression qui sont des appareils très gourmands en électricité. Une forte utilisation de la climatisation entraîne donc une consommation importante d'énergie et un stress important sur les réseaux de distribution d'électricité. De plus, le fluide frigorigène le plus couramment utilisé dans ces appareils (R410A) est un très puissant gaz à effet de serre. Face aux défis climatiques et aux engagements pris au cours des dernières conférences pour le climat, il devient urgent de développer et proposer des techniques de rafraîchissement de bâtiments innovantes et peu consommatrices en énergie.

Dans leur état de l'art sur les techniques passives de rafraîchissement de bâtiment, Santamouris et Koloktsa (2013) répertorient trois axes principaux. Le premier utilise la fraîcheur du sol, dont la température relativement stable au cours de l'année constitue en été une source froide exploitable pour le rafraîchissement ; le puit canadien en est une utilisation connue de ce potentiel. Le deuxième axe est basé sur la ventilation. L'idée est alors soit d'augmenter la vitesse d'air dans le bâtiment pour diminuer la sensation d'inconfort, soit d'adapter la gestion de la ventilation en fonction des conditions extérieures. Le troisième axe concerne le phénomène endothermique d'évaporation de l'eau au contact d'air sec, on parle alors de rafraîchissement par évaporation ou rafraîchissement adiabatique. Depuis plusieurs années, cette technique ancienne a été l'objet de nombreuses études. L'utilisation la plus simple consiste à vaporiser de l'eau dans le flux d'air de ventilation, rafraîchissant et humidifiant ainsi l'air entrant dans le bâtiment. Des travaux comme ceux présentés par Daou et al. (2006) montrent l'intérêt croissant pour des systèmes plus complexes utilisant des échangeurs (évaporation indirecte) ou des roues dessiccantes.

Cet article présente un système de rafraîchissement innovant qui utilise conjointement le potentiel de rafraîchissement de l'évaporation et de l'inertie de la terre. Une étude expérimentale de ce système testé sur une habitation à échelle réelle est proposée. Dans un premier temps, le système et son fonctionnement seront décrits, l'installation expérimentale sera ensuite détaillée. Enfin les principaux résultats expérimentaux de l'étude seront exposés.

2. LE SYSTEME DE RAFRAICHISSEMENT

L'objectif est d'utiliser le potentiel de rafraîchissement de l'évaporation et du sol avec un système peu coûteux, efficace et demandant peu de maintenance. Les principaux composants du système (illustrés sur la figure 1) sont : une citerne de stockage (1), un échangeur de chaleur (plancher rafraîchissant) (2), un réservoir poreux (3) appelé évaporateur, une pompe (4), une électrovanne de vidange de l'évaporateur (5), un trop plein (6), un circuit de remplissage de l'évaporateur (7), vidange (8) et enfin une vanne trois voies (9). L'évaporateur est un réservoir plat installé façade nord à 30 cm du mur de la maison. Ce réservoir fabriqué en terre cuite a une perméabilité importante permettant lorsqu'il est rempli à une partie de l'eau contenue à l'intérieur de traverser la paroi et de s'évaporer dans l'air extérieur. Le système suit le cycle journalier suivant : lorsque la température de l'air à l'intérieur du bâtiment dépasse la consigne, la pompe (4) s'actionne, puise de l'eau fraîche dans la citerne (1) et la fait passer dans le plancher rafraîchissant. En sortie de plancher, l'eau est stockée dans l'évaporateur et commence à se refroidir. Lorsque l'évaporateur est plein, une vanne trois voies (9) renvoie l'eau en sortie de plancher directement dans la citerne. L'eau placée dans l'évaporateur se refroidit toute la nuit grâce à l'évaporation. Lorsque, au matin, la température minimum est atteinte et

que l'eau commence à se réchauffer, l'électrovanne (5) s'ouvre permettant de vidanger l'eau froide de l'évaporateur dans la citerne de stockage clôturant le cycle quotidien.

La citerne, placée dans le vide sanitaire, est installée directement sur le sol en terre permettant de bons échanges entre le sol et l'eau. Au cours d'un cycle quotidien classique, l'eau dans la citerne se réchauffe en absorbant la chaleur excédentaire du bâtiment et se refroidit au contact du sol et lors de la vidange de l'évaporateur. Par rapports aux systèmes de rafraîchissement évoqués dans l'état de l'art, ce système à l'avantage de tirer profit de deux sources complémentaires de rafraîchissement et d'utiliser le vecteur eau pour la distribution de froid dans le bâtiment.

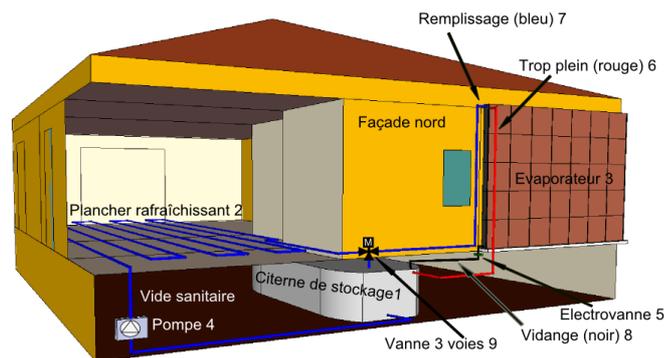


Figure 1 : Schéma du système de rafraîchissement intégré à une habitation

3. ETUDE EXPERIMENTALE

Le système a été installé sur une maison standard située à Beychac et Caillau (33). Mis en service début août 2015, le système a fonctionné durant deux mois. Cette étude présente les résultats de 15 jours de tests représentatifs (du 10 au 15 août).

3.1. LE BATIMENT

3.1.1. Géométrie

Il s'agit d'une maison de plein pied d'environ 100 m² avec un vide sanitaire et des combles non aménagés. La maison est divisée en trois chambres d'environ 10 m², un séjour cuisine de 50 m², une salle de bain, un cellier. La hauteur sous plafond est de 2.5 m donnant un volume global de l'espace intérieur de 250 m³. La maison a une toiture 4 pans d'inclinaison 20°. La surface vitrée occupe respectivement 27%, 21%, 12%, 2% des façades sud, est, ouest et nord. La figure 2 illustre la maison utilisée dans cette étude.

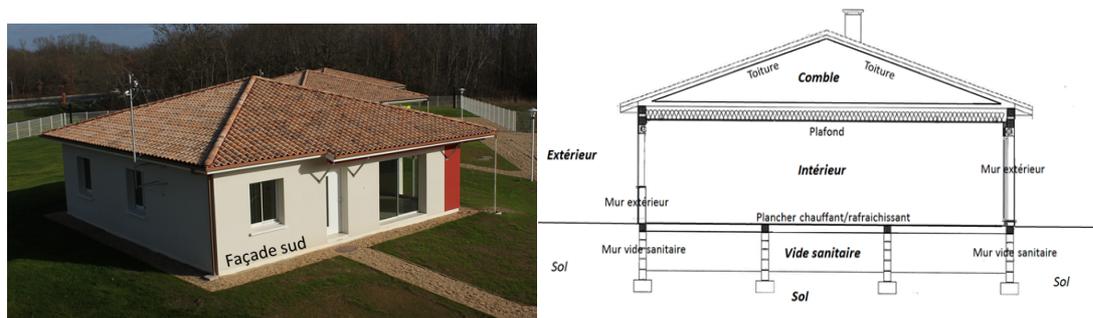


Figure 2 : Photo de la maison IGC (gauche) et schéma de celle-ci (droite)

3.1.2. Enveloppe

La maison est fortement isolée. Les murs extérieurs sont composés de briques et laine de verre ($R=4.25 \text{ m}^2\text{K/W}$), le plafond est isolé en laine soufflée ($R=6.85 \text{ m}^2\text{K/W}$), le plancher est isolé par des hourdis polystyrène ($R=6.29 \text{ m}^2\text{K/W}$). Le vitrage utilisé est un double vitrage argon basse émissivité de conductance $1.1 \text{ W/m}^2\text{K}$ et de facteur solaire 0.58 . Un test d'étanchéité à l'air sur le bâti donne un débit d'infiltration sous 4 Pa de $0.4 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{hr}$.

3.1.3. Charges internes (occupation)

Durant la période de test, le bâtiment a été inoccupé, les charges internes totales, évaluées à 250 W sont dues à une armoire électrique, un ordinateur fixe et un ballon thermodynamique de 200 L en veille.

3.2. LE SYSTEME DE RAFRAICHISSEMENT

3.2.1. L'évaporateur



Figure 3 : Illustration des briques (évaporateur), à gauche en cours de montage, au centre en détail avec les bouchons de fermeture, et d'une citerne de stockage, pleine et raccordée (à droite).

L'évaporateur est constitué de 6 briques fournies par l'entreprise Terreal (figure 3). Les briques ont une hauteur de 61 cm , une longueur de 220 cm et une épaisseur de 20 cm . Chaque brique pèse environ 220 kg et a une contenance de 160 L . Elles sont installées les unes sur les autres en les empilant sur la tranche. La surface totale de terre cuite exposée à l'air est de 16 m^2 dont 8 m^2 vers l'extérieur et 8 m^2 vers la maison. Le choix du matériau impactant fortement les performances évaporatives a été l'objet de tests et de modélisations au préalable (Leroux et al, 2015).

3.2.2. Le stockage

Le stockage est constitué de 2 réservoirs souples de 6 m^3 de contenance (figure 3) situé dans le vide sanitaire, présentant une surface d'échange avec le sol de 26.4 m^2 . Au début de l'expérience 4.5 m^3 d'eau sont dans chaque réservoir.

3.2.3. Réseau hydraulique

Le réseau hydraulique illustré sur la figure 1 est constitué par des tuyaux en plastiques souples de diamètre 1 pouce permettant de relier l'échangeur de chaleur (plancher rafraîchissant), le stockage et l'évaporateur. Le circulateur permet d'imposer un débit constant dans le réseau de 1080 L/hr lors du remplissage des stocks et de 1300 L/hr lorsque l'évaporateur est by-passé.

3.3. INSTRUMENTATION

Des thermocouples de type T ont été étalonnés et placés : dans chacune des pièces de la maison à 1.1 m de hauteur, dans le circuit hydraulique afin de mesurer la température de l'eau en départ et

retour du plancher, dans le stockage et dans chaque brique d'évaporateur. L'incertitude sur l'ensemble de la chaîne d'acquisition pour chaque mesure de température est estimée à $\pm 0.23^{\circ}\text{C}$ ($k=2$). Une mesure de l'humidité à l'extérieur et à l'intérieur du bâtiment est effectuée (incertitude de $\pm 2.5\%$). Un débitmètre mesure le débit d'eau dans le circuit (incertitude de $\pm 0.5\%$), des capteurs de niveau optique dans les évaporateurs permettent de connaître l'état de remplissage de l'évaporateur.

3.4. CONTROLE COMMANDE

Le pilotage du système se fait grâce au logiciel LabVIEW. La température de consigne est fixée à 26°C avec une hystérésis de 0.5°C . La vanne de vidange s'ouvre au matin (critère horaire), si l'évaporateur n'est pas vide, que la température de l'eau dans les évaporateurs est plus froide que celle du stockage, et enfin qu'elle commence à se réchauffer.

Pendant la durée du test détaillée dans cet article (10 au 25 août 2015), le système a fonctionné sans intervention, la ventilation était coupée avec les stores est, ouest fermés et sud ouverts.

4. RESULTATS

La figure 4 présente l'évolution des températures des éléments principaux du 10 au 15 août 2015 c'est-à-dire, la température de l'eau dans la citerne de stockage (vert), de l'air dans le salon (noir), de l'air extérieur (rouge) et de la température dans l'évaporateur (moyenne sur l'ensemble des briques) mesurant une température d'air ou d'eau selon le remplissage de celui-ci (bleu). Premièrement, on peut observer que chaque nuit, la température du volume d'eau contenu dans l'évaporateur (vert) descend de 0 à 2°C en dessous de la température minimale de la nuit. On peut observer que durant cette période la température de l'air dans le salon (noir) est restée inférieure à 27°C , que la température du bâtiment descend peu pendant la nuit (pas de ventilation et infiltrations faibles) et remonte rapidement en journée avec les apports solaire de la façade sud. Cette gestion du bâtiment n'est bien sûr pas optimisée mais a été choisie afin de solliciter le système. On voit de plus que la température de l'eau dans le stockage varie entre 19°C et 22°C , les échelons ascendants sont caractéristiques d'un rafraîchissement de la maison, les échelons descendants d'une vidange et la pente négative de la courbe lorsqu'il n'y a pas d'utilisation du système est représentative des échanges avec le sol. Il est intéressant d'observer qu'après une première période chaude (11 au 13 août), durant laquelle le stock a été beaucoup sollicité, sa température a augmentée jusqu'à 22°C et que 4 jours ont suffi à ramener sa température à 19°C .

La figure 5 permet d'observer plus précisément la dynamique du système sur trois jours (18, 19 et 20 août 2015). Les différentes phases de fonctionnement sont représentées par un code couleur. Lorsque la température intérieure dépasse la consigne (26°C -ligne en pointillée), le rafraîchissement de la maison se met en marche (zone hachurée). Dans un premier temps, l'eau en sortie de plancher remplit l'évaporateur (zone bleu foncée), caractérisé par une nette montée de température dans l'évaporateur, puis va directement dans le stockage, on note alors une augmentation de la température de l'eau dans le stockage. L'eau stockée dans l'évaporateur se refroidit (zone bleu clair) et est vidangée (zone violette) lorsque la température minimum a été atteinte (au matin). On observe au moment de la vidange une nette diminution de température de l'eau dans le stockage. Les puissances thermiques échangées entre l'eau et le milieu extérieur au niveau du plancher rafraîchissant (P_{plancher}), de l'évaporateur ($P_{\text{évaporateur}}$), et du vide sanitaire ($P_{\text{vide sanitaire}}$) sont calculées et représentées sur ce graphique. Leurs expressions sont les suivantes

$$P_{\text{plancher}} = \dot{m} C p_{\text{eau}} (T_{\text{ret}} - T_{\text{dep}}) \quad (1)$$

$$P_{\text{évaporateur}} = - \frac{d}{dt} (m_{\text{ev}} C p_{\text{eau}} T_{\text{eau, ev}}) \quad (2)$$

$$P_{\text{vide, sanitaire}} = G_1 (T_{\text{stock}} - T_{\text{sol}}) + G_2 (T_{\text{stock}} - T_{\text{air, VS}}) \quad (3)$$

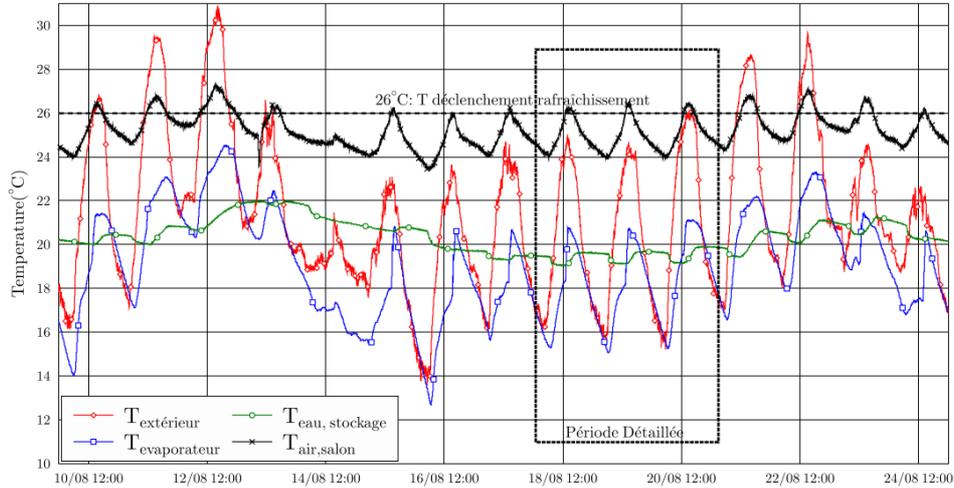


Figure 4: Mesure de températures sur les principaux éléments du système du 10 au 25 août 2015

Avec \dot{m} le débit d'eau dans le plancher (kg/s), $C p_{\text{eau}}$ la chaleur massique de l'eau (J/kg/K), T_{dep} et T_{ret} la température de l'eau en départ et retour du plancher (°C), m_{ev} est la masse d'eau dans l'évaporateur (kg), $T_{\text{eau, ev}}$ la température de l'eau dans l'évaporateur (°C), T_{stock} , T_{sol} , $T_{\text{air, VS}}$ respectivement la température de l'eau dans le stockage, du sol mesurée dans la terre 25 cm sous le stockage (en jaune sur le graphe) et de l'air dans le vide sanitaire (°C). Enfin G_1 et G_2 , sont les coefficients d'échange entre le stockage et le sol ou l'air (W/K). Ces coefficients ont été déduits à partir d'une optimisation sur une séquence de mesure de trois jours sans fonctionnement du système $G_1=172\text{W/K}$, $G_2=145\text{W/K}$.

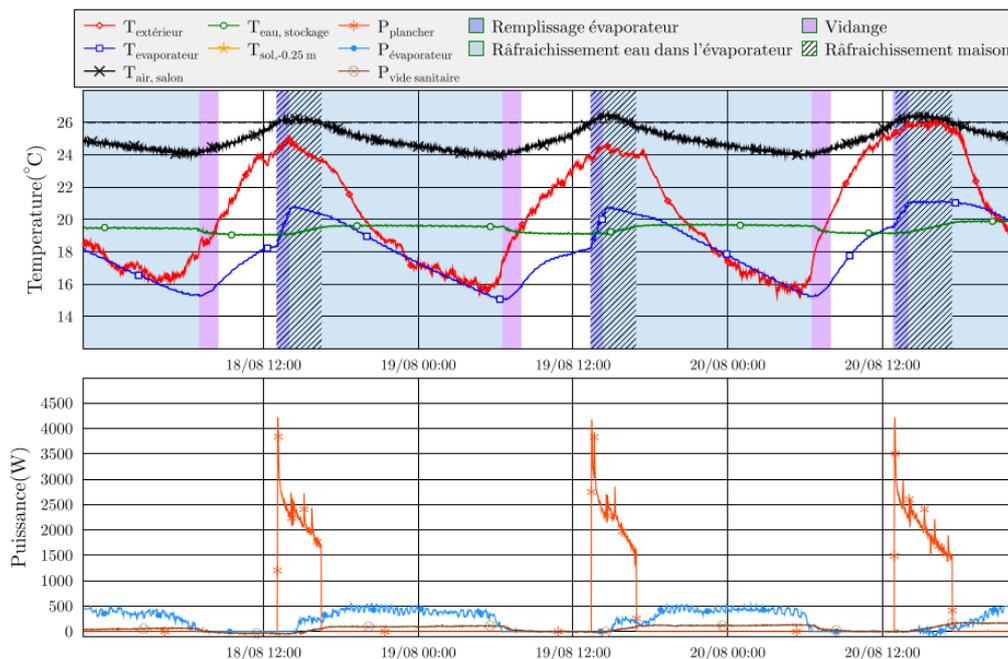


Figure 5: Détails de températures et puissances des différents éléments du système

On peut observer que la puissance extraite du logement lorsque le rafraîchissement est activé (orange) varie de 1500 à 3000 W. La consommation d'eau dans l'évaporateur est estimée en moyenne à 35 L par jour, il est à noter que même vide, l'eau présente dans les pores de la terre cuite continue à s'évaporer provoquant une évaporation en continu, et une température basse de l'évaporateur même à vide. Cette masse d'eau évaporée étant faible par rapport à la masse totale d'eau dans l'évaporateur on considère pour le calcul de puissance une masse d'eau dans l'évaporateur constante et égale à la masse d'eau présente en fin de refroidissement. La puissance de rafraîchissement de l'eau dans l'évaporateur (bleu clair) se situe entre 400 et 500 W. Cette puissance est quasi essentiellement due à l'évaporation puisque la température extérieure est rarement inférieure à celle de l'eau durant les phases de refroidissement. Une intégration quotidienne de ces grandeurs permet une comparaison plus aisée des quantités d'énergie mises en jeu. Les puissances calculées (équations 1 à 3) sont intégrées quotidiennement et représentées sur la figure 6.

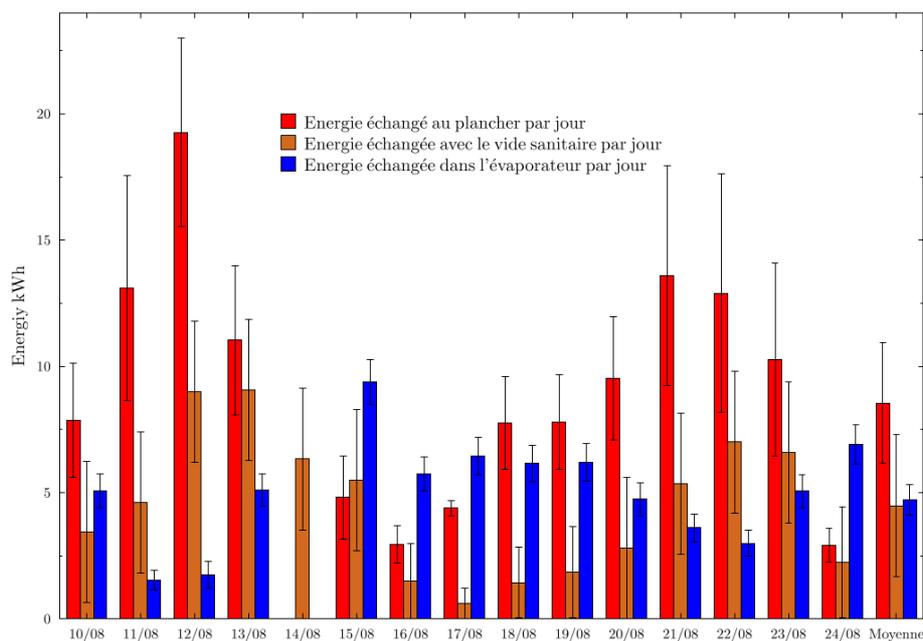


Figure 6: Représentation des énergies quotidienne mise en jeu lors du fonctionnement du système

Les incertitudes sur les énergies et puissances sont majoritairement liées aux mesures de températures, et peuvent être particulièrement importantes lorsque la différence de température utile pour ce calcul de puissance est faible ($T_{\text{dep}} - T_{\text{ret}}$ ou $T_{\text{sol}} - T_{\text{stock}}$). Ces incertitudes sont représentées sur la figure 6. On peut voir que le système évacue en moyenne 8.5 kWh d'énergie du bâtiment quotidiennement, avec un maximum le 12/08 de 19.3 kWh. Cette énergie est dissipée dans le sol (4.5 kWh en moyenne) et par l'évaporateur (4.7 kWh en moyenne). On peut observer que durant les premiers jours chauds du 11 au 13 août, les températures minimales la nuit sont supérieures 20°C, ne favorisant pas le refroidissement dans l'évaporateur. La température du stockage augmente alors (de 20 à 22°C), les échanges avec le sol deviennent importants, permettant de conserver du potentiel de rafraîchissement. Du 15 au 19 août, la température extérieure est plus modérée avec des nuits fraîches, le rafraîchissement dans l'évaporateur est alors efficace, la température de l'eau dans le stockage diminue nettement en quelques jours.

Le couplage entre l'inertie du sol et l'évaporateur permet donc d'avoir un système efficace malgré plusieurs jours de chaleur consécutifs et de refroidir efficacement l'eau dans la citerne de stockage dès que les conditions extérieures redeviennent plus favorables.

5. CONCLUSION

Cette étude expérimentale a permis de montrer le potentiel d'un système de rafraîchissement innovant et peu consommateur en énergie. Basé sur l'évaporation et l'échange avec le sol, ce système installé sur une maison à échelle réelle a été instrumenté et testé durant l'été 2015. Les résultats sur une séquence de 15 jours (10 au 25 août 2015) montrent que le système a extrait 130 kWh et maintient la température du bâtiment en dessous de 27°C. Le couplage entre l'inertie du sol et un évaporateur externe permet donc d'envisager un bon rafraîchissement de la maison tout au long de l'été.

6. REMERCIEMENTS

Ce travail de recherche est soutenu par l'assemblée des pays de Savoie. Il est été l'objet d'une collaboration avec les entreprises IGC (mise à disposition de la maison) et Terreal (fourniture des évaporateurs).

7. BIBLIOGRAPHIE

- Chaturvedi, V., Eom, J., Clarke, L.E., Shukla, P.R. 2014. Long term building energy demand for India: Disaggregating end use energy services in an integrated assessment modeling framework. *Energy Policy* 64 (2014) 226–242
- Daou, K., Wang, R.Z., Xia, Z.Z. 2006. Desiccant cooling air conditioning: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 10 (2006) 55–77
- Duan, Z., Zhan, C., Zhang, X. Mustafa, M., Zhao, X., Alimohammadisagvand, B. Hasan, A., 2012. Indirect Evaporative cooling: Past, present and future potentials. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16 (2012) 6823–6850
- International Energy Agency. 2013. International Energy Outlook 2013. <http://www.eia.gov/forecasts/ieo/pdf/0484%282013%29.pdf>
- Isaac, M., Van Vuuren, D.P. 2009. Global residential sector energy demand for heating and air conditioning in the context of climate change. *Energy Policy* 37 (2009) 507–521
- Leroux, G., Stephan, L., Le Pierrès, N., Wurtz, E., Mendes, N., 2015. An Innovative Cooling System Based On Evaporation From A Porous Tank. *Proceedings 14th international conference of IBPSA 2015 (Hyderabad)* p 2453
- Santamouris, M., Kolokotsa, D. 2013. Passive cooling techniques for buildings and other structures: The state of the art. *Energy and Buildings* 57 (2013) 74–94

Étude d'un processus de garantie de performance énergétique : application à des logements collectifs

Simon Ligier^{*1}, Maxime Robillart¹, Charles Garnier¹, 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](mailto:simon.ligier@mines-paristech.fr)

RESUME. La garantie de performance énergétique (GPE) est un levier essentiel pour le financement des bâtiments performants. L'objectif de ce travail est d'élaborer un processus fiable pour la GPE en définissant un objectif de performance intégrant des sources d'incertitudes ainsi que des possibilités d'ajustement sur des grandeurs relatives à l'occupation et au climat. La méthodologie suivie se divise en quatre étapes. Avant les travaux, les paramètres du modèle considérés a priori comme incertains sont caractérisés par une plage d'incertitude. Dans l'objectif d'identifier les paramètres les plus influents sur la consommation énergétique, une analyse de sensibilité est ensuite effectuée. Une loi de probabilité a priori est alors définie pour ces paramètres influents et une propagation des incertitudes et variabilités est réalisée permettant de définir un modèle d'ajustement un seuil a priori de consommation dans une situation de référence. Après les travaux, la consommation réelle mesurée est ajustée pour tenir compte du climat et du comportement réel des occupants et peut être comparée à la valeur garantie.

MOTS-CLÉS : garantie de performance énergétique, analyse de sensibilité, ajustement de modèles.

ABSTRACT. Energy Performance Contracting (EPC) could become a crucial tool to support construction projects financing. The aim of this study is to provide a reliable and complete methodology integrating uncertainties quantification and consumptions adjustment to meteorological and occupancy inputs. The process is divided into four steps. Before construction or refurbishment, variation ranges characterizing uncertainty on the model inputs are defined. Then, a sensibility analysis is conducted in order to identify the most influential parameters. A prior probability density functions is set for each model input and a propagation of uncertainties enables to define an adjustment model and a prior consumption limit in typical conditions. After the project realization, bills are adjusted taking climate and occupancy into account and can be compared to the guaranteed level of energy consumption.

KEYWORDS: energy performance guarantee, sensitivity analysis, model adjustment.

1. INTRODUCTION

Les dispositifs réglementaires et législatifs font évoluer la performance énergétique des bâtiments vers la basse consommation, voire l'énergie positive. Cependant, les consommations mesurées sont souvent différentes des estimations obtenues en phase de conception. Or, une partie du financement des investissements permettant d'économiser l'énergie est liée à la performance des bâtiments (prêt accordé sous réserve d'une solvabilité accrue liée aux baisses de consommation, certificats d'économie d'énergie, etc.). Il est alors indispensable de progresser vers la garantie de performance énergétique (GPE) qui est un levier essentiel pour le financement des bâtiments performants.

2. MÉTHODOLOGIE

2.1. CARACTÉRISATION DES PARAMÈTRES INCERTAINS

Dans l'objectif de garantir une consommation énergétique, il est essentiel de prendre en considération les différentes sources d'incertitudes liées au bâtiment et à son environnement. En particulier, de nombreuses études ont montré l'impact de ces incertitudes sur les sorties des logiciels de simulation thermique dynamique permettant d'expliquer les possibles différences entre la simulation et les mesures (MacDonald 2002). Ces sources d'incertitudes peuvent être classées en quatre grandes catégories (Coakley et al. 2014). On peut tout d'abord considérer les incertitudes de spécification (des matériaux, des systèmes, de la géométrie) liées au manque d'informations sur les propriétés exactes des matériaux utilisés, sur la géométrie du bâtiment ou encore sur le fonctionnement des systèmes énergétiques. On peut également prendre en compte les incertitudes de modélisation survenant lors du développement du modèle à partir des hypothèses, approximations et simplifications considérées (zonage, simplification de la géométrie, phénomènes physiques simplifiés ou négligés, etc.) ainsi que les incertitudes de simulation introduites lors de la discrétisation et de la résolution numérique du modèle. Enfin, les incertitudes liées aux scénarios d'usage (comportement des occupants) et aux sollicitations (variations climatiques) ne doivent pas être négligées. Suite à la spécification des différentes sources d'incertitudes, une analyse de sensibilité peut être menée pour déterminer les paramètres incertains les plus influents sur la consommation énergétique.

2.2. ANALYSE DE SENSIBILITÉ

Le criblage de Morris (Morris 1991) a été retenu dans cette étude car il ne nécessite pas d'hypothèses sur le modèle, il est peu coûteux en temps de calcul et il permet de prendre en compte les interactions entre les différents paramètres (contrairement aux analyses de sensibilité locale). La méthode de Morris fait partie des méthodes dites *OAT (One At a Time)* c'est-à-dire que pour évaluer l'influence des paramètres, elle ne fait varier qu'un paramètre à la fois entre les simulations successives. Pour chaque paramètre, un effet élémentaire est alors évalué, correspondant au rapport entre la variation de la sortie du modèle et la variation du paramètre. Par la suite la moyenne des valeurs absolues des effets élémentaires μ_p^* et l'écart-type des effets σ_p associés au paramètre p sont calculés. Enfin, afin de caractériser l'influence du paramètre p sur la sortie du modèle et d'établir un classement des paramètres les plus influents sur la sortie du modèle, on définit la norme suivante :

$$D_p = \sqrt{\mu_p^*{}^2 + \sigma_p^2} \quad (1)$$

Plus cette norme est grande, plus le paramètre est influent sur le modèle. L'identification des paramètres les plus influents s'effectue sur la valeur de cette norme.

2.3. PROPAGATIONS DES INCERTITUDES ET DES VARIABILITÉS

2.3.1. Incertitudes sur les paramètres statiques

L'analyse d'incertitude vise à quantifier la variabilité des sorties du modèle induite par l'incertitude sur les facteurs d'entrée. Afin de réaliser une propagation d'incertitudes la plus réaliste possible, il est important de définir avec précision les fonctions de densité de probabilité sur les paramètres statiques influents. Ces fonctions doivent être construites à partir de différentes sources d'information disponibles hiérarchisées selon leurs origines. Par exemple, une information obtenue à partir d'une mesure sera jugée plus fiable qu'une information tirée d'une documentation. Pour les paramètres

physiques, des lois normales tronquées ou des lois uniformes sont majoritairement utilisées. A chaque simulation, un tirage est réalisé pour chaque entrée influente suivant la fonction de densité de probabilité qui y est associée.

2.3.2. Incertitudes sur les paramètres dynamiques

Les incertitudes sur les paramètres techniques et physiques ne sont pas les seules sources d'écart entre la prévision et la mesure. La variabilité des conditions climatiques et des modes d'occupation impacte fortement les niveaux de consommation (Vorger 2014). Des modèles spécifiques doivent être développés pour prendre en considération cette variabilité dans le processus de propagation des incertitudes. Un modèle de génération stochastique de séries temporelles de température extérieure est ainsi proposé dans ce document afin d'étudier l'impact sur les performances d'un bâtiment d'une variation réaliste des conditions météorologiques. Ce modèle, s'appuyant sur les travaux de Boland (1995), vise à fournir un ensemble de signaux représentatifs de la réalité et explorant l'ensemble des variations possibles. Son objectif est de décomposer la série des températures annuelles comme la somme d'un signal issu de la décomposition de Fourier discrète et d'un résidu auto-corrélé. On considère une série temporelle $f(t)$ au pas de temps horaire des températures extérieures sur une année. La transformée de Fourier discrète de cette fonction est (en considérant un jeu de N coefficients de Fourier F_n et où t_s est l'intervalle d'échantillonnage) :

$$f(t) = \sum_{k=0}^{N-1} F_n e^{2i\pi / N t_s} \quad (2)$$

Les fréquences ayant une amplitude significative sont déterminées par comparaison des modules associés à chaque mode. Les harmoniques caractéristiques de cette série temporelle sont celles de période 0, correspondant à la température moyenne annuelle, de période 1, décrivant les variations saisonnières moyennes et notamment l'écart entre l'hiver et l'été, et enfin le mode 365, caractéristique des variations journalières. En complément, les modes de période 364, 366 et 730 sont également significatifs et participent aussi à la description des tendances quotidiennes. La série temporelle reconstruite comme la somme de ces différents signaux issus de la décomposition de Fourier décrit un comportement moyenné de la température extérieure. La soustraction au signal de départ de cette série de Fourier permet d'obtenir un résidu de moyenne nulle décrivant les variations « aléatoires » des températures autour des moyennes typiques. Les différentes composantes de la série originale sont représentées sur la Figure 1.

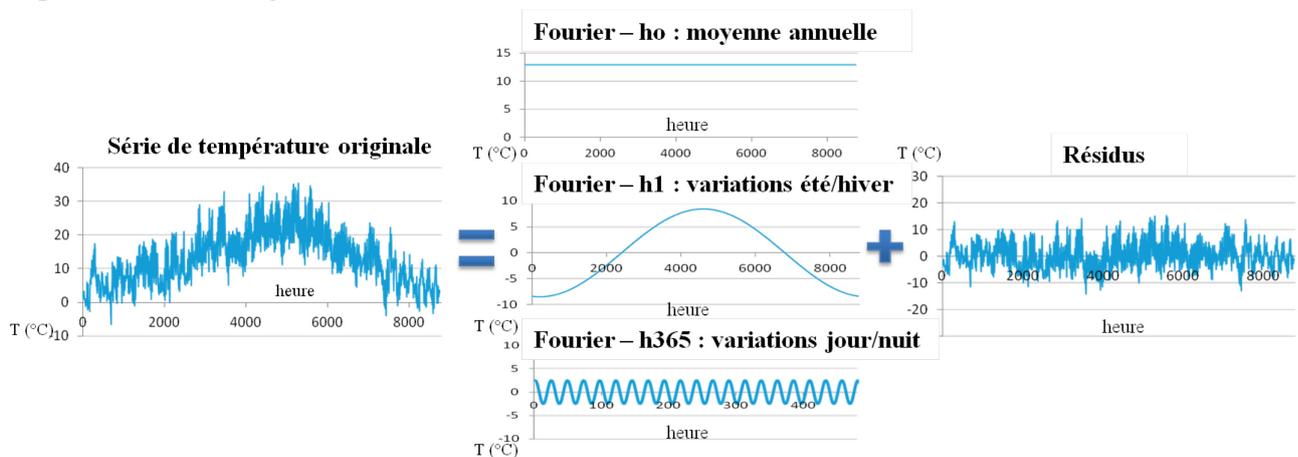


Figure 1 : Décomposition de la série des températures extérieures

La série des résidus possède une structure d'auto-corrélation pouvant être représentée par un modèle ARMA(p,q), couplage d'un processus autorégressif et d'un processus à moyenne mobile. La valeur de la série au temps t , Z_t , est décrite comme la combinaison linéaire d'un bruit blanc, ε_t , centré et de variance σ^2 , des valeurs de ce bruit blanc aux q pas de temps précédents et des p valeurs aux pas de temps précédents des éléments de la série.

$$Z_t - \varphi_1 Z_{t-1} - \dots - \varphi_p Z_{t-p} = \varepsilon_t - \theta_1 \varepsilon_{t-1} - \dots - \theta_q \varepsilon_{t-q} \quad (3)$$

Les ordres p et q du modèle ARMA ainsi que les coefficients φ_i et θ_i peuvent être déterminés suivant différents critères et tests statistiques (Robillart 2015).

La description de la série annuelle des températures comme la somme d'une série de Fourier et d'un modèle ARMA permet la génération de différentes séries semblables. En effet, en étudiant les décompositions de données de températures provenant de plusieurs dizaines d'années, une dispersion des différents coefficients de Fourier entre les années permet de définir des fonctions de densité de probabilité sur ces coefficients et de borner les variations du signal reconstruit. Un tirage aléatoire des coefficients de Fourier est alors réalisé dans ces fonctions et permet la reconstruction d'un signal auquel est ajoutée la part résiduelle générée à partir du modèle ARMA identifié. Ce modèle de génération de données de température, dont le principe général est résumé sur la Figure 2, permet d'intégrer la variabilité des conditions météorologiques et d'évaluer son impact sur les performances du bâtiment.

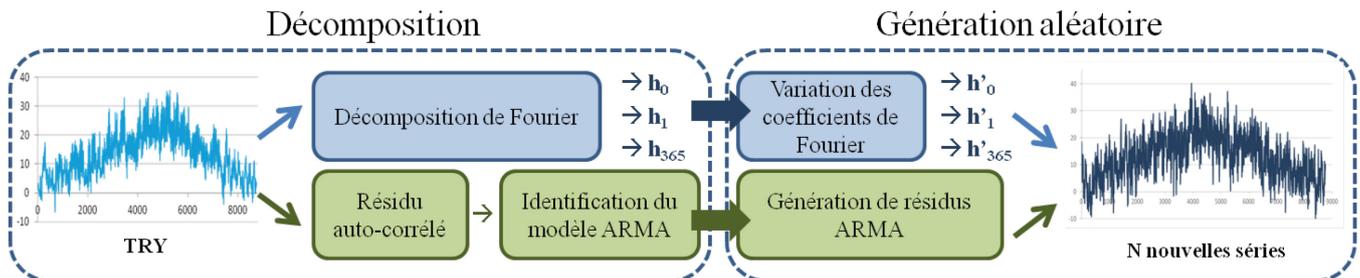


Figure 2 : Reconstruction aléatoire de séries de températures à partir de la décomposition initiale de la série de données issue du fichier météo TRY.

2.3.3. Processus de garantie de performance *a priori*

Sur la base de tirages des valeurs des paramètres statiques incertains, des générations de données météorologiques et de modes d'occupation, une propagation des incertitudes et des variabilités est réalisée suivant la méthode de Monte Carlo. Une dispersion des résultats de consommation est observée et peut être décrite par une loi normale de moyenne α et d'écart-type σ_{tot} pour un nombre suffisant de simulations. Ainsi, par la maîtrise des incertitudes sur les entrées statiques et dynamiques du modèle, on peut garantir *a priori*, pour un niveau de confiance donné, une valeur maximale des consommations d'un bâtiment.

2.4. APPORT DE LA MESURE DANS LE PROCESSUS DE GARANTIE DE PERFORMANCE

2.4.1. Choix des paramètres d'ajustement

Une modélisation réaliste de la variabilité des entrées du modèle est indispensable dans le cadre d'un processus de GPE. Dans l'objectif d'affiner la dispersion probabiliste des sorties, il est nécessaire d'apporter de la connaissance supplémentaire grâce à des mesures réalisées en phase d'exploitation du

bâtiment. La méthode présentée ici propose de prévoir, grâce aux outils de simulation, un modèle d'ajustement des consommations Y à certaines variables explicatives X_i obtenues suite à des mesures collectées après travaux. La connaissance présupposée de ces variables d'ajustement permet de s'affranchir d'une partie de l'incertitude les concernant. Le choix des grandeurs d'ajustement repose sur plusieurs facteurs. D'une part, il est intéressant d'ajuster les résultats en fonction de grandeurs dont l'incertitude impacte fortement l'écart sur les résultats, à savoir les grandeurs les plus sensibles. D'autre part, la faisabilité technique et économique de la mesure des grandeurs physiques constitue une des principales contraintes. Il est par ailleurs nécessaire de distinguer la grandeur d'ajustement, x_i , qui est une grandeur physique mesurable, et la variable explicative d'ajustement, X_i , associée à cette grandeur physique. Cette dernière agglomère l'information en une variable simple, directement exploitable dans le modèle d'ajustement. Ainsi, afin d'ajuster les consommations énergétiques à une grandeur physique mesurable, la variable explicative choisie doit présenter la meilleure corrélation possible avec la sortie du modèle. Par exemple, on pourra choisir comme variable explicative associée à la température de consigne l'écart horaire cumulé entre la température mesurée et une température de référence (DHU_{T_c}), en s'intéressant éventuellement uniquement à la période de chauffe.

2.4.2. Expression de la garantie *a posteriori* : le polynôme d'ajustement

Différents modèles d'ajustement peuvent être envisagés, associés à des niveaux de précision variables. Afin de développer une méthode susceptible d'être associée à un contrat de garantie de performance, le modèle d'ajustement retenu est un polynôme construit par régression linéaire multiple entre la sortie du modèle et les différentes variables explicatives (équation 4). Il permet une identification facilitée de l'impact des différentes grandeurs d'ajustement X_i sur les variations des consommations énergétiques Y en sortie de modèle approximées par le résultat de l'ajustement Y_{aj} . Il peut être intéressant d'adimensionner le polynôme d'ajustement en y intégrant la variation relative des variables d'ajustement par rapport à une valeur de référence, associée aux résultats de la simulation de référence dont les entrées sont les valeurs moyennes de chaque fonction de distribution associée (équation 5).

$$Y_{aj} = \alpha + \beta X_1 + \gamma X_2 + \dots \quad (4)$$

$$Y_{aj} = \alpha + \beta' \left(\frac{X_1}{X_{1-ref}} - 1 \right) + \gamma' \left(\frac{X_2}{X_{2-ref}} - 1 \right) + \dots \quad (5)$$

On constate un écart résiduel entre les résultats des simulations Y et les valeurs obtenues par ajustement Y_{aj} . Ces écarts sont répartis selon une loi normale de moyenne α et d'écart-type σ_{res} (équation 6). Les incertitudes préalablement associées aux grandeurs d'ajustement n'étant plus considérés, l'écart-type après ajustement σ_{res} est très inférieur à l'écart-type issu de la propagation d'incertitude globale σ_{tot} . La valeur de consommation garantie pour un niveau de confiance spécifié, par exemple à 95 % de confiance $Y_{g-95\%}$, s'exprime elle aussi en fonction de la sortie ajustée dans les conditions de référence Y_{aj-ref} et des caractéristiques de la distribution résiduelle (équation 7). Cette valeur garantie sera ensuite comparée à la consommation mesurée puis ajustée avec le polynôme.

$$Y = Y_{aj} + N(0, \sigma_{res}) \quad (6)$$

$$Y_{g-95\%} = Y_{aj-ref} + 1,65 \sigma_{res} ; \sigma_{res} \ll \sigma_{tot} \quad (7)$$

3. RÉSULTATS

3.1. PRÉSENTATION DU CAS D'ÉTUDE

L'objectif de l'étude est d'estimer la consommation énergétique (chauffage et production d'ECS) d'un bâtiment après des travaux de rénovation et de garantir celle-ci avec un risque acceptable (par exemple avec une probabilité de dépassement inférieure à 5 %). Le bâtiment étudié est un immeuble R+3 d'une surface habitable de 1048 m² situé à Feyzin, en banlieue sud de Lyon, comprenant 16 logements (T1, T2, T3 et T4). La rénovation concerne notamment une isolation ou une sur-isolation des parois extérieures. Le bâtiment a été modélisé, avec le logiciel Pléiades+COMFIE, en 13 zones thermiques (Figure 3), correspondant aux 4 orientations de logements pour le rez-de-chaussée, les étages courants et le dernier niveau, plus une zone non chauffée correspondant aux parties communes (escalier, paliers et local technique au rez-de-chaussée). Les détails de cette étude ainsi que les caractéristiques thermiques du bâtiment avant et après rénovation sont décrits dans le rapport d'Ajib (2015).

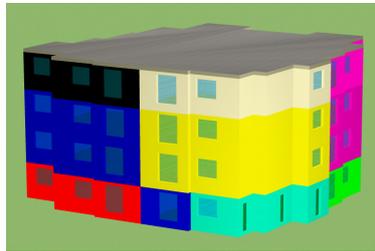


Figure 3 : Vue du bâtiment façade sud et façade est.

3.2. PARAMÈTRES INCERTAINS

Les paramètres incertains considérés sont liés au site, à l'enveloppe du bâtiment, aux occupants, à la modélisation ainsi qu'aux équipements. Dans cette étude, 39 paramètres incertains ont été identifiés. À chaque paramètre a été associée une plage d'incertitude choisie à dire d'expert et/ou basée sur la littérature scientifique. Ces plages sont centrées sur la valeur des paramètres après travaux. Si celle-ci n'est pas connue par avance, la moyenne avant travaux a alors été considérée (exemple : température de consigne, volume d'ECS, puissance dissipée, nombre d'occupants, etc.). L'incertitude considérée pour chaque paramètre est consultable dans le rapport d'Ajib (2015). Suite à l'analyse de sensibilité, 12 paramètres incertains (hors température extérieure) ont été considérés comme influents (Figure 4) et des fonctions de densité de probabilité leur ont été associées.

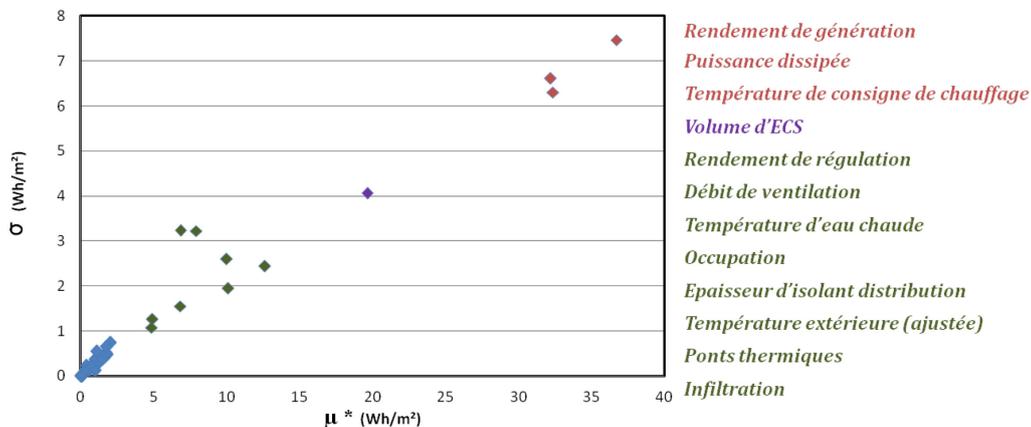


Figure 4 : Résultats de l'analyse de Morris

3.3. DÉFINITION DES VARIABLES D'AJUSTEMENT ET CONSTRUCTION DU POLYNÔME

On souhaite pouvoir ajuster les consommations de chauffage et d'ECS du bâtiment aux paramètres influents et mesurables. Des variables d'ajustement associées à ces grandeurs ont été définies, telles que le volume annuel d'ECS V_{ECS} , la consommation annuelle d'électricité $E_{elecSpé}$ ainsi que les degrés heures unifiés à base variable (consigne de température) durant la saison de chauffe DHU_{Tc} (caractérisant à la fois l'impact de la consigne de température et du climat). Ces variables d'ajustement sont alors considérées avec une incertitude plus faible. Une propagation des incertitudes et des variabilités a été réalisée par la suite, où les consommations énergétiques et les variables d'ajustement ont été calculées pour chaque simulation. Grâce à une méthode de régression linéaire multiple, un polynôme liant les consommations aux variables d'ajustement (en écart relatif par rapport aux valeurs de référence considérées dans l'estimation avant travaux) a été construit (équation 8).

$$Consommations(kWh.m^{-2}) = 105,3 + 91,1.\left(\frac{DHU_{Tc}}{DHU_{Tc-ref}} - 1\right) + 37,5.\left(\frac{V_{ECS}}{V_{ECS-ref}} - 1\right) - 16,8.\left(\frac{E_{elecSpé}}{E_{elecSpé-ref}} - 1\right) + N(0;5,2) \quad (8)$$

On constate que l'incertitude résiduelle après ajustement est assimilable à une loi normale N d'écart-type $5,2 \text{ kWh.m}^{-2}$ centrée sur une consommation moyenne de $105,3 \text{ kWh.m}^{-2}$. Ce polynôme permet ainsi de garantir, à 5 % de risque, une consommation de $113,9 \text{ kWh.m}^{-2}$ dans les conditions de référence avant travaux. Cette dernière serait de 128 kWh.m^{-2} sans variables d'ajustement. La Figure 5 présente la répartition des probabilités des consommations avec et sans variables d'ajustement.

Les mesures effectuées pendant un an après la rénovation font état d'un DHU_{Tc} supérieur de 9,5% à la référence (hausse moyenne de la température de consigne de $1,5^\circ\text{C}$ et hiver plus rigoureux) et d'une consommation d'ECS inférieure de 29 % à celle prévue. Les consommations d'électricité spécifique sont similaires à la simulation de référence. Grâce à ces mesures et au polynôme d'ajustement, il est possible d'ajuster la consommation réelle ($109 \text{ kWh/m}^2/\text{an}$). On obtient ainsi une consommation ajustée de $111,6 \text{ kWh.m}^{-2}$. La valeur garantie de $113,9 \text{ kWh.m}^{-2}$ est supérieure à la consommation ajustée et l'on satisfait donc à la garantie. Il serait intéressant de répéter la méthode d'ajustement sur une autre année pour voir si la consommation mesurée puis ajustée se situerait aussi dans la plage haute de la répartition probable des consommations.

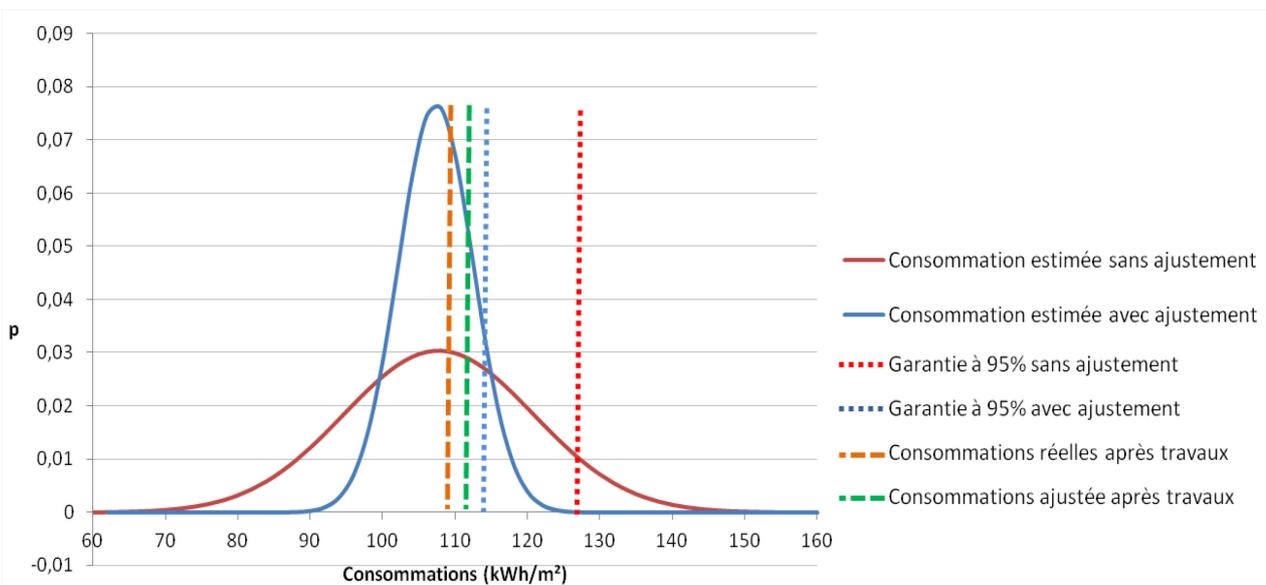


Figure 5 : Répartition des consommations avec et sans ajustement

4. CONCLUSION

Progresser vers la garantie de performance énergétique impose une grande maîtrise des entrées associées aux modèles de simulation des bâtiments. Dans l'objectif d'explorer les sources d'incertitudes et de variabilité des conditions de fonctionnement du bâtiment, une méthodologie a été élaborée : en complément des outils de propagation des incertitudes sur les paramètres statiques, un modèle de génération stochastique de fichiers de données de température extérieure a été développé afin d'étudier l'influence de la variabilité de la météorologie sur les consommations. La construction d'un modèle d'ajustement corrélant la consommation garantie à des variables explicatives (estimées par des mesures sur site) permet de limiter la dispersion des consommations et donc l'incertitude sur les performances énergétiques. Ces variables explicatives sont associées à des grandeurs mesurables liées aux conditions météorologiques et aux modes d'occupation, principaux facteurs d'écart entre simulations et retours d'expérience. Le métamodèle d'ajustement peut ainsi prendre la forme d'un polynôme facilement compréhensible et intégrable à un contrat de garantie de performance énergétique. En perspective du travail présenté, un développement méthodologique est nécessaire sur la collecte de données pour la spécification des fonctions de densité de probabilité des paramètres incertains influents. Le module de génération de données météorologiques doit également intégrer une génération d'autres grandeurs corrélées, telles que le rayonnement solaire. Enfin, une étude est à mener pour évaluer les interdépendances entre la méthode présentée et la spécification du plan de mesures et notamment l'intégration des incertitudes de mesure dans le processus d'ajustement.

Remerciements :

Ce travail a été supporté par le projet ANR OMEGA et la chaire Paristech-VINCI *Eco-conception des ensembles bâtis et des infrastructures*.

5. BIBLIOGRAPHIE

- Ajib, B.. 2015. « Etude d'une méthodologie pour la garantie de la performance énergétique des bâtiments ». Mémoire de master, Université Pierre et Marie Curie.
- Boland, J.. 1995. « Time-series analysis of climatic variables ». *Solar Energy* 55 (5): 377-88. doi:10.1016/0038-092X(95)00059-Z.
- Coakley, D., P. Raftery, et M. Keane. 2014. « A review of methods to match building energy simulation models to measured data ». *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 37 (septembre): 123-41. doi:10.1016/j.rser.2014.05.007.
- MacDonald, I. A.. 2002. « Quantifying the effects of uncertainty in building simulation ». PhD Thesis, University of Strathclyde, 267 p.
- Morris, M. D. 1991. « Factorial Sampling Plans for Preliminary Computational Experiments ». *Technometrics* 33 (2): 161-74. doi:10.1080/00401706.1991.10484804.
- Robillart, M.. 2015. « Etude de stratégies de gestion en temps réel pour des bâtiments énergétiquement performants ». Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, 258 p.
- 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, 474 p.

Caractérisation multi-échelle du climat de la Polynésie française pour la simulation dynamique de bâtiments

Franck Lucas*¹, Marania Hopuare, Charlotte Besnard, Pascal Ortega² des auteurs

¹ Laboratoire Géopole du Pacifique Sud (GEPASUD) Université de Polynésie Française / Laboratoire PIMENT Université de La Réunion

² Laboratoire Géopole du Pacifique Sud (GEPASUD) Université de Polynésie Française adresse de l'entité,

*franck.lucas@upf.pf

RESUME.

L'évaluation des performances des bâtiments en climat tropical nécessite des fichiers de données météorologiques annuelles pour une « approche énergétique » des bâtiments climatisés. Elle nécessite aussi des séquences climatiques localisées permettant une réelle estimation du potentiel de ventilation naturelle des sites pour une approche « confort » des bâtiments non climatisés. L'absence de ce type de données climatiques actuellement en Polynésie limite considérablement les moyens d'analyse des concepteurs. Cet article présente deux méthodes permettant de constituer des séquences climatiques. La première permet d'élaborer des fichiers météorologiques annuels types à partir d'un nombre réduit de mesures au sol. Les variables météorologiques manquantes sont complétées à l'aide d'un modèle original de décomposition du rayonnement solaire. La deuxième est basée sur l'utilisation d'un modèle de climat et d'une descente d'échelle pour obtenir une caractérisation du potentiel de ventilation naturelle local et des données à fine résolution.

MOTS-CLÉS : données météorologiques, climat, simulations

ABSTRACT.

Performance assessment of buildings in tropical climates requires annual meteorological data files for an "energy approach" of air-conditioned buildings. It also requires localized climatic sequences allowing a real estimation of the natural ventilation potential of the sites for a "comfort" approach of non-air-conditioned buildings. The absence of this type of weather data in Polynesia considerably limits designer analysis means. This article presents two methods to establish meteorological sequences. The first allows developing annual typical weather files from a reduced number of ground measurements. The missing meteorological variables are completed using a decomposition model of the solar radiation. The second is based on a climate model and a downscaling to obtain a characterization of local natural ventilation potential and low resolution data.

KEYWORDS : Weather data, climate, simulation.

1. INTRODUCTION

Les outils de simulation thermique dynamiques (STD) permettent des études de conception de bâtiment sur des pas de temps réduits, de l'ordre de l'heure, voire moins. Néanmoins, il existe des écarts non négligeables entre les performances énergétiques des bâtiments prédites en phase étude et les valeurs constatées en phase exploitation. Spitz (Spitz 2012) note que la qualité des données météorologiques utilisées lors des simulations numériques est une source d'erreur importante pouvant provoquer des écarts allant jusqu'à 30% sur l'estimation de la consommation d'un système de

traitement d'air. Plusieurs types de données peuvent être utilisés par les bureaux d'études pour la conception des bâtiments :

- 1) les bases de données « multi-années » : elles rassemblent toutes les données météorologiques nécessaires à la simulation des bâtiments et ce sur plusieurs années. Elles peuvent être compliquées à générer et à utiliser du fait du grand nombre de valeurs qu'elles comportent. Exemple : base de données SAMSON de 1961 à 1990 (NCDC 1993).
- 2) les fichiers annuels météorologiques types : les plus couramment utilisées pour estimer les performances moyennes d'un bâtiment. Exemple: Typical Meteorological Year (TMY), Weather Year for Energy Calculation (WYEC), Test Reference Year (TRY)....
- 3) les séquences météorologiques courtes représentatives : Elles sont utilisées pour étudier des conditions météorologiques extrêmes, des conditions météorologiques localisées, des solutions techniques de conception particulières ou le dimensionnement de composants de bâtiments (Séquences « design day» pour le dimensionnement des systèmes de conditionnement d'air).

Parmi les mesures de réduction de la consommation électrique envisagée en Polynésie française, une réglementation énergétique visant des objectifs de résultats pour les bâtiments climatisés et les bâtiments ventilés naturellement est en cours d'élaboration. Dans ces deux cas, des données météorologiques spécifiques sont nécessaires. Les séquences météorologiques annuelles pour une approche énergétique permettront d'évaluer la consommation des bâtiments climatisés. Des séquences spécifiques courtes permettront une évaluation qualitative du confort pour les bâtiments ventilés. Cet article présente l'étude permettant de constituer ces deux types de données météorologiques pour la Polynésie française. La première partie aborde la génération d'années climatiques types destinées à l'approche énergétique de la conception des bâtiments en choisissant une méthode utilisant une base de données météorologiques réduite. La méthode nécessite un post traitement des mesures au sol de Météo France qui est détaillé. Pour l'approche « confort », il est nécessaire de tenir compte de la forte variabilité spatiale des sollicitations. Dans la deuxième partie, l'utilisation d'un modèle dit de méso-échelle, capable de réaliser un « zoom » sur une région d'intérêt à haute résolution permet d'obtenir des données climatiques sur une maille fine (de l'ordre de 1,3 km) compatible avec les besoins de la simulation dynamique de bâtiments fonctionnant en ventilation naturelle.

2. FICHIERS METEOROLOGIQUES ANNUELS TYPES

2.1. CONSTITUTION DU FICHIER

En préparation de la mise en application d'une réglementation énergétique en Polynésie française, les séquences qui paraissent le plus importants et le plus urgent à constituer sont les fichiers annuels météorologiques types. Ce sont les séquences qui sont aussi le plus souvent utilisées par les concepteurs de bâtiments (bureaux d'études, architectes, assistants à maître d'ouvrage...). Elles rassemblent toutes les variables climatiques importantes pour la simulation dynamique des bâtiments au pas de temps horaire et pour une durée d'un an. Il existe plusieurs possibilités pour obtenir ce type de séquence. La première possibilité dite des « années météorologiques types », est basée sur la sélection de mois représentatifs pris dans une base données élaborée avec des mesures au sol sur des périodes longues (entre 10 et 30 ans). Les bases de données sont généralement obtenues auprès de

Météo France dans le cadre de conventions institutionnelles. Les premiers 80 000 points (correspondant à 200 000 valeurs numériques) sont obtenus gratuitement pour les institutions. Au-delà les données sont facturées. La deuxième méthode est basée sur l'utilisation de modèles stochastiques qui génèrent des séries temporelles de données climatiques par extrapolation de données mesurées par des stations au sol. Ces outils sont souvent appelés des « générateurs de climats ». Développée par des laboratoires de recherche depuis des années 80 (Van Passen 1979), (Knight 1990), (Adelard 2000), ces méthodes ont été reprises par des prestataires privés pour une diffusion commerciale. Parmi eux, par exemple Météonorm est très utilisé par les maîtres d'œuvre.

La méthode des années météorologiques types est la plus répandue et s'est développée sous plusieurs formats dont les principaux sont :

- TRY (Test Reference Year) : Un des premiers formats de données météo, développé en 1976. Ce format est à l'origine des autres formats ci-dessous.
- TMY (Typical Meteorological Year) développé à partir du format TRY en y ajoutant notamment des données d'ensoleillement global horizontal. Le format TMY élaboré à partir de données prises sur les périodes de 1945 à 1973 a évolué en TMY2. Cette nouvelle base de données tient compte de données météorologiques supplémentaires telles que le rayonnement solaire direct puis en format TMY3 basées sur des données climatiques plus récentes (de 1961 à 1990). Les données TMY3 prennent en considération des années encore plus récentes allant jusqu'à 2005.
- WYEC, (Weather Year for Energy Calculation) développé par ASHRAE. Comme pour le format TMY, la version WYEC2 a été réalisée à partir du format WYEC en ajoutant des variables supplémentaires, notamment pour la caractérisation de l'éclairage naturel.

L'étude réalisée aux Etats Unis par Drury (Drury 1998) analyse les prévisions de performances d'un bâtiment en fonction du type de fichier météorologique utilisé et les compare à des simulations faites à partir de données réelles collectées sur 30 ans. Il note que les données climatiques utilisées en simulation dynamique de bâtiments peuvent avoir une influence non négligeable sur les prévisions des performances énergétiques des bâtiments et conclut en préconisant l'utilisation des formats TMY2 (et TMY3) ainsi que le WYEC2. Ces deux types de fichiers sont élaborés en sélectionnant le mois i de l'année le plus représentatif parmi les mois i de la base de données disponible. La différence entre les fichiers TMY et WYEC vient du mode de sélection du mois représentatif. Pour les fichiers TMY, Hall (Hall 1978) présente une méthode de sélection du mois représentatif en analysant 4 variables climatiques (rayonnement solaire global, température sèche d'air, température de bulbe humide, vitesse de vent) complétées par des valeurs journalières minimale, maximale moyenne et totale de ces variables. Il faut au final 9 variables pour le processus de sélection. Chacune de ces variables est pondérée en fonction de son importance sur le comportement des bâtiments. La méthode statistique de Finkelstein-Shäffer permet ensuite de sélectionner chaque mois représentatif dans la base de données. Le choix de la pondération de chaque paramètre a donné lieu à plusieurs variantes de la méthode (Hall 1978), (Yang 2007), (Yang 2011). Les inconvénients de cette méthode est que le processus de pondération peut paraître subjectif, mais surtout, elle nécessite un grand nombre de valeurs dans la base de données de sélection, (plus d'1 million de valeurs soit 420 000 points, juste pour le processus de sélection). Crow (Crow 1984) a développé une méthode d'élaboration d'années météorologiques types nécessitant une base de données plus réduite pour la sélection des mois représentatifs car basée

uniquement sur l'étude de la température sèche d'air. Les mois représentatifs choisis sont ceux dont la moyenne mensuelle de la température sèche est située dans un intervalle de ± 0.3 °C de la moyenne mensuelle sur toute la base de données. Il suffit de choisir le mois de l'année correspondant à la valeur minimum de dx donné par :

$$dx = \left| \bar{T}_x^i - \bar{T}^i \right| \quad \text{avec :}$$

\bar{T}_x^i : Moyenne mensuelle des températures pour le mois i de l'année x .

\bar{T}^i : Moyenne mensuelle des températures de tous les mois i sur l'ensemble de la base de données.

Le processus de sélection s'effectue en utilisant uniquement les valeurs de températures moyennes mensuelles sur un période de 10 à 30 ans. Une fois la sélection opérée, l'année météorologique type est constituée en ne sollicitant auprès de Météo France que les valeurs horaires des principales variables climatiques pour chaque mois représentatif. Le nombre de valeurs total nécessaires pour le processus de sélection est de 360 et le fichier est constitué par moins de 44 000 valeurs. Sur une base de données comprise entre 1997 et 2007, l'année météorologique type pour la Polynésie française a été constituée par les mois donnés dans le tableau ci-dessous :

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Année	2006	2002	2001	1998	1997	1998	1999	1998	2001	1998	2004	1999

Tableau 1 : sélection des mois de l'année météorologique type.

Les données météorologiques sollicitées auprès de Météo France sont les valeurs horaires des variables suivantes : Température sèche d'air, humidité relative, vitesse du vent, orientation du vent, rayonnement global horizontal. Cependant, le rayonnement diffus horizontal n'a pas été mesuré en continu par Météo France en Polynésie et il ne l'est plus depuis 2006, il est donc nécessaire de l'évaluer par des modèles, à partir des autres variables disponibles.

2.2. POST TRAITEMENT DES DONNEES : DECOMPOSITION DU RAYONNEMENT GLOBAL

La constitution d'un fichier météorologique annuel type nécessite de décomposer le rayonnement global horizon en composante directe et diffuse. Il est pour cela nécessaire d'identifier un modèle de décomposition adapté au climat de la Polynésie. Un certain nombre de modèles sont disponibles dans la littérature. Ils sont généralement basés sur l'utilisation de l'indice de clarté K_t et de l'indice de fraction diffuse K_d donnés par :

$$K_t = \frac{I_{Gh}}{I_{Go}} \quad \text{et} \quad K_d = \frac{I_{Dh}}{I_{Gh}}$$

Où I_{Gh} est l'irradiation solaire globale horizontale, I_{Go} est l'irradiation solaire extraterrestre, I_{Dh} est l'irradiation solaire diffuse sur un plan horizontal et I_{Gh} est l'irradiation solaire totale sur un plan horizontal.

Parmi les modèles disponibles, une présélection de 5 modèles mathématiques a été faite, avec les modèles d'Orgill & Hollands (Orgill 1977), Lam and Li (Lam 1996), Erbs (Erbs 1982), Reindl (Reindl 1990) ainsi que le modèle DIRINT de Perez (Perez 1992). Un modèle supplémentaire dérivé d'une corrélation établie par Météo France Nouvelle Calédonie a été établi dans le cadre de cette

étude. Désigné « modèle PF », son intérêt est d'être simple et valable sur l'ensemble de l'intervalle $0 < k_t < 1$. Il est donné par :

$$k_d = \frac{1}{1 + \exp(c_0 k_t + c_1)}$$

Les mesures de rayonnement global et diffus des années 1993, 1997, 1998 et 1999 ont été préalablement filtrées par la méthode du BSRN (Long 2002) et utilisées pour déterminer c_0 et c_1 par la méthode des moindres. Les valeurs obtenues sont : $c_0 = 7,122$ et $c_1 = -3,511$.

La comparaison des mesures, pour les années où le rayonnement diffus est disponible (1993, 1997, 1998, 1999), avec les prédictions des différents modèles est donnée au tableau ci-dessous, exprimée par la valeur de l'erreur quadratique moyenne relative (rRMSE).

rRMSE (%)	Erbs	Lam & Li	Reindl	Orgill & Hollands	Perez	Modèle PF
1993	43,0	37,7	43,6	44,3	42,6	32,0
1997	38,0	35,0	39,4	39,8	37,9	27,6
1998	37,3	32,0	38,7	38,8	37,2	25,7
1999	46,4	39,7	48,0	48,2	46,1	30,9
moyenne	41,175	36,1	42,425	42,775	40,95	29,05

Tableau 2 : Comparaison des erreurs quadratiques moyennes relatives pour les différents modèles.

Les erreurs obtenues restent élevées pour l'ensemble des modèles mais conformes à celles trouvées dans la littérature. Le modèle PF a des caractéristiques intéressantes : il donne une bonne prévision de la décomposition du rayonnement solaire global en diffus et apparaît très simple d'utilisation pour les maîtres d'œuvre car il ne nécessite pas d'environnement de programmation. Il a permis d'établir le fichier météorologique type pour la Polynésie pour les années ne disposant pas de mesures de rayonnement diffus. Une correction des mesures du rayonnement diffus faites par un pyranomètre à anneau suivant les méthodes proposées par Tapachès (Tapachès 2015) devrait permettre de diminuer la valeur de l'erreur sans modifier le modèle.

3. EXTRAPOLATION DE DONNEES METEOROLOGIQUE PAR MODELE DE CLIMAT A MESO ECHELLE.

Les modèles climatiques sont une représentation numérique du système climatique fondée sur les propriétés physiques, chimiques et biologiques de ses composantes et sur leurs processus d'interaction. Il permet de calculer l'ensemble des paramètres climatiques avec une résolution spatiale très fine. Le modèle de climat WRF (Skamarock 2008) utilisé dans cette étude s'apparente à un modèle de prévision numérique du temps, comme ceux utilisés par les prévisionnistes de Météo France. WRF est un modèle non-hydrostatique à aire limitée permettant de faire un zoom sur une région particulière. A l'intérieur même de la zone d'intérêt on peut implémenter d'autres domaines plus petits dans lesquels la résolution peut être augmentée. On obtient ce qu'on appelle une "cascade de descente d'échelle" de 20 km de résolution, puis 4 km jusqu'à atteindre la résolution spatiale voulue (1,33 km) dans le dernier domaine qui est centré sur la région d'étude (Tahiti). L'utilisation d'un modèle méso échelle (maillage spatial de l'ordre de 10 km, maillage temporelle de l'ordre de l'heure) permet l'élaboration de séquences météorologiques courtes représentatives afin de traiter des problématiques de conception particulières. Cette étude présente l'analyse spécifique faite sur les régimes de vents à Tahiti dans l'objectif de caractériser le potentiel de ventilation naturelle des bâtiments à fine échelle.

3.1. IDENTIFICATION DES REGIMES DE VENTS DOMINANTS A TAHITI

Dans un premier temps les données de réanalyses Era Interim (résolution de 20 km) ont été traitées pour identifier les régimes de vents les plus fréquents à Tahiti. Une méthode statistique sur une série temporelle de 20 années (1979 à 2009) a permis d'isoler six régimes principaux présentés à la Figure 1.

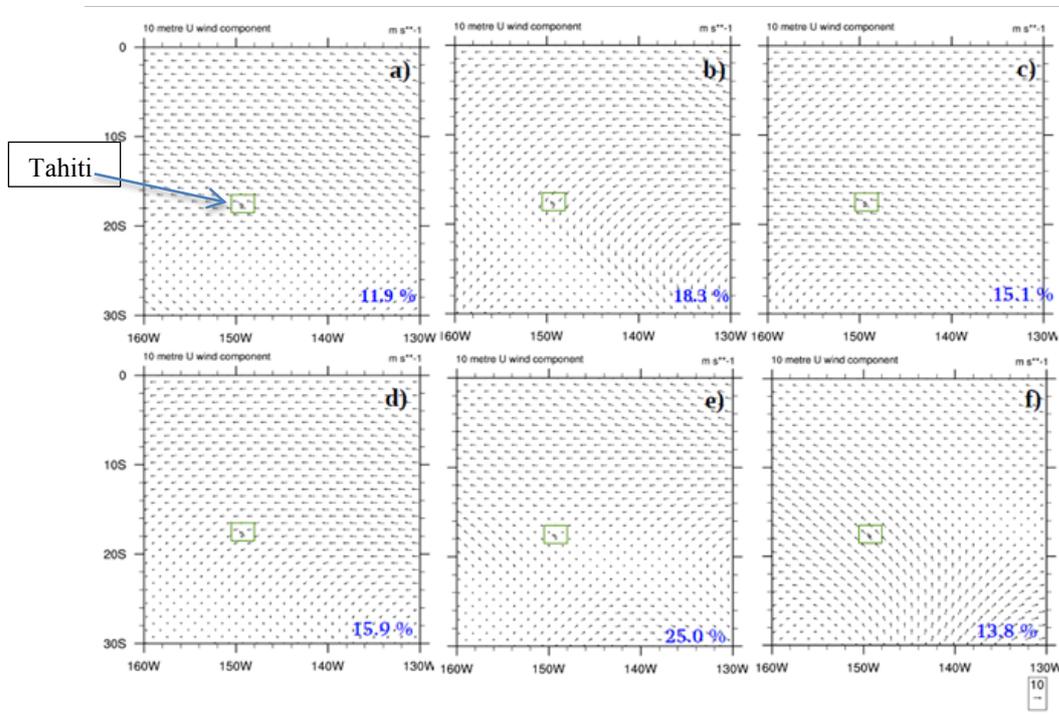


Figure 1 : Régimes de vents (de a à f) en Polynésie avec fréquences d'occurrence en pourcentage.

3.2. DESCENTE D'ECHELLE

Les données de réanalyses Era Interim pour cinq dates correspondant à chacun des six régimes de vent ont été récupérées et appliquées comme conditions au bord du domaine WRF afin d'obtenir une résolution plus fine. On dispose ainsi de 5 journées simulées pour chacun des régimes. La carte de vent pour chaque régime à 1,3 km de résolution est obtenue en faisant la moyenne sur les cinq journées. La prise en compte du relief est indispensable pour les petites échelles. La Figure 2 présente la description orographique prise en compte par le modèle. Le niveau de description du relief reste grossier puisque l'altitude maximum prise en compte est de 1200m alors que le point culminant est en réalité à 2240 m. Cependant une finesse plus grande nécessite des temps de calcul très importants.

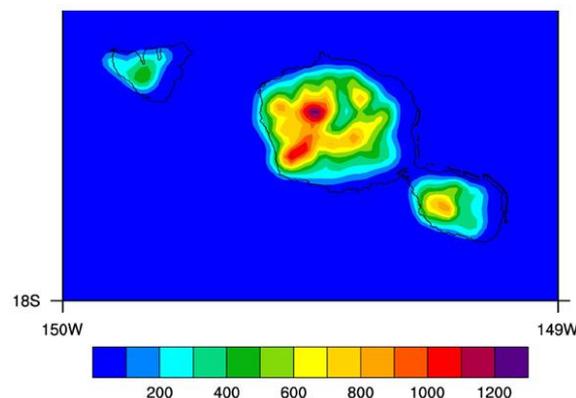


Figure 2 : Relief implémenté dans le modèle WRF

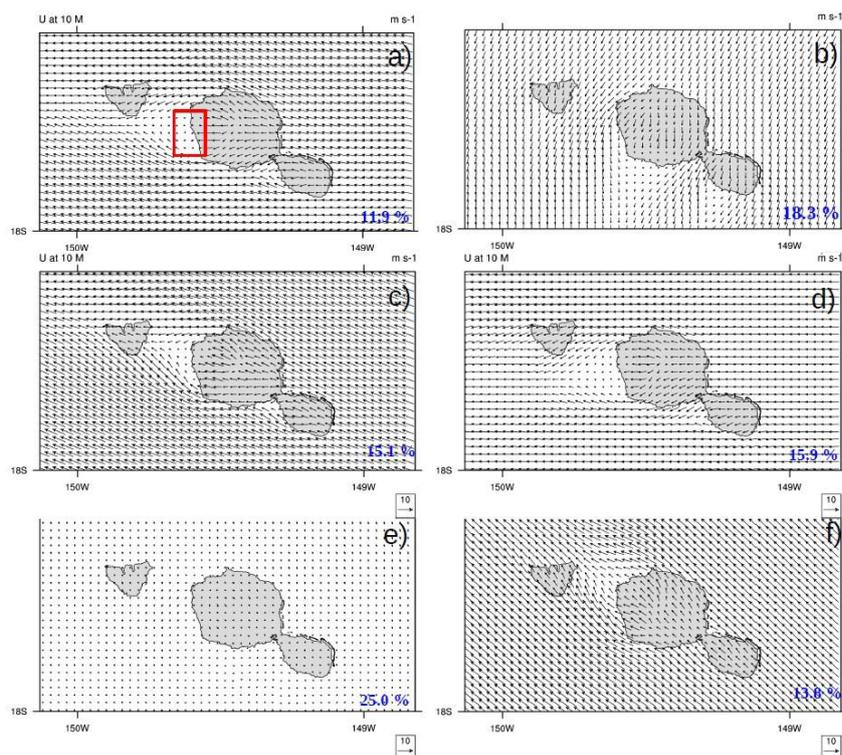


Figure 3 : Régimes de vents à 1.3 km de résolution simulés avec le modèle WRF (issues des six régimes de vent de la réanalyse Era Interim)

La descente d'échelle avec WRF a permis d'obtenir des cartes de vent plus précises et fiables, mettant en avant le contraste au vent/sous le vent pour les régimes de vent d'est et de nord-est déjà bien connu localement mais impossible à visualiser avec les relevés de l'unique station météo installée sur Tahiti. Cette étude a mis en évidence le potentiel de ventilation naturelle sur toute l'île de Tahiti en identifiant pour chaque côte les pourcentages de temps avec vent faible (< 2,5 m/s), vent modéré (2,5 < vent < 11 m/s) et vent fort (> 11 m/s). Les résultats sont les suivants :

- Côte Nord et Est : vent faible 25 % , vent modéré 34,2 %; vent fort 40,8 %
- Côte Sud : vent faible 43,3 % , vent modéré 15,9 %; vent fort 40,8 % -
- Côte Ouest : vent faible 67,9 % , vent modéré 13,8 %; vent fort 19,3 %

La validation des prédictions à fine échelle a été réalisée en comparant ses résultats aux données de l'unique station météorologique de Météo France à Tahiti. La station est située à Faa'a sur la côte nord-ouest. Pour le régime C, une simulation plus longue a été lancée dans le but de la comparer avec les données réellement observées à la station de Faa'a sur une période commune, du 16 au 20 janvier 2001. L'objectif est d'évaluer la capacité du modèle à produire des variations journalières de température et de vent les plus proches possibles de celles qui sont observées à la station de Faa'a. La Figure 4 montre les points de la grille pour la résolution à 1,33 km autour de la station météorologique de Faa'a. Les points bleus représentent les points de mer, les croix vertes les points à terre. L'astérisque rouge indique la station de Faa'a. Si on étudie les valeurs des températures, le point de grille le plus proche de la station de Faa'a (point 1) est le mieux corrélé : (0,65). En revanche pour le vent, le point de grille le mieux corrélé (0,46) est situé au sud-ouest de la station, en mer (point 2). L'erreur quadratique moyenne est de 2°C pour la température et de 2,4 m/s pour le vent zonal à 10 m.

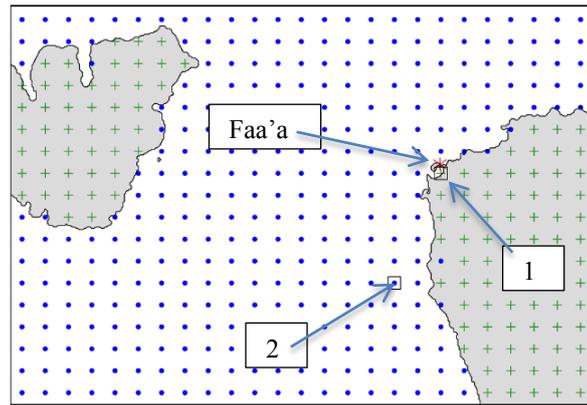


Figure 4 : Grille du modèle (1.33 km de résolution) zoomée sur la partie nord-est de Tahiti.

Les séries chronologiques de température à 10 m, de direction et de vitesse du vent mesurées à Faa'a et celles obtenues par le modèle en deux points de grille sont présentées à la Figure 5.

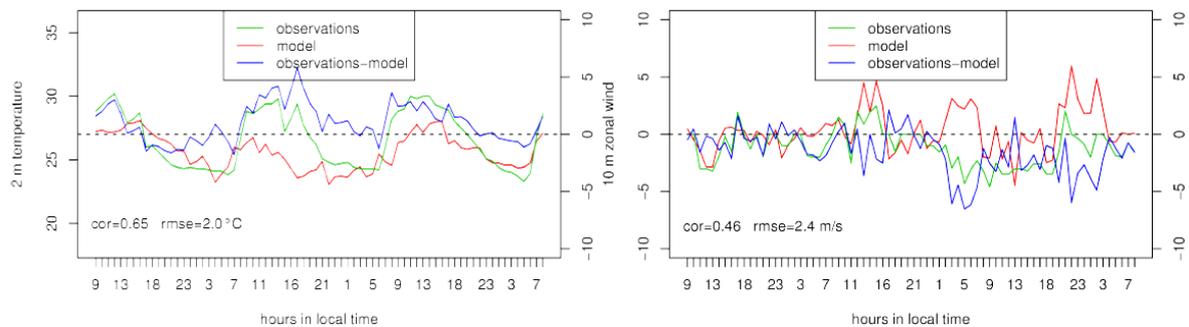


Figure 5: Séries temporelles de température (gauche) et vent (droite).

Sur les évolutions temporelles présentées, le résidu maximum sur la température et le vent sont respectivement 5°C et 6 m/s. Ces valeurs importantes s'expliquent en partie puisque les variables d'entrée du modèle méso échelle sont, elles même, issues d'un modèle de prévisions numériques (réanalyse Era Interim). De plus, la faible précision du relief implémenté dans WRF explique aussi une bonne partie des écarts. En effet, le point de grille le plus proche de la station se trouve à une altitude de 117 m alors que la station de Faa'a n'est en réalité qu'à 2 m d'altitude. De même, le point de grille le mieux corrélé avec le vent zonal (point 2) est normalement situé en mer mais apparaît à une altitude de 67 m à cause des effets de lissage de la description orographique.

4. CONCLUSIONS

La génération de données météorologiques adaptées constitue un premier outil d'aide à la décision pour les concepteurs. En Polynésie, ce type d'outil fait cruellement défaut. Cet article présente les méthodes utilisées pour obtenir des données climatiques permettant d'aborder la conception dans une approche énergétique et une approche qualitative du confort. Pour l'approche énergétique, la méthode présentée permet de constituer une année météorologique type à partir d'une base de données réduite. Pour constituer cette année type et compléter les mesures météorologiques au sol, un modèle de décomposition du rayonnement global a été élaboré. Ce modèle présente des performances intéressantes car il est simple d'utilisation pour les maîtres d'œuvre et de précision satisfaisante. Parallèlement pour permettre des analyses qualitatives du confort dans les bâtiments ventilés naturellement, l'utilisation d'un modèle de climat a mis en évidence 6 régimes de vent principaux à

Tahiti. La diminution de l'échelle de ce modèle a permis d'élaborer une cartographie des 6 régimes de vent sur une maille de 1,33 km. La précision des prévisions est pour l'instant limitée par une prise en compte trop grossière du relief. Une amélioration du modèle nécessitant des moyens et des temps de calcul plus importants est en cours.

5. BIBLIOGRAPHIE

- Adelard L., Boyer H., Garde F., Gatina J.-C. 2000. Detailed weather data generator for building simulations. *Energy and Buildings*. 31, 1. 75-88
- Erbs, D.G., S.A. Klein, and J.A. Duffie. 1982. "Estimation of the diffuse radiation fraction hourly, daily, and monthly-average global radiation". *Solar Energy*, Vol. 28, No. 4, pp. 293–304.
- Hall IJ, Prairie RR, Anderson HE, Boes EC. 1978. Generation of typical meteorological years for 26 SOLMET stations. SAND 78e1601. Albuquerque, New Mexico: Sandia National Laboratories;
- Knight K.M., Klein S.A., Duffie J.A. 1991 « A methodology for the synthesis of hourly data », *Solar Energy*, Vol. 46, N°2, pp.109-120.
- Lam JC, Li DHW. 1996. "Correlation between global solar-radiation and its direct and diffuse components." *Building and Environment* ; 31(6):527–35
- Liu Yang, Kevin K.W. Wan, Danny H.W. Li, Joseph C. Lam. 2011. "A new method to develop typical weather years in different climates for building energy use studies". *Energy* 36. 6121-6129
- Long, CN, and EG Dutton. 2002. "BSRN Global Network Recommended QC Tests, V2. X." http://epic.awi.de/30083/1/BSRN_recommended_QC_tests_V2.pdf
- NCDC (1993). Solar and Meteorological Surface Observation Network, 1961-1990, Version 1.0, September 1993. Asheville, North Carolina: National Climatic Data Center, U.S. Department of Commerce.
- Orgill, J.F., and K.G. Hollands. 1977. "Correlation equation for hourly diffuse radiation on a horizontal surface". *Solar Energy* 19, Vol. 4, pp. 357–359.
- Perez, R., P. Ineichen, E. Maxwell, R. Seals, and A. Zelenka. 1992. "Dynamic global-to-direct irradiance conversion models". *ASHRAE Transactions Research*, 3578(RP-644), pp. 354–369.
- Reindl D.T., Beckman W.A., and Duffie J.A.. "Diffuse fraction correlations ». *Solar Energy*, 45:1–7, 1990
- Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. O., Barker, D. M., Duda, M. G., ... & Powers, J. G. (2008). A description of the Advanced Research WRF Version 3, NCAR technical note, Mesoscale and Microscale Meteorology Division. National Center for Atmospheric Research, Boulder, Colorado, USA
- Spitz C. Analyse de la fiabilité des outils de simulation et des incertitudes de métrologie appliquée à l'efficacité énergétique des bâtiments. Other. Université de Grenoble, 2012. French. <NNT : 2012GRENA004 >. <tel-00768506 >
- Tapachès, Emeric. 2015. « Estimation du Potentiel de la Technologie Solaire Thermodynamique à Concentration en Climat Non Désertique - Application à La Réunion ». Thèse de doctorat, Université de La Réunion.
- Van Paasen A. H. C., Dejoing A. G. 1979. « The Synthetical Rference outdoor climate ». *Energy and Buildings*. Vol (2). P 151-161.
- Yang L, Lam JC, Liu J. 2007. « An analysis of the typical meteorological years in different climates in China ». *Energy Convers Manage*. 48:654-68.

Etude numérique de l'impact des îlots de fraîcheur urbains sur le confort du piéton – Application à l'aménagement du quartier de Montaudran à Toulouse

Tathiane Martins¹, Stéphane Ginestet^{1,*}, Luc Adolphe², Marion Bonhomme², Serge Faraut², Frédéric Bonneaud², Charlotte Michel²

¹ LMDC (Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions de Toulouse) Université de Toulouse, INSA, UPS, 135, avenue de Rangueil, 31 077 Toulouse Cedex 4, France
*stephane.ginestet@insa-toulouse.fr

² LRA (Laboratoire de Recherche en Architecture), ENSA, 83 Rue Aristide Maillol, 31106 Toulouse, France

RESUME. Les modes d'urbanisation actuels sont marqués par des changements importants dans l'occupation des surfaces naturelles ainsi que dans la morphologie des constructions. Ces paramètres modifient fortement l'environnement et conduisent à un nouveau climat d'origine humaine. Ce climat urbain modifié affecte la qualité environnementale des espaces, en particulier dans des conditions estivales, entraînant notamment un stress thermique pour l'homme, et parfois une augmentation significative de la demande d'énergie dans les bâtiments. Ce processus d'urbanisation intensive amène à relever les nouveaux défis de l'adaptation des zones urbaines existantes et nouvelles au changement climatique, ce qui nécessite l'intégration de mesures décisives dès les premières étapes du processus de conception urbaine. Le projet IFU («îlots de fraîcheur urbains») est un projet de recherche national français qui a permis d'évaluer au moyen de la simulation, différentes stratégies de rafraîchissement, et ce à l'échelle urbaine. Le logiciel ENVI-Met® a été mis à profit pour étudier l'adaptation au changement climatique du quartier de Montaudran dans le Sud-Est de la ville de Toulouse. Ce quartier de 56 ha fait actuellement l'objet d'un réaménagement très important autour de l'ancienne piste de l'Aéropostale, avec la création de nombreux logements, commerces, bureaux, et locaux universitaires.

Les résultats numériques mettent en avant l'influence majeure de la présence de plans d'eau et d'une forte densité de végétation sur l'atténuation des îlots de chaleur urbains, notamment dans la journée. La simulation a aussi permis de prédire le confort du piéton et de proposer au maître d'ouvrage des solutions pour l'améliorer, comme l'augmentation de la densité de la végétation tout au long de l'ancienne piste de l'Aéropostale.

MOTS-CLÉS : simulation microclimat urbain, îlots de fraîcheur urbains, confort thermique du piéton, ENVI-Met

ABSTRACT. The current urbanization ways involve significant changes in the occupation of natural surfaces and in the buildings morphology. These parameters greatly affect the environment and lead to a new climate of human origin. This modified urban climate affects the environmental quality of spaces, especially in summer conditions, resulting notably heat stress for man, and sometimes a significant increase in energy demand in buildings. This intensive urbanization process leads to the new challenges of adapting existing and new urban areas to climate change, which requires the integration of action in the early stages of the urban design process. The IFU project ("urban cool islands") is a French national research project that assessed through simulation, different cooling strategies at the urban scale. The ENVI-Met® software was used to study the climate adaptation of Montaudran neighborhood in the southeast of the city of Toulouse. This area of 56 ha is currently the subject of a major redevelopment around the old runway of Aeropostale, with the creation of many residential buildings, shops, offices and university buildings.

The numerical results highlight the major influence of the presence of water and high vegetation density on the mitigation of urban heat islands, especially in the day. The simulation also allowed predicting the pedestrian comfort and providing the client with solutions to improve it, such as increasing the density of vegetation throughout the old runway of the Aéropostale.

KEYWORDS : urban microclimate simulations, urban cool islands, pedestrian thermal comfort, ENVI-Met

1. INTRODUCTION

Les villes actuelles présentent généralement une mosaïque de microclimats, dont certains sont parfois proches des îlots de chaleurs urbains (ICU), qui accentuent le réchauffement climatique et aggravent les épisodes de vagues de chaleur. En effet, en raison de leur morphologie, des matériaux utilisés et des activités humaines, les villes présentent souvent des températures moyennes plus élevées que leur périphérie ou la campagne alentours.

Les conséquences des effets des ICU sont principalement la réduction de l'efficacité des modes de refroidissement passif dans les bâtiments, l'augmentation de la pollution de l'air, de l'inconfort thermique et des risques importants pour la santé humaine et la biodiversité (Colombert, 2008).

Dans le contexte français, la plupart des métropoles urbaines ont étendu leurs limites lors des cinquante dernières années. Dans le cas de la ville de Toulouse, de nouvelles zones à la périphérie de son centre ancien ont été entièrement conçues pour accueillir des activités diverses, basées principalement sur les aspects fonctionnels, sociaux, patrimoniaux et économiques. C'est actuellement le cas pour la zone de Montaudran (une friche industrielle) qui est en pleine requalification.



Figure 1: répartition des différentes zones d'activité dans le projet de réaménagement du quartier de Montaudran à Toulouse

Le projet IFU (« îlots de fraîcheur urbains ») est un projet de recherche national français qui a permis d'évaluer au moyen de la simulation, différentes stratégies de rafraîchissement, et ce à l'échelle urbaine. Ce projet a été mené en partenariat avec les planificateurs urbains (Toulouse Métropole), avec comme objectif pratique de proposer des procédures visant à incorporer un ensemble de mesures permettant l'adaptation au climat local d'une nouvelle zone urbaine. Les résultats présentés ici se focalisent uniquement sur l'impact sur le confort du piéton des méthodes de rafraîchissement urbain investiguées.

2. METHODOLOGIE

Pour atteindre l'objectif décrit précédemment, les principales étapes méthodologiques suivantes ont été suivies :

(1) Évaluation du plan d'urbanisme initial du quartier Montaudran Aerospace proposé par les praticiens locaux en ce qui concerne le potentiel de création d'îlots de fraîcheur en milieu urbain;

Etude numérique de l'impact des îlots de fraîcheur urbains sur le confort du piéton
– Application à l'aménagement du quartier de Montaudran à Toulouse

(2) Définition d'un ensemble de variations urbaines (scenarios) au plan initial proposé, sur la base des lignes directrices du plan local et en accord avec les principales mesures d'adaptation du microclimat;

(3) Analyse comparative du plan d'urbanisme initial et des scenarios en ce qui concerne leurs effets sur le microclimat par l'utilisation d'un outil de simulation numérique (ENVI-met, (Bruse, 2009)) ;

(4) Evaluation du confort thermique extérieur de piétons virtuels pour quelques itinéraires principaux.

Pour appliquer et tester ces stratégies sur le quartier de Montaudran, les espaces publics présentant une utilisation potentielle plus forte en saison estivale ont été ciblés. Ces espaces comprennent les places publiques, les parcs sportifs, ainsi que les principaux blocs résidentiels (Figure 2). L'étude est menée pour la zone encadrée ci-dessous.

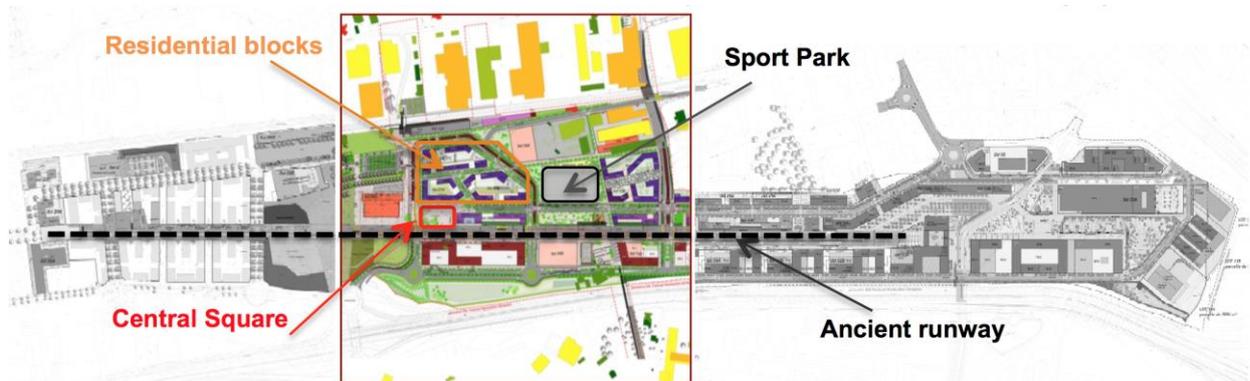


Figure 2: délimitation de la zone étudiée pour l'étude du confort du piéton

L'une des principales raisons du réchauffement de nuit dans les villes est largement sa minéralisation, qui modifie les propriétés thermiques des matériaux de surface. En général, le béton et l'asphalte sombre absorbent l'énergie solaire pendant la journée, et selon la morphologie urbaine, cette chaleur est plus ou moins libérée pendant la nuit (Solecki et al., 2005). L'absence d'évapotranspiration en raison du manque de végétation dans les zones urbaines réduit les masques solaires et l'effet de refroidissement des arbres du fait du faible albédo de leurs feuilles. Les autres causes des ICU sont principalement dues à des effets géométriques. Les immeubles de grande hauteur à l'intérieur de nombreuses zones urbaines offrent des surfaces réfléchissantes et absorbantes importantes, ce qui augmente l'effet de canyon urbain (Oke, 1987).

Une première phase de l'étude a permis d'évaluer différentes stratégies d'adaptation pour réduire les effets ICU, répartis en quatre catégories (Martins, 2015) :

1. Scenario VERT : qui consiste à établir des couloirs verts pour encourager les effets de refroidissement liés aux végétaux
2. Scenario BLEU : qui consiste en l'ajout de plans d'eau et de fontaines pour profiter du refroidissement par évaporation de l'eau
3. Scenario PROSPECT qui intègre une modification de la densité construite, de la hauteur des bâtiments et de la largeur de la rue.

4. Scenario BLANC qui implique l'utilisation de matériaux qui ont des effets de refroidissement de par leur albédo et capacité thermique

3. ITINERAIRES PIETONNIERS ET CONFORT URBAIN

Les espaces extérieurs sont très importants en ville, car ceux-ci doivent encourager la circulation des piétons et des vélos, les activités de plein air, tout en contribuant au dynamisme de la ville (Chen et Ng, 2012). Dans un contexte de changement climatique, les espaces extérieurs permettant une expérience agréable en termes de confort thermique pour les piétons peuvent effectivement améliorer la qualité de la vie urbaine.

Parmi les nombreux facteurs qui déterminent la qualité des espaces extérieurs, le microclimat urbain joue un rôle crucial (Höppe, 2002). Contrairement aux automobilistes, les piétons sont directement exposés à leur environnement immédiat en termes de variations de lumière du soleil et d'ombre, de changements de vitesse du vent et d'autres variables. Ainsi, la perception du confort thermique est fortement influencée par le microclimat local, qui influence les décisions sur l'opportunité d'utiliser l'espace (Chen et Ng, 2012). Dans cette étude, l'analyse du microclimat est effectuée pour le quartier de Montaudran où les dispositifs de refroidissement proposés précédemment seront couplés au plan de mobilité locale pour les piétons et les vélos.

L'influence du confort thermique dans les activités de plein air est une question complexe, impliquant le climat et les aspects comportementaux. Dans cette étude, une analyse simplifiée de l'état de confort thermique estimée (à partir du calcul de la Température Physiologique Equivalente - PET) à travers les itinéraires urbains les plus importants a été menée afin d'obtenir des propositions à destination des urbanistes.

Montaudran offre un vaste réseau de circulation, des pistes cyclables déjà existantes, ainsi que la promotion des transports publics et un accès facile pour les piétons. Trois grands cheminements importants ont été choisis pour l'analyse du confort thermique des piétons: le chemin qui relie la gare à la place principale; le chemin qui relie la place principale au Forum, par l'ancienne piste d'atterrissage (utilisée au temps de l'Aéropostale); et, enfin, le chemin qui relie la place principale du parc sportif (Figure 3). Ces chemins correspondent aux déplacements les plus potentiellement utilisés par les piétons en saison estivale. L'ancienne piste est l'un des points les plus critiques du point de vue thermique compte tenu de ses dimensions assez monumentales, de son revêtement actuel (asphalte), et son caractère patrimonial (mémoire de l'Aéropostale) avec des caractéristiques physiques à préserver.

Etude numérique de l'impact des îlots de fraîcheur urbains sur le confort du piéton
 – Application à l'aménagement du quartier de Montaudran à Toulouse

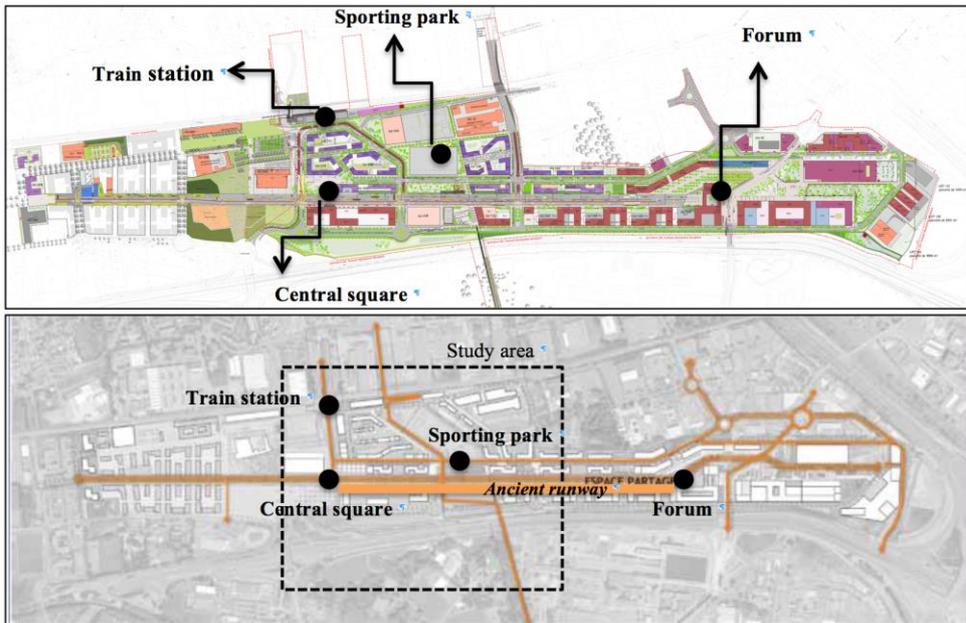


Figure 2: itinéraires piétons et cyclistes prévus pour le quartier de Montaudran.

La longueur du parcours de la place centrale vers le Forum est d'environ 600 m, le long de la piste; le chemin entre la place centrale et le parc sportif mesure environ 400 m de long, et le chemin entre la gare et la place centrale, fait environ 200 m de long. Pour effectuer les analyses, différentes conditions de confort thermique d'un piéton ont été observés. L'étude porte sur l'état thermique d'un piéton «standard» de 35 ans, 1,75 m, 75 kg, marche à 1,2 m/s, habillé avec 0,9 une vêture de 0,9 clo. La personne est initialement définie comme ayant une température corporelle (T_{core}) de $36,8^{\circ}C$ et une température de la peau (T_{skin}) de $33,7^{\circ}C$, comme condition neutre.

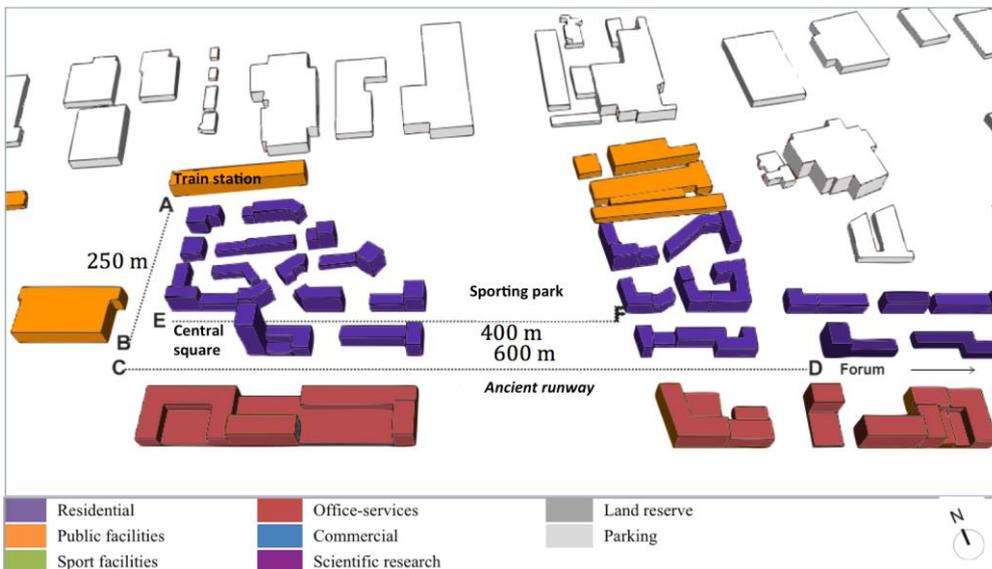


Figure 4 : itinéraires piétons choisis par cette étude : A - B: De la gare à la place centrale, C - D: De la place centrale au forum, E - F: De la place centrale au parc sportif.

4. RESULTATS / SCENARIO VERT

Etude numérique de l'impact des îlots de fraîcheur urbains sur le confort du piéton
 – Application à l'aménagement du quartier de Montaudran à Toulouse

Parmi les différents scénarios étudiés seuls les résultats du scénario vert seront présentés ici. Les calculs sont effectués pour une journée chaude d'été, dont les données climatiques sont extraites des fichiers de Météofrance. Dans ce scénario, les piétons ont accès au Forum sur une voie abrité par deux rangées d'arbres de taille moyenne placés sur les deux extrémités latérales de la piste. Une densité plus élevée des plantes a également été pris en considération pour tous les espaces verts de Montaudran. Un grand nombre d'arbres a été rajouté sur la place centrale, d'abord considérée comme très minéralisée dans le plan initial (scénario de base). Toutes les autres caractéristiques du quartier (prospect, matériaux, plans d'eau) restent ceux du scénario de base. La figure 5 résume les résultats en simulation pour ce scénario. Comme on peut le remarquer, le profil PET sur plusieurs points de l'itinéraire de la piste est bien différent du scénario de base, avec des valeurs nettement inférieures. La moyenne PET le long de la piste est d'environ 6°C plus faible que dans le scénario base, et 7°C plus faible que dans le scénario «blanc» (non présenté ici). Les piétons sont exposés à des conditions thermiques très favorables sur toute la longueur, à l'exception d'un passage très particulier où les piétons sont soumis à des températures plus élevées. Néanmoins, étant donné qu'il s'agit d'une situation transitoire, les utilisateurs ne subiront pas un stress thermique à cet endroit. Ceci est expliqué par cette situation tout-ou-rien où le piéton traverse une rue marquée par l'absence d'arbres (figure 5). Cela montre également l'impact majeur de la température de rayonnement parmi toutes les autres variables climatiques sur la définition du PET, pris en compte dans cette étude par le rôle de l'ombre des arbres sur la création d'îlots de fraîcheur en milieu urbain.

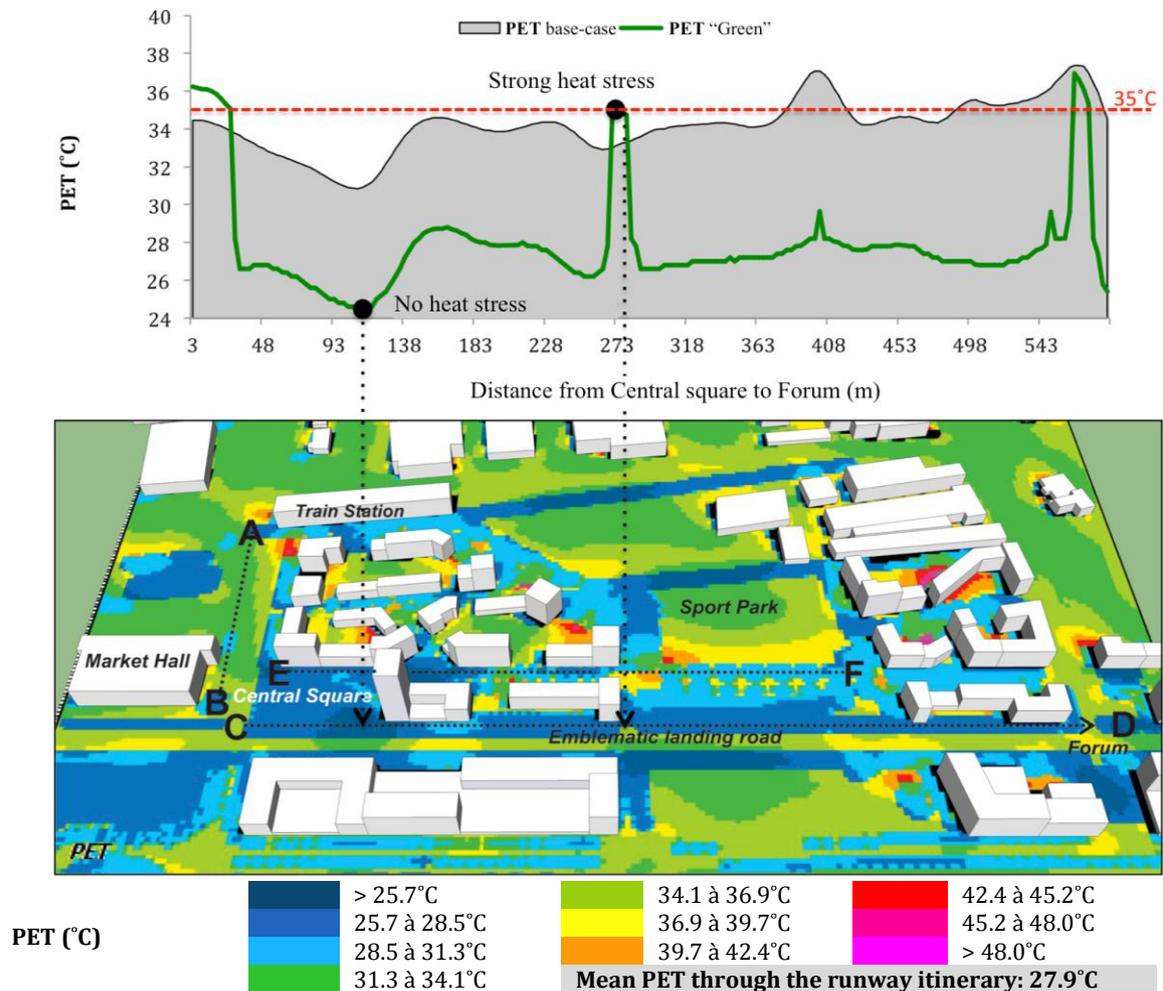


Figure 5: profil de l'indice PET le long de l'itinéraire « piste Aéropostale C-D », cas de base et scénario vert.

Le long de l'itinéraire A-B, qui amène le piéton de la gare à la place principale, la condition de confort reste presque la même par rapport au scénario de base (Figure 6). En ce qui concerne l'itinéraire E-F, il est possible de vérifier à nouveau l'influence remarquable d'une densité plus élevée d'arbres sur la place principale, au début de l'itinéraire (Figure 7). Une réduction estimée à environ 10°C est localement observée.

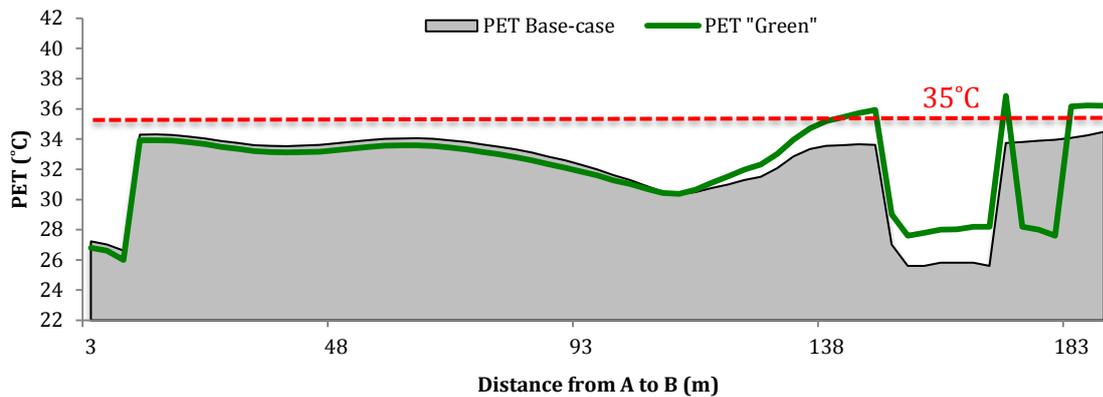


Figure 6 : profil de l'indice PET le long de l'itinéraire A-B, cas de base et scénario vert..

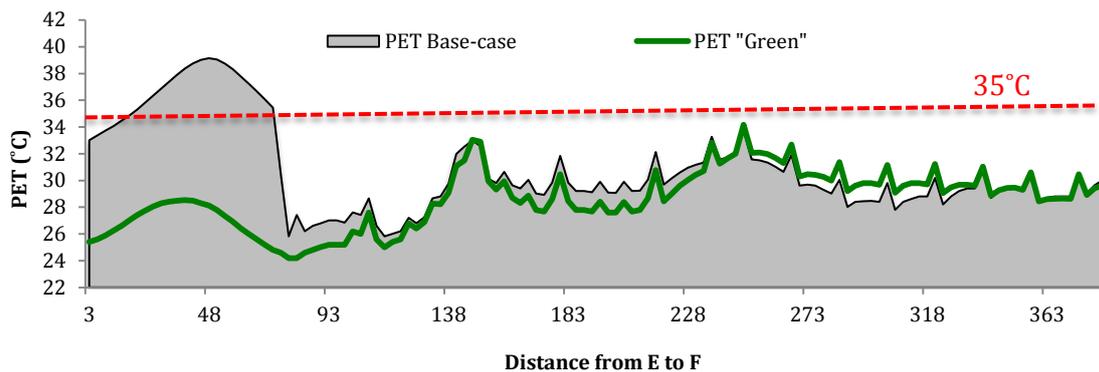


Figure 7 : profil de l'indice PET le long de l'itinéraire E-F, cas de base et scénario vert..

5. CONCLUSION

Travailler en parallèle avec un projet urbain en cours d'élaboration est très utile, car il permet de proposer aux décideurs des stratégies d'améliorations. Ainsi, au lieu d'étudier plusieurs actions ponctuelles, le projet a permis d'étudier plusieurs scénarios pour distinguer des solutions appropriées à partir d'un ensemble de stratégies connues.

Les simulations numériques ont tout d'abord permis la comparaison des dispositifs ainsi que leur influence sur les ICU, tout en tenant compte des contraintes du plan d'urbanisme existant. L'impact de certaines variables connues pour leur grande influence sur les effets d'ICU, tels que le rapport (H/W) et l'albédo, s'est avéré dans le cas de Toulouse Montaudran avoir moins d'impact sur l'atténuation des ICU que d'autres dispositifs tels que la densité de la végétation et la présence d'eau (Martins, 2015).

A partir de ces données de simulation, la température physiologique théorique de piétons virtuels a été calculée pour trois différents itinéraires de marche. L'intégration de la végétation a permis d'importantes améliorations du confort thermique extérieur des piétons. Des facteurs tels que la couverture végétale et l'utilisation de l'eau en milieu urbain sont des dispositifs importants qui vont affecter directement le processus de conception en cours par les décideurs toulousains.

6. REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient l'ADEME, pour son soutien financier et Toulouse Métropole pour sa contribution au programme de recherche. Les auteurs souhaitent également remercier les développeurs du logiciel ENVI-met (M. Bruse) pour leur soutien et pour l'accès aux dernières versions du logiciel.

7. REFERENCES

Bruse, M. (2009). Numerical modeling of the urban climate – a preview on Envi-met 4.0. 7th International Conference on Urban Climate. Proceedings...ICUC 2009. Yokohama, Japon.

Cheng, L. And Ng, E. (2012) Outdoor thermal comfort and outdoor activities: A review of research in the past decade. *Cities*. 29(1):118-125.

Colombert, M. (2008). Contribution à l'analyse de la prise en compte du climat urbain dans les différents moyens d'intervention sur la ville. Univ. Paris Est. Consulté à l'adresse <http://www.theses.fr/2008PEST0233>

Höppe, P. (2002). Different aspects of assessing indoor and outdoor thermal comfort. *Energy and Buildings*, 34, 661-665

Martins Tathiane, Luc Adolphe, Marion Bonhomme, Serge Faraut, Stéphane Ginestet, Charlotte Michel, Frederic Bonneaud « Creating Urban Cool Islands effects for summer season in Toulouse new area: urban microclimate adaptation and building energy impact », ICUC9, 9th International Conference on Urban Climate, Toulouse, France, 20-24 July 2015

Oke, T.R. (1982). The energetic basis of the urban heat island. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 108 (455): 1–24.

Oke, T. R. (1987). *Boundary Layer Climates*. Psychology Press.

Solecki, W. D.; Rosenzweig, C.; Parshall, L.; Pope, G.; Clark, M.; Cox, J.; Wiencke, M. (2005). Mitigation of the heat island effect in urban New Jersey. *Global Environmental Change Part B: Environmental Hazards* 6 (1): 39–49.

Réduction des incertitudes de modélisation de ventilation naturelle et prédiction du confort en espace semi-ouvert

Édouard Walther*^{1,2}, Raphaël Barry¹

¹AREP

16, avenue d'Ivry, 75013 Paris,

²LMT - ENS de Cachan

61 avenue du Président Wilson, 94230 Cachan

*edouard.walther@arep.fr

RÉSUMÉ. L'évaluation du confort dans les bâtiments semi-ouverts à usage transitoire est délicate et nécessite la simulation fine des mouvements d'air et rayonnements solaires incidents. Ce travail présente en premier lieu une méthode permettant de calculer avec moins d'incertitudes les débits de ventilation naturelle par un couplage aéraulique urbain puis une estimation horaire des vitesses d'air intérieur. Ces résultats alimentent un calcul annuel de confort à partir d'un indicateur adapté à l'usage transitoire et modifié pour intégrer les effets du vent sur la vêtue. Une ouverture traitant de l'influence de l'histoire métabolique sur le confort clôt l'étude.

MOTS-CLÉS : ventilation naturelle, Out_SET, confort, aéraulique urbaine.*

ABSTRACT. Semi-outdoor spaces with transient usage require a particular refinement in the level of detail needed for the estimation of comfort. The present work first exposes a method to reduce uncertainties in building natural ventilation using urban wind simulation. The hourly indoor air velocities are also estimated with this method and feed the yearly comfort calculation. The transient comfort index Out_SET including modifications related to the effect of wind on clothing thermal and evaporative insulation is used as a reference for thermal perception. An opening treating of the influence of the metabolism's history on comfort perception is proposed as a conclusion.*

KEYWORDS: natural ventilation, Out_SET, comfort, urban wind*

1. INTRODUCTION

Si le renouvellement d'air impacte les consommations d'énergie, il influe également sur le confort du fait des vitesses d'air qu'il induit. En simulation thermique dynamique, la modélisation de la ventilation naturelle est très simplifiée par rapport à la réalité et peut être améliorée par le recours aux outils de simulation aéraulique. L'occupation transitoire des espaces change également la façon d'estimer le confort : l'inertie importante des mécanismes de thermorégulation du corps humain (Höppe, 2002) rend inadaptées les approches classiques (Fanger, 1970) de calcul du confort.

Dans un premier temps, la réduction des incertitudes sur la détermination des débits d'air par la simulation de l'aéraulique urbaine est présentée. On pose ensuite les bases de l'indicateur transitoire Out_SET* (Pickup & de Dear, 2007) qui permettra d'estimer le confort d'un cas d'application, espace semi-ouvert où vitesse d'air induite par ventilation naturelle et apports solaires directs sont importants.

2. MODELISATION DE LA VENTILATION NATURELLE

Dans cette section, on présente la modélisation classiquement utilisée pour le calcul des débits de ventilation naturelle en simulation thermique dynamique, puis une alternative avec un recours à la simulation aéraulique urbaine pour éliminer une partie des paramètres incertains de modélisation. Le cas d'étude est un projet de hall de gare, largement ouvert et à l'enveloppe transparente.

2.1. VENTILATION NATURELLE EN SIMULATION THERMIQUE DYNAMIQUE

Les logiciels courants de STD modélisent la ventilation naturelle à partir de plusieurs paramètres dont les valeurs sont calculées de manière très approchée. Le débit de tirage lié au vent entre deux ouvrants a et b à une hauteur z est ainsi calculé selon :

$$Q_v = S \times v(z) \times \sqrt{C_{pa} - C_{pb}} \quad (1)$$

La surface équivalente S est pondérée des coefficients de décharge de sorte que :

$$\frac{1}{S^2} = \frac{1}{(C_{da}S_a)^2} + \frac{1}{(C_{db}S_b)^2} \quad (2)$$

La vitesse au niveau de l'ouvrant vaut

$$v(z) = v_{ref} \times k_0 \times \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad (3)$$

- Le coefficient de pression C_{pa}, C_{pb} sur la façade a ou b est généralement estimé en fonction de l'angle d'incidence du vent à partir de corrélations valables pour des géométries rudimentaires de grande ou de petite taille (Swami & Chandra, 1988).
- Les standards, notamment (ASHRAE, 1997) et plusieurs logiciels de calcul de ventilation naturelle (CONTAM, IES-VE MacroFlo, EnergyPlus) définissent C_d comme étant borné dans la plage 0.60-0.65. Cependant, les travaux de recherche bibliographique en préambule de la thèse de (Regard, 2000) et ceux de (Salliou, 2011) ont montré que la plage de variation s'étend de $C_d = 0.1$ à $C_d = 2$, influant donc de 10% à 200% sur la valeur du débit au travers de l'ouvrant.
- La vitesse de référence v_{ref} est prise à la station météorologique la plus proche et n'inclut pas les effets de transition de rugosité, des topographies marquées, des obstacles proches.
- k_0 et z_0 sont respectivement la rugosité du site, comprise entre 0,14 et 0,25 et la longueur de rugosité, comprise entre 0.0005 et 2.00m, selon que le site est très ouvert (mer, champ de neige, désert sablonneux) ou très rugueux (centre des mégapoles, forêt tropicale)

2.2. REDUCTION DES INCERTITUDES SUR LE CALCUL DES DEBITS D'AIR

La présente étude propose une réduction du nombre de paramètres incertains au moyen d'un logiciel commercial d'aéraulique urbaine. Celui-ci résout les équations de Reynolds moyennées ainsi que la conservation de la masse (RANS) moyennée avec une modélisation de la turbulence en $k - \epsilon$. On notera que seul l'effet de pression du vent est considéré par cet outil (pour prendre en compte le tirage thermique on pourra mettre en place une condition sur le nombre de Froude dans le calcul thermique dynamique). Le logiciel permet de calculer explicitement le C_p sur la façade en fonction de la rose des vents annuelle et de l'environnement urbain environnant, réduisant ainsi l'incertitude sur la valeur des coefficients de pression, qui dépendent directement du champ des vitesses sur l'ouvrage.

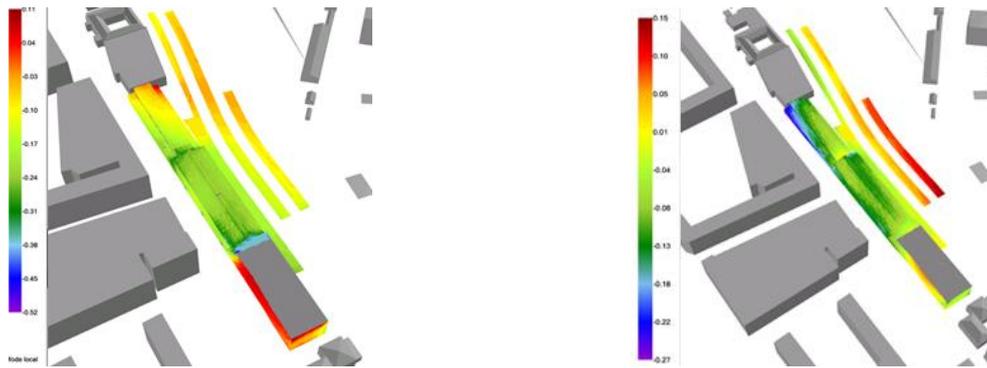


Figure 1 : Coefficients de pression sur l'enveloppe de la gare étudiée pour des directions de vent incident Sud (gauche) et Ouest (droite)

À partir de la distribution des coefficients de pression et d'un fichier météorologique, il est possible, en émettant des hypothèses sur la position des ouvrants, leur surface, leur coefficient de débit et leur scénario d'ouverture dans l'année, de déterminer le taux de renouvellement d'air au cours du temps. On s'affranchit ainsi des autres coefficients présentés en 2.1, excepté C_d dont la valeur reste incertaine et nécessiterait une étude numérique ou en soufflerie pour chaque position de l'ouvrant. Si le doute subsiste quant à ce paramètre (pris ici à une valeur forfaitaire de $C_d = 0.5$) les débits obtenus comportent moins d'incertitudes qu'avec l'approche « STD » du paragraphe précédent.

2.3. ETUDE DE SENSIBILITE AU MAILLAGE

Afin de vérifier l'indépendance des résultats obtenus par rapport à la taille du maillage, une étude de sensibilité a été menée. L'outil étant peu ouvert, l'alternative la plus judicieuse choisie a été d'observer, sur une surface d'intérêt, la moyenne de la valeur absolue de la différence entre la vitesse rafale en un point pour le maillage le plus fin ($N = 916820$ mailles) et la vitesse rafale au point pour un maillage grossier ($N/22$), moyen ($N/7$) et fin ($N/2$).

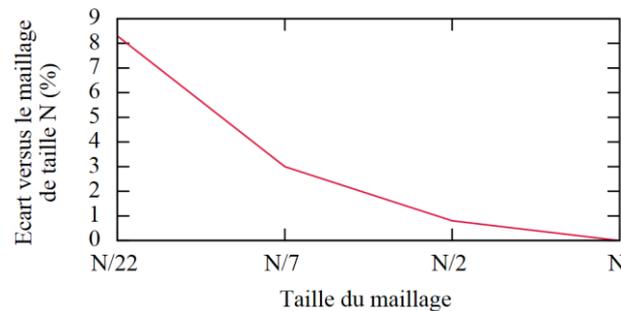


Figure 2 : Comportement de l'écart en fonction de la taille du maillage

On observe bien que cet écart moyen diminue au fur et à mesure que le maillage se raffine. L'erreur entre le maillage fin ($N/2$) et le maillage très fin (N) est de l'ordre du pourcent, ce qui a été jugé suffisant à ce stade du projet et permet de conserver un temps de calcul acceptable.

2.4. ESTIMATION DE LA VITESSE MOYENNE ANNUELLE HORAIRE

La vitesse d'air ayant une influence majeure sur le confort thermique, nous avons utilisé le même logiciel pour déterminer le champ des vitesses à l'intérieur de l'ouvrage. Plusieurs surfaces d'intérêts

ont été choisies pour visualiser les résultats. Chaque surface est discrétisée par des mailles de taille paramétrable (METEODYN), égales à 25×25 cm dans notre cas. À titre d'exemple de résultat, la Figure 3 illustre le coefficient de vitesse rafale $C_{v,rafale} = (v_{point} + \sqrt{k_{point}})/v_{ref}$ pour la direction incidente de vent de 45° . On observe que les vitesses d'air sont faibles (inférieures à 0,45m/s) et que des phénomènes marqués d'accélération se produisent au voisinage des ouvertures (encadrés).

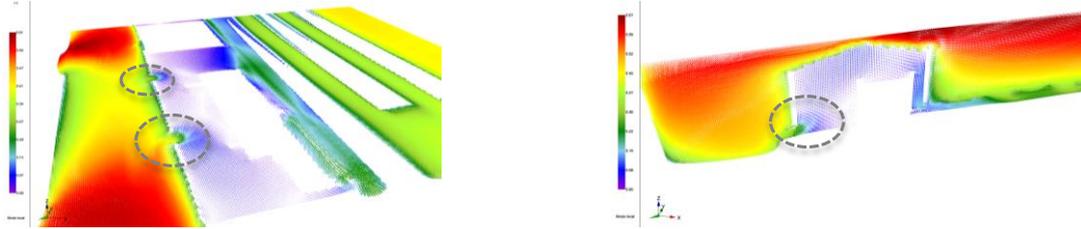


Figure 3 : Cas étudié – Vecteurs coefficients de vitesse rafale pour un vent incident de 45°

À partir de ces résultats directionnels, l'outil procède à une agrégation des résultats en fonction d'un fichier météorologique donné et d'un scénario d'ouverture pour déterminer la vitesse moyenne annuelle en chaque point du domaine étudié, ce qui permettra d'alimenter le calcul du confort.

3. MODELISATION DU CONFORT

On traite dans cette partie de la modélisation du confort dans les espaces semi-ouverts et de l'influence de la vitesse d'air sur la résistance thermique de vêture.

3.1. LE CONFORT DANS LES ESPACES SEMI-EXTERIEURS

La littérature est fournie en ce qui concerne l'estimation du confort dans les ambiances intérieures, les modèles étant basés sur des équations-bilan (PMV de (Fanger, 1970), ou empiriques (modèle adaptatif de (G. S. Brager, 2000) pour la ventilation naturelle). Si ces indicateurs ont fait leurs preuves en intérieur, ils ne sont plus valables pour le cas extérieur ou semi-extérieur, notamment du fait des variations rapides de vitesse d'air, de température moyenne radiante et du caractère fortement transitoire de l'occupation de ces espaces, impliquant ainsi une simulation dynamique détaillée des transferts thermiques qui y ont lieu.

L'indicateur « *Standard Effective Temperature* » ou « SET* » basé sur les travaux de (Nishi & Gagge, 1977) puis adapté pour l'extérieur par (Pickup & de Dear, 2007) est un indicateur de confort en régime transitoire construit à partir d'un modèle du métabolisme humain qui simule les réactions de thermorégulation (vasodilatation, sudation, tremblement) liées à l'environnement et l'activité du sujet. Le principe de l'indicateur SET* est de convertir l'ambiance évaluée en une ambiance de référence (vitesse d'air faible, température moyenne radiante valant celle de l'air ambiant) qui provoquerait les mêmes réactions physiologiques que l'ambiance de départ : à savoir la même mouillure cutanée et la même température de peau, au terme d'un temps d'exposition donné (ainsi les notions de SET* et Out_SET* sont inséparables de la durée). Cette approche est proposée comme une référence d'étude du confort par (ASHRAE, 2013), dont les valeurs tabulées ont permis la validation du code, de même que le calculateur en ligne de (de Dear) en ce qui concerne les grandeurs métaboliques.

L'incapacité des méthodes en régime permanent à prédire correctement le niveau de confort lors de variation des conditions climatiques peut être illustré par la Figure 4, qui représente l'évolution du métabolisme pour un sujet subitement exposé à un environnement estival, en partant des températures

corporelles de consigne. Dans ces conditions, on voit que les températures du noyau et de la peau mettent environ 30 min à atteindre une valeur proche de celles en régime permanent, tandis que la régulation de la mouillure cutanée procède d'une dynamique plus longue et requiert ~100 minutes pour se stabiliser. La détermination du confort en régime permanent conduit par conséquent à mésestimer l'inconfort lorsque les durées considérées sont infra-horaires, comme souligné en détail par l'étude de (Höppe, 2002).

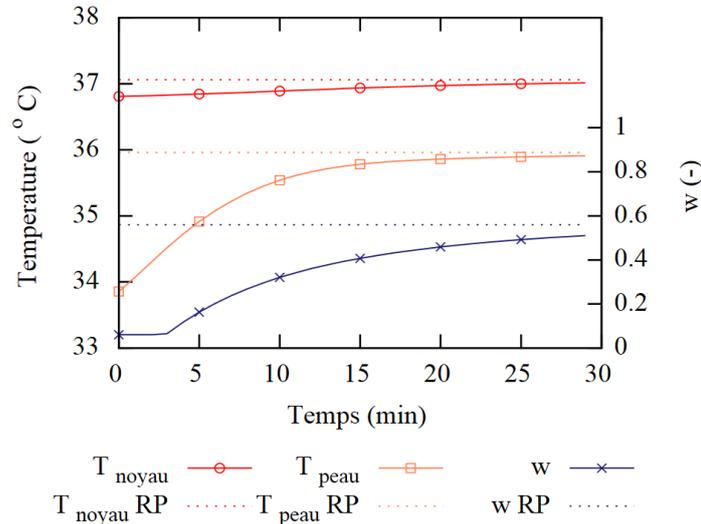


Figure 4 : Modèle Out_SET*, comparaison entre valeurs transitoires et permanentes des grandeurs métaboliques pour une exposition à des conditions estivales ($T_{\text{air}}=25^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{mrt}}=50^{\circ}\text{C}$, $v_{\text{air}}=0.15 \text{ m/s}$)

Ces considérations sont vraies pour le cas de la « réponse à un échelon » (tel que présenté Figure 4), mais le même raisonnement est valable pour des conditions ambiantes changeantes, notamment la vitesse d'air et le flux solaire, qui impactent de manière importante le bilan thermique du corps humain.

Si la SET*/Out_SET* fournit un moyen d'évaluer les ambiances, elle ne fournit pas directement une échelle de confort. Les travaux de (Int Hout, 1990) ont cependant permis de concilier les approches PMV (Fanger, 1970) et SET* (Gagge, Stolwijk, & Nishi, 1971) grâce au retour à un environnement de référence. On dispose ainsi d'un moyen d'évaluation du niveau de confort résultant de la SET*/Out_SET* grâce à l'approche classique du vote thermique moyen « PMV », renommé en « PMV* », que nous utilisons dans cette étude.

3.2. MODIFICATION DU MODELE OUT_SET*

Notre modèle a été affiné sur deux plans par rapport à l'original de (Pickup & de Dear, 2007) :

- La définition des apports solaires est plus précise au sens où l'on prend le flux incident direct reçu par un « mannequin » virtuel représentant un individu dans l'espace considéré et non une approximation de ce flux (le modèle original se base sur le flux global horizontal corrigé par un facteur de projection). La température moyenne radiante T_r est alors modifiée afin d'inclure le flux solaire.
- Un correctif des résistances aux transferts de masse et chaleur provenant des effets de la vitesse d'air a été inséré dans le modèle, d'après les travaux de (Holmér, Nilsson, Havenith,

& Parsons, 1999) et (Havenith, Holmér, Den Hartog, & Parsons, 1999) qui ont servi de base à la norme ISO 9920. L'importance de la vitesse d'air est détaillée dans le paragraphe qui suit.

3.3. INFLUENCE DE LA VITESSE D'AIR SUR LA ZONE DE CONFORT

L'influence du vent sur la position de la zone de confort est non-négligeable du fait de son impact sur les coefficients d'échange de chaleur et de masse ainsi que sur la diminution de l'isolation de la vêtue qu'elle entraîne. La Figure 5 montre la position sur le diagramme psychrométrique de la zone de confort (soit $-0.5 < PMV^* < +0.5$) pour deux vitesses de vent. Lorsque la vitesse d'air augmente, la zone de confort se décale vers les températures élevées : la baisse de l'écart de température est compensée par une hausse des coefficients d'échange, maintenant stable le bilan thermique même à des températures plus élevées.

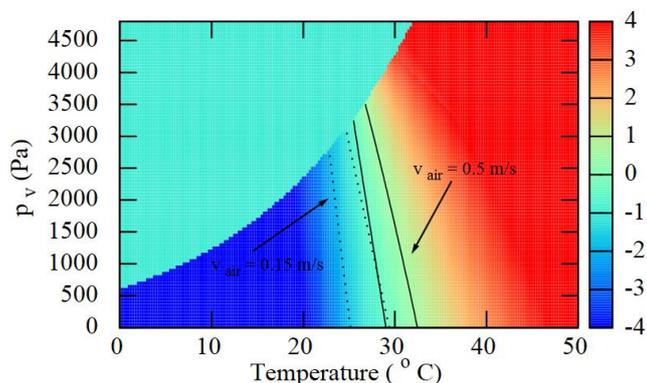


Figure 5 : PMV^* - Position de la zone de confort pour $v_{air}=0.15$ m/s (pointillés) et $v_{air}=0.5$ m/s (lignes continues). Exposition de 30 min, clo statique = 0.6, met = 1.

La Figure 6 représente, à vitesse d'air égale, la position de la zone de confort sur le diagramme psychrométrique avec et sans la modification des résistances de transfert évoquées au paragraphe précédent. La mise en œuvre de ce correctif entraîne un décalage de la zone de confort vers les températures plus élevées. En effet, la vêtue soumise à une vitesse d'air ou au mouvement est sujette aux infiltrations et éventuellement au « pompage », qui provoquent une réduction de ses caractéristiques isolantes par rapport au cas statique.

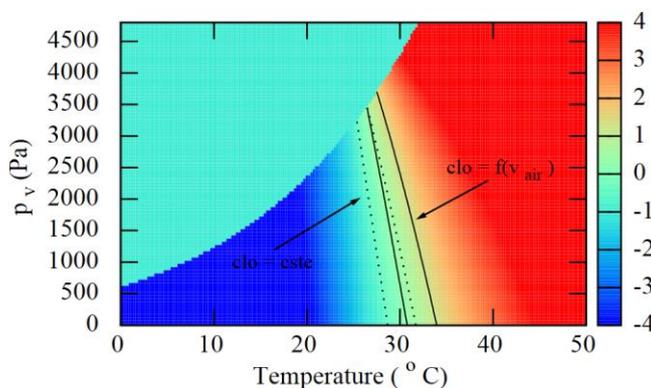


Figure 6 : PMV^* - Position de la zone de confort avec (ligne continue) et sans correction (pointillés) de l'isolation de vêtue. Exposition de 30 min, clo statique = 0.6, met = 1, $v_{air}=0.5$ m/s

La simulation étant annuelle, un modèle dynamique d'habillement est nécessaire pour moduler le niveau d'isolement de la vêtue de jour en jour. Nous nous sommes basés sur les travaux de

dépouillement statistique de (Schiavon & Lee, 2013) donnant un niveau d'habillement journalier en fonction de la température extérieure à 6h du matin.

4. APPLICATION

On se propose d'étudier le confort d'été et d'hiver du bâtiment présenté section 2, non-conditionné et ayant une enveloppe entièrement transparente en polycarbonate ($U=5.2 \text{ W/m}^2/\text{K}$, $g=0.81$). Les résultats de la section 2.4 alimentent la simulation thermique dynamique et le calcul du confort. En effet, le hall est soumis à des vitesses d'air supérieures à celles observées dans les bâtiments résidentiels et à un ensoleillement direct au travers de son enveloppe. On considère trois cas d'exposition pour le calcul du confort :

- Les propriétés de vêtue sont constantes par rapport au vent (« clo statique »)
- Les propriétés de vêtue sont fonction de la vitesse d'air (« clo dynamique » du paragraphe 3.2)
- Les sujets sont exposés aux conditions extérieures durant 20 minutes avant l'entrée dans le bâtiment, avec une activité de marche légère symbolisant leur trajet jusqu'à la gare.

Les résultats en termes de PMV^* d'été et d'hiver moyens ainsi que la moyenne des PMV^* d'inconfort (soit $PMV^* < -0,5$ ou $PMV^* > 0,5$) qui représente l'intensité de l'inconfort, sont présentés sur la Figure 7.

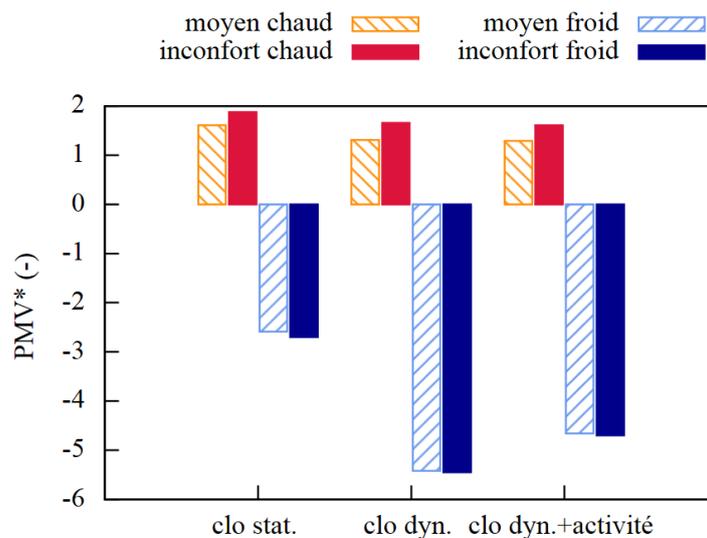


Figure 7 - PMV^* moyen et PMV^* moyen d'inconfort en fonction du modèle utilisé

On observe en premier lieu que l'espace est inconfortable, d'où le faible écart entre PMV^* moyen et PMV^* d'inconfort moyen. La prise en compte des effets du vent sur la vêtue influence très fortement le confort d'hiver et, dans une mesure moindre mais sensible, le confort d'été. L'inconfort diminue en été du fait de la réduction de la résistance de vêtue et augmente en hiver pour les mêmes raisons.

La comparaison du PMV^* des individus ayant une histoire métabolique différente, à savoir 20 minutes de marche en extérieur précédant l'arrivée en gare, montre des résultats meilleurs en confort d'hiver, du fait de l'augmentation du niveau d'activité générant plus de chaleur métabolique. En été la différence est minime mais le confort s'en trouve amélioré car la réponse métabolique de régulation de température est déclenchée avant l'arrivée en gare.

5. CONCLUSION

Cette étude expose en premier lieu une méthode connue permettant de réduire le nombre de paramètres incertains dans la détermination des débits résultants de la ventilation naturelle en utilisant les résultats d'une simulation aérodynamique urbaine. Les vitesses d'air obtenues par celle-ci participent ensuite à la prédiction fine du niveau de confort dans un bâtiment soumis à des mouvements d'air et à un ensoleillement direct importants, grâce à l'indicateur transitoire de confort extérieur et semi-extérieur Out_SET*. Le modèle a été modifié pour une meilleure prise en compte des effets du vent et des apports solaires. Les résultats montrent des différences importantes entre sensations de confort, selon que l'on corrige ou non les résistances de vapeur de vêture et thermique. L'histoire métabolique a également un effet non négligeable sur le ressenti du confort : des travaux ultérieurs sur le lien entre confort et niveau d'activité préalable du métabolisme suivront cette communication.

6. BIBLIOGRAPHIE

- ASHRAE. (1997). Ventilation and Infiltration. Dans *HVAC Fundamentals Handbook* (pp. 492-519). Atlanta: ASHRAE Handbook Editor.
- ASHRAE. (2013). *Standard 55-Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*.
- de Dear, R. (s.d.). *Out_SET* online calculator*. Consulté le 02 2016, sur University of Sydney: <http://web.arch.usyd.edu.au/~rdeardear/>
- Fanger, P. O. (1970). *Thermal Comfort: Analysis and applications in environmental engineering*. Mc Graw Hill.
- G. S. Brager, R. d. (2000). A Standard for Natural Ventilation. *ASHRAE Journal Volume 42*, n°10, 21-28.
- Gagge, A., Stolwijk, J., & Nishi, Y. (1971). An effective temperature scale based on a simple model of human physiological regulatory response. *ASHRAE Transactions*, (77)247-257.
- Havenith, G., Holmér, I., Den Hartog, E., & Parsons, K. (1999). Clothing Evaporative Heat Resistance - Proposal for Improved Representation in Standards and Models. *Ann. Occ. Hyg.*, (43-5):339-346.
- Holmér, I., Nilsson, H., Havenith, G., & Parsons, K. (1999). Clothing Convective Heat Exchange - Proposal for Improved Prediction in Standards and Models. *Annals of Occupational Hygiene*, (43)5-329-337.
- Höppe, J. (2002). Different aspects of assessing indoor and outdoor thermal comfort. *Energy and Buildings*, 661-665.
- Int Hout, D. (1990). Thermal comfort calculations / A computer model. *ASHRAE Transactions*, (96)840-844.
- METEOODYN. (s.d.). Fiche Technique UrbaWind. http://meteodyn.com/wp-content/uploads/2012/02/Doc_technique_UrbaWind1.pdf.
- Nishi, Y., & Gagge, A. (1977). Effective Temperature Scale Useful for Hypo-and Hyperbaric Environments. *Aviation, Space, and Environmental Medicine*, 97-107.
- Pickup, J., & de Dear, R. (2007). An outdoor thermal comfort index (Out_SET*) - Part I - The model and its assumptions. Dans *Biometeorology and Urban Climatology at the Turn of the Millennium*. (pp. 279-283). Geneva: WMO.
- Regard, M. (2000). *Contribution à l'étude des mouvements d'air dans le bâtiment à l'aide d'un code de champ*. Lyon: INSA.
- Salliou, J.-R. (2011). *Analyse de l'influence de paramètres géométriques et physiques sur le coefficient de décharge appliqué à la ventilation dans le bâtiment*. Nantes: Ecole Supérieure d'Architecture de Nantes.
- Schiavon, S., & Lee, K. (2013). Dynamic predictive clothing insulation models based on outdoor air and indoor operative temperatures. *Building and Environment*, (59):250-260.
- Swami, M., & Chandra, S. (1988). Correlations for pressure distribution on buildings and calculation of natural-ventilation airflow. *ASHRAE Transactions*, 243-266.

Outil d'aide à la décision multicritère pour la conception de systèmes énergétiques à l'échelle du quartier

Nicolas Perez*^{1,2}, Adélaïde Mailhac¹, Christian Inard², Peter Riederer¹

¹ Centre Scientifique et Technique du Bâtiment, Sophia Antipolis et Grenoble, France

² Université de La Rochelle, LaSIE, Faculté des Sciences et Technologies, La Rochelle, France

*nicolas.perez@cstb.fr

RESUME. Dans une logique de transition énergétique durable, la modélisation et la simulation des systèmes énergétiques à l'échelle du quartier tendent à devenir essentiels pour l'élaboration de politiques urbaines efficaces. Cependant, la multitude de critères et de contraintes (financiers, énergétiques, environnementaux,...) complexifient l'analyse et l'optimisation de cet ensemble. L'utilisation d'une méthode d'analyse multicritère devient alors incontournable pour assister le traitement des résultats et pour fournir les informations nécessaires aux problématiques de tri, de sélection et de classement, tout en renseignant sur d'éventuels conflits entre les solutions. La méthode ATLAS (Assistance Tool for decision support to Assess and Sort), issue de l'hybridation des méthodes de surclassement ELECTRE et PROMETHEE, a été développée à cet effet. Cet article introduit une description de cette nouvelle méthodologie qui sera ensuite utilisée dans le cadre d'une étude conceptuelle d'un quartier, modélisé à l'aide de la plateforme de simulation DIMOSIM (District Modeller and Simulator).

MOTS-CLÉS : Analyse multicritère ; Aide à la décision ; Systèmes énergétiques urbains.

ABSTRACT. To aim a sustainable energy transition, modelling and simulation of district energy systems tend to become essential in developing effective urban policies. However, the multitude of criteria and constraints (financial, energetics, environmental ...) makes the analysis and the optimization of the complete urban system much complicated to obtain. The use of a multi-criteria decision analysis method becomes essential to assist the results processing and to provide the necessary information for the sorting, the selection and the ranking of the issues, while providing information on possible conflicts between the solutions. The ATLAS method (Tool Assistance for decision support to Assess and Sort), resulting from the hybridization of outranking methods ELECTRE and PROMETHEE, was developed for this purpose. This article introduces a description of this new methodology which is then applied as part of a district design study, modelled with the simulation platform DIMOSIM (District Modeller and Simulator).

KEYWORDS : Multicriteria analysis ; Decision making ; District energy systems

1. INTRODUCTION

Le domaine du bâtiment représente en France près de 40% de la consommation d'énergie finale et 25% des émissions de gaz à effet de serre (ADEME 2013). Pour répondre aux enjeux de la transition énergétique, cet important secteur constitue un levier d'envergure. Les exigences de performances et de moyens de la réglementation thermique prouvent que des efforts ont déjà été largement appliqués pour atténuer les divers impacts. Afin d'améliorer globalement l'efficacité énergétique du complexe système urbain, ces efforts doivent désormais se concentrer sur une échelle plus vaste : le quartier.

Les études portant sur la conception des systèmes énergétiques à l'échelle du quartier mettent en avant plusieurs problématiques : trouver les meilleures alternatives, effectuer un choix cohérent entre

différents systèmes, identifier les points à améliorer,... Pour y répondre et fournir les éléments indispensables d'aide à la décision, il est essentiel d'étudier en détail les phénomènes physiques à l'échelle du quartier. Une plateforme de simulation dynamique, DIMOSIM (District Modeller and Simulator), a été développée au sein du CSTB (Riederer et al. 2015) pour modéliser et simuler l'ensemble du quartier, comprenant : les bâtiments (besoins thermiques et électriques, interactions avec leur environnement), les systèmes de production et de stockage (locaux et décentralisés), les réseaux de distribution (électrique et thermique) et les différentes gestions associées. Les résultats obtenus sont de plus enrichis via ELODIE, logiciel d'analyse de cycle de vie (ACV) bâtiment (CSTB 2006). In fine, les informations extraites doivent permettre de trier les solutions simulées, notamment pour les études paramétriques, mais aussi d'obtenir un classement afin d'orienter la décision finale. Il est alors essentiel d'avoir un outil efficace et dédié à ce type de problématique faisant intervenir plusieurs critères pouvant être quantitatifs ou qualitatifs et définis par des unités hétérogènes.

La méthodologie destinée à effectuer tri et classement doit être adaptée à ce type de problème d'analyse. Il existe 3 classes méthodologiques d'aide à la décision multicritère :

- Les méthodes à critère unique de synthèse sont simples mais l'agrégation des différents critères en une valeur unique implique une synthétisation et une compensation totale des critères entre eux (e.g. somme pondérée, Analytic Hierarchy Process (Saaty 1990),...).
- Les méthodes interactives sont utilisées dans les cas de décisions peu structurées et nécessitent l'intervention du décideur lors du processus, souvent à plusieurs reprises.
- Les méthodes de surclassement permettent la comparaison des solutions par paires en évitant les compensations, sans restriction concernant l'homogénéité des critères. Bien que ces méthodes soient plus complexes que celles à critère unique, il en résulte des résultats plus riches.

L'utilisation des méthodes de surclassement a donc été privilégiée. En effet, elles permettent d'obtenir un niveau de détail assez fin sur les relations entre actions, d'éviter les compensations abusives, de conserver l'intégrité de tous les critères, mais aussi d'établir des seuils de préférence et d'indifférence. Deux méthodes de cette classe se démarquent : ELECTRE III et PROMETHEE II.

La méthode ELECTRE III (Roy 1978) est basée sur deux concepts de base : les indices de concordance et de discordance qui représentent respectivement l'importance du surclassement d'une action par rapport à une autre et l'importance de non comparabilité. Dans le cadre de cette méthode, la notion de surclassement « flou » (gradation progressive pour le passage de l'indifférence à la préférence d'une action par rapport à une autre) est utilisée. Son paramétrage requiert une parfaite connaissance de la méthode et doit être adapté à chaque nouveau set d'actions.

La méthode PROMETHEE II (Brans et al. 1986) est une alternative plus aisée à mettre en œuvre. En effet, elle est basée sur un seul indice proche de celui de concordance : l'indice de préférence, faisant lui aussi appel à la notion de surclassement « flou », et le paramétrage est réduit et indépendant des actions à comparer. Cependant, cette relative simplicité induit une diminution des informations sur les éventuelles singularités du problème.

Les conclusions d'une étude comparative entre les méthodes de surclassement : ELECTRE III, PROMETHEE I et II ainsi que la méthode SMART, se résument au constat qu'aucune n'est parfaite (Salminen et al. 1998). La nouvelle méthode hybride ATLAS (Assistance Tool for decision support to Assess and Sort) a été développée pour allier les avantages des méthodes PROMETHEE II et

ELECTRE III et ainsi obtenir une méthode adaptée à l'optimisation des systèmes énergétiques. Dans cet article, cette méthode d'analyse multicritère est présentée dans le détail pour être ensuite appliquée à un cas d'étude référant à la conception énergétique d'un quartier, simulé à l'aide de l'outil DIMOSIM (District Modeller and Simulator).

2. LA METHODE ATLAS

Les problèmes d'analyse multicritère peuvent être définis comme étant la recherche du meilleur compromis. Soit K l'ensemble fini des k actions à comparer et $f_i : K \rightarrow \mathbb{R}$ avec $i = 1 \dots n$, les fonctions définies pour les n différents critères, la solution de ce type de problème s'exprime :

$$\text{Max}\{f_1(a), \dots, f_n(a)\}, a \in K \quad (1)$$

Cette maximisation doit nécessairement être associée à une priorisation des critères par le décideur. Les méthodes de surclassement permettent alors, en comparant les actions les unes aux autres sur les différents critères et en les analysant, de fournir les informations importantes à la prise de décision.

A l'instar de la méthode CAM (Conflict Analysis Method) (Van Huylbroeck 1995), associant les méthodes ELECTRE, PROMETHEE et ORESTE, la méthode ATLAS est une adaptation hybride d'ELECTRE III et de PROMETHEE II. Ce procédé permet d'obtenir une alternative aux méthodes dont elle est issue en conciliant certaines propriétés clefs qui, dans le cas de la méthode ATLAS, sont la simplicité d'utilisation et la détection des incomparabilités universelles (i.e. incomparabilité et indifférence). La structure principale de la procédure de la méthode ATLAS est identique à celle de ses parents (cf. mythologie grecque) et elle est définie par les principales étapes décrites ci-après.

La pondération des critères

L'attribution de la pondération (w_i) des critères, ou classement des priorités, est effectuée par le décideur qui peut être guidé via l'utilisation de fonctions type de pondération : exponentiel, linéaire ou logarithmique. Les égalités peuvent évidemment être prises en considération et ces pondérations doivent vérifier :

$$\sum_i w_i = 1 \quad (2)$$

Les relations de comparaisons

Pour chacun des critères, les comparaisons par paires sont effectuées et sont ensuite traitées dans le but d'obtenir une valeur reflétant les choix du décideur. A l'aide d'une fonction type, dite de surclassement, le décideur infère une relation d'importance relative à chacun des critères. De plus, des limites de seuil peuvent y être intégrées de sorte à prendre en compte des zones d'indifférence. Cette étape est analogue à l'élaboration des indices de préférence dans les méthodes PROMETHEE. Cet indicateur (S_i) est défini par la différence entre les valeurs des actions a et b sur le même critère et par la fonction s_i choisie parmi la liste de fonctions types (échelon, linéaire ou gaussienne) pour chacun des critères, tel que :

$$S_i(a, b) = \begin{cases} 0 & \text{si } f_i(a) \leq f_i(b) \\ s_i(f_i(a) - f_i(b)) & \text{si } f_i(a) > f_i(b) \end{cases} \quad (3)$$

Les valeurs de surclassement obtenues doivent alors être agrégées en vue d'obtenir un unique indice de surclassement (Σ) d'une action a par rapport à une action b. Ces indices de surclassement sont obtenus grâce à la relation suivante :

$$\Sigma(a, b) = \sum_i^k w_i \cdot S_i(a, b) \quad (4)$$

Cette seconde étape est quasiment identique à l'étape des méthodes PROMETHEE permettant l'obtention de la matrice des valeurs de surclassement. La matrice de surclassement obtenue à l'aide d'ATLAS est l'élément de base sur lequel s'appuient ensuite les relations de surclassement.

Les relations de surclassement

Cette étape est composée par deux principaux éléments: le test d'incomparabilité universelle et la définition des flux.

Dérivé de la méthode ELECTRE III, un prétraitement est tout d'abord effectué grâce à la matrice de surclassement. Ce test permet de mettre en évidence les indifférences et les incomparabilités, mais aussi de les prendre en considération dans les relations de surclassement. L'indice de surclassement de a par rapport à b doit être supérieur à une valeur limite L_1 et celui de b par rapport à a, qui correspondrait à un indicateur global de discordance dans la méthode ELECTRE III, doit être inférieur à une autre valeur limite L_2 . On obtient ainsi les Equations (5) et (6).

$$\Sigma(a, b) \geq L_1 \quad (5)$$

$$\Sigma(b, a) \leq L_2 = L_1 - l \quad (6)$$

Il est aussi possible d'exprimer plus simplement ces relations en considérant la différence des deux indices de surclassement pour finalement obtenir la zone d'incomparabilité universelle composée par le couple d'équations suivant :

$$\Sigma(a, b) \geq L_1 \quad (7)$$

$$|\Sigma(a, b) - \Sigma(b, a)| \leq l \quad (8)$$

L'Equation (7) représente l'exclusion de la zone d'indifférence, c'est-à-dire qu'une action a doit être significativement meilleure qu'une action b sur certains critères, et l'Equation (8) représente l'incomparabilité, c'est-à-dire que les actions sont très différentes sur plusieurs critères, mais possèdent des valeurs d'indice de surclassement relativement proches. Les valeurs recommandées de L_1 et de l sont en relation directe avec n (i.e. le nombre de critères) : $L_1 = \frac{1}{n}$ et $l = \frac{0,1}{n}$.

Une fois les tests d'incomparabilité universelle effectués, les relations de surclassement provenant de la méthode PROMETHEE II sont intégrées à la méthode ATLAS. Ces relations sont caractérisées par le calcul de différents flux qui excluent les comparaisons d'actions considérées comme universellement incomparables. On obtient alors les flux entrants, noté Φ^+ , et les flux sortants, noté Φ^- , à l'aide des Equations (9) et (10).

$$\Phi^+(a) = \frac{1}{\text{card}(K_a)} \sum_{x \in K_a} \Sigma(a, x) \quad (9)$$

$$\Phi^-(a) = \frac{1}{\text{card}(K_a)} \sum_{x \in K_a} \Sigma(x, a) \quad (10)$$

Enfin, ces flux entrants et sortants sont agrégés pour obtenir le flux net, noté $\Phi(a)$ qui permet de classer les actions.

$$\Phi(a) = \Phi^+(a) - \Phi^-(a) \quad (11)$$

Un indice supplémentaire est requis pour pouvoir invalider les résultats obtenus si un nombre trop important d'incomparabilités universelles rend l'utilisation de cette méthode inappropriée. La somme des flux nets étant nulle si aucune n'est détectée, l'indice d'incomparabilité est simplement égal à cette somme. Il représente la part des incomparabilités et doit être inférieur à une valeur seuil (T) pour ne pas introduire un biais trop important dans les résultats. Cet indice, noté I, est défini par l'Equation (12). La valeur conseillée de T, obtenue expérimentalement, est de 0,10.

$$I = \left| \sum_{a \in K} \Phi(a) \right| \leq T \quad (12)$$

L'exploitation des résultats

Les résultats sont présentés exhaustivement dans le but de conserver la totalité des renseignements fournis par la méthode ATLAS. La matrice de surclassement est représentée dans un tableau auquel est adjoint un tableau rassemblant tous les différents flux et les incomparabilités universelles doivent bien évidemment être affichées avec l'indice d'incomparabilité associé. Des simplifications concernant la lisibilité des informations peuvent être simplement effectuées, mais sont cependant à la charge de l'analyste (e.g. graphe orienté, histogramme, radar, nuage de points,...).

La méthode ATLAS se positionne comme une alternative aux méthodes classiques de surclassement ELECTRE III et PROMETHEE II dont elle dérive. Spécifiquement développée pour être intégrée à la plateforme de modélisation et de simulation énergétique de quartier, DIMOSIM, cette évolution est néanmoins universelle. Tout comme la méthode PROMETHEE II a permis, par exemple, d'effectuer le choix d'un système de chauffage urbain (Ghafghazi et al. 2010), la méthode ATLAS est utilisée pour accompagner les décideurs dans la conception d'un nouveau quartier.

3. CAS D'APPLICATION : LE PROJET « RU DE NESLES »

Le cas d'étude concerne le projet d'aménagement du boulevard du RU de Nesles à Champs-sur-Marne, en France. En lien avec le projet du Grand Paris et donc les développements de la banlieue parisienne, la conception de ce quartier est prévue pour l'horizon 2030. Cette étude ne concerne qu'une partie du projet complet, délimitée en rouge sur la Figure 1. Elle est composée de bâtiments destinés au logement (en jaune), aux activités de bureaux (en bleu) et de commerces (en violet). Afin de pouvoir effectuer les choix technologiques les plus opportuns pour la création de ce quartier, différents scénarii (Tableau 1) ont été envisagés et simulés à l'aide de la plateforme de simulation DIMOSIM. Ils ont ensuite été comparés et analysés à l'aide de la méthode ATLAS.

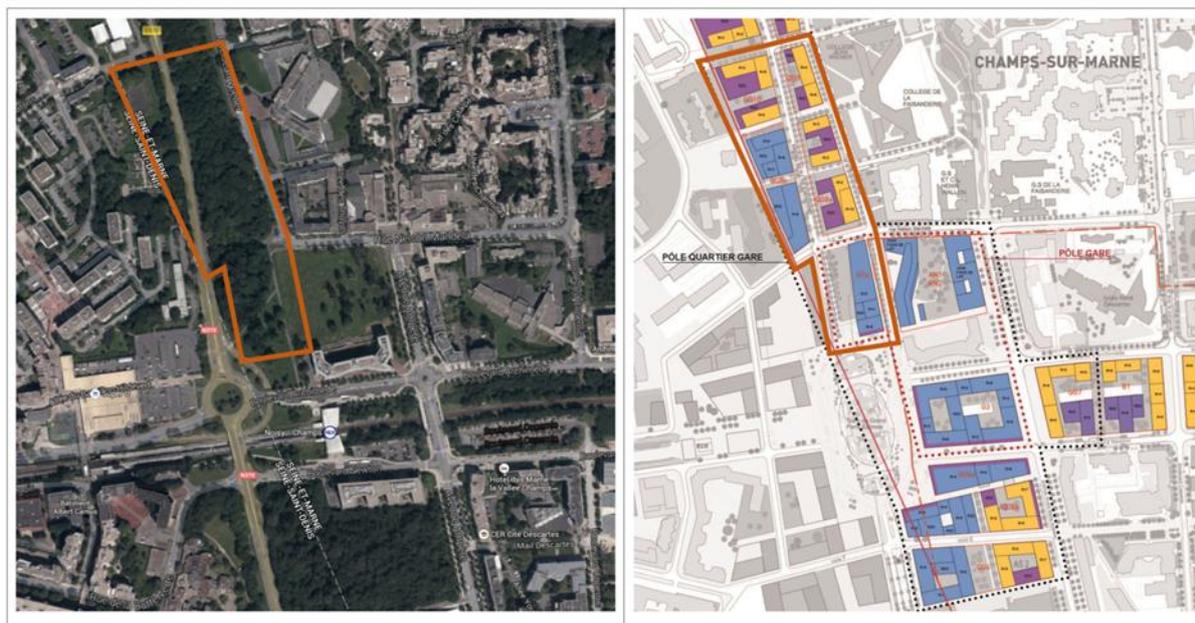


Figure 1 : Projet d'aménagement du boulevard du RU de Nesles (à gauche : vue satellitaire de la zone d'étude à l'état actuel via Google Maps, à droite : plan masse du projet).

Plusieurs critères ont été choisis pour permettre une comparaison objective des différents scénarii : le coût global sur 20 ans (investissements, charges opérationnelles et maintenance), la couverture des besoins avec les EnR (Energies Renouvelables et de Récupération) en énergie finale, l'impact environnemental, les consommations annuelles totales d'énergie finale et la maturité technologique des systèmes. Les résultats obtenus sont présentés dans le Tableau 2.

D'autre part, une ACV de ce quartier a été effectuée à l'aide du logiciel ELODIE, conjointement à cette étude (Mailhac et al. 2016). L'utilisation de la méthode ATLAS a ainsi permis l'obtention d'un classement environnemental des différentes solutions à partir de plusieurs critères importants. Les flux totaux obtenus grâce à cette étude connexe sont alors utilisés comme scores environnementaux.

Action	Paramètre de configuration			
	Production	Couverture PV	Isolation	Fenêtres
1	Chaudière sans condensation	10 %	Intérieure $U=0,4 \text{ W/m K}$	Triple vitrage ($U=1 \text{ W/ m K}$)
2	Chaudière sans condensation	10 %	Extérieure $U=0,2 \text{ W/m K}$	Triple vitrage ($U=1 \text{ W/ m K}$)
3	Chaudière à condensation	20 %	Intérieure $U=0,2 \text{ W/m K}$	Double vitrage ($U=2 \text{ W/ m K}$)
4	Chaudière à condensation	10 %	Extérieure $U=0,4 \text{ W/ m K}$	Double vitrage ($U=2 \text{ W/ m K}$)
5	Pompe à chaleur (air/eau)	20 %	Intérieure $U=0,4 \text{ W/m K}$	Triple vitrage ($U=1 \text{ W/ m K}$)
6	Pompe à chaleur (air/eau)	40 %	Extérieure $U=0,2 \text{ W/m K}$	Double vitrage ($U=2 \text{ W/ m K}$)
7	Cogénération (moteur Stirling)	20 %	Extérieure $U=0,4 \text{ W/ m K}$	Double vitrage ($U=2 \text{ W/ m K}$)
8	Géothermie (aquifère)	10 %	Intérieure $U=0,2 \text{ W/m K}$	Double vitrage ($U=2 \text{ W/ m K}$)

Tableau 1 : Paramètres des différents scénarii simulés

Critère	Action							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Coût global (M€)	17,5	17,6	17,2	17,6	17,6	16,7	15,7	21,7
Couverture des EnR (%)	12,5	17,5	21,2	17,5	65,3	78,5	21,4	69,8
Score environnemental (10 ⁻² -)	-9,1	8,9	-2,4	-9,9	-11,1	-1,9	29,9	-10,8
Consommations (kWh/m /an)	90,4	74,9	90,1	89,9	59,5	58,0	89,1	63,6
Maturité des systèmes (-)	+++	+++	++	++	++	++	~	+

Tableau 2 : Valeurs des actions sur chacun des critères

La pondération des critères est présentée dans le Tableau 3. Les valeurs de ces poids ont été obtenues en appliquant la fonction type linéaire aux 5 critères.

	Critère				
	Coût global	Couverture des EnR	Impact environnemental	Consommations	Maturité des systèmes
Pondération	0,33	0,27	0,2	0,13	0,07

Tableau 3 : Pondération des critères

Pour chacun de ces critères, il est nécessaire de définir les fonctions de surclassement utilisées pour les relations de comparaison. Dans l'intention de pénaliser les projets les plus onéreux, la gaussienne est utilisée pour le critère financier. Pour les autres, seule la fonction linéaire a été choisie pour effectuer les comparaisons et aucune zone d'indifférence n'a été prise en compte pour cette étude. Ces relations permettent finalement l'obtention de la matrice de surclassement, donnée dans le Tableau 4.

Action	Action							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0	0	0,022	0,027	0,032	0,022	0,067	0,357
2	0,172	0	0,140	0,176	0,120	0,075	0,125	0,442
3	0,073	0,022	0	0,059	0,050	0	0,044	0,377
4	0,022	0	0,001	0	0,006	0	0,044	0,328
5	0,340	0,257	0,304	0,318	0	0	0,344	0,340
6	0,463	0,351	0,377	0,452	0,140	0	0,403	0,447
7	0,352	0,250	0,252	0,345	0,331	0,198	0	0,530
8	0,342	0,258	0,305	0,320	0,020	0	0,323	0

Tableau 4 : Matrice de surclassement

Grâce aux relations de surclassement, les différents flux sont calculés et présentés dans le Tableau 5. Les valeurs des limites utilisées ont été choisies conformément aux recommandations, c'est-à-dire : $L_1 = 0,2$ et $l = 0,02$. Les incomparabilités détectées concernent les couples d'actions : 1/8, 4/8 et 5/7. L'indice d'incomparabilité reste inférieur à la valeur seuil conseillée de 0,1.

Flux	Action							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Φ^+ (-)	0,028	0,178	0,089	0,012	0,260	0,376	0,321	0,181
Φ^- (-)	0,237	0,163	0,200	0,229	0,061	0,042	0,168	0,427
Φ (-)	-0,209	0,016	-0,111	-0,217	0,199	0,334	0,153	-0,246
							I	0,08

Tableau 5 : Valeurs de flux

Les valeurs obtenues à l'aide de ce type de méthode sont nécessairement dépendantes des pondérations et des fonctions de surclassement utilisées. Dans le cas particulier de cette étude, le fait

de produire localement de l'électricité est l'élément clef pour occuper la tête du classement, les investissements étant rapidement amortis. La faible densité énergétique de ce quartier ne permet pas à la géothermie sur nappe d'obtenir un bon score. Finalement, la méthode ATLAS fournit un classement qui est éclairé par des informations détaillées sur les relations entre actions et les incomparabilités.

4. REMARQUES ET CONCLUSION

Simplement configurable, cette nouvelle méthodologie d'analyse multicritère permet l'obtention de résultats relativement exhaustifs et adaptés pour la prise de décision (i.e. classement, sélection, tri, affectation de scores, traitement des incomparabilités,...). Initialement conçue pour répondre aux problématiques liées aux études énergétiques à l'échelle du quartier, la méthode ATLAS est néanmoins universelle et se positionne comme une alternative intéressante au croisement des méthodes PROMETHEE II et ELECTRE III. Afin d'étayer ces développements, des études comparatives et des analyses de sensibilité devront être effectuées.

5. REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient Efficacy - Institut pour la Transition Energétique dans les villes (www.efficacy.com) ainsi que l'EPA-Marne-la-Vallée qui a fourni l'essentiel des données utilisées pour l'étude de cas : projet d'Aménagement du Boulevard du Ru de Nesles à Champs-sur-Marne.

6. BIBLIOGRAPHIE

- ADEME. 2013. « Les chiffres clés du bâtiment ». Sophia Antipolis, France, ISBN 978-2-35838-601-2.
- Brans, Jean-Pierre, Vincke, Philippe, Mareschal, Bertrand. 1986. « How to select and how to rank projects: the PROMETHEE method ». *European Journal of Operational Research* 24: 228-238.
- CSTB. 2006. « ELODIE ». www.elodie-cstb.fr.
- Ghafghazi, Saeed, Sowlati, Taraneh, Sokhansanj, Shahabaddine, Melin, Staffan. 2010. « A multicriteria approach to evaluate district heating system ». *Applied Energy* 87: 1134-1140.
- Mailhac, Adélaïde, Perez, Nicolas, Schiopu, Nicoleta, Sibiude, Galdric, Adolphe, Luc. 2016. « Articulation des outils de simulation énergétique et d'analyse de cycle de vie à l'échelle quartier, illustration à travers une étude de cas ». *Conférence IBPSA France 2016*.
- Riederer, Peter, Partenay, Vincent, Perez, Nicolas, Nocito, Christophe, Trigance, Romain, Guiot, Thierry. 2015. « Development of a Simulation Platform for the Evaluation of District Energy System Performances ». *Fourteenth IBPSA Conference*: 2499-2506.
- Roy, Bernard. 1978. « ELECTRE III : un algorithme de classements fondé sur une représentation floue des préférences en présence de critères multiples ». *Cahiers du Centre d'Etudes et de Recherche Opérationnelle (Belgique)* 20: 3-24.
- Saaty, Thomas L. 1990. « How to make a decision: The Analytic Hierarchy Process ». *European Journal of Operational Research* 48: 9-26.
- Salminen, Pekka, Hokkanen, Joonas, Lahdelma, Risto. 1998. « Comparing multicriteria methods in the context of environmental problems ». *European Journal of Operational Research* 104: 485-496.
- Van Huylenbroeck, Guido. 1995. « The Conflict Analysis Method: bridging the gap between ELECTRE, PROMETHEE and ORESTE ». *European Journal of Operational Research* 82: 490-502.

Evaluation et perspectives du modèle thermique de COMETH, le cœur de calcul de la réglementation thermique des bâtiments neufs

David DA SILVA*¹, Jean-Marie ALESSANDRINI¹, Jean-Baptiste VIDEAU¹, Charles PELE¹, Jean-Robert MILLET¹

¹ CSTB – Centre Scientifique et Technique du Bâtiment

84, avenue Jean Jaurès, 77447 Champs-sur-Marne

*David.dasilva@cstb.fr

RESUME : *Le CSTB développe depuis de nombreuses années, COMETH, logiciel de simulation énergétique dynamique des bâtiments. Sa clef de voûte, le bilan thermique, a été utilisée dans le cadre de la Réglementation Thermique 2000 pour s'assurer que le confort thermique d'été était préservé dans les bâtiments non climatisés. Ainsi sa diffusion à l'échelle nationale, dès 2001, a permis de rendre, l'ensemble de ces paramètres et leurs ordres de grandeur, familiers aux acteurs, facilitant ainsi l'évaluation de solutions techniques au cours du projet. Nous présentons ici son adaptation au secteur du bâtiment, de part, son articulation avec les différents textes de référence de la profession. Nous démontrons également sa capacité à reproduire les transferts de chaleur grâce aux résultats issus de sa confrontation au standard Ashrae140. La discussion ouvre sur sa modularité et sa capacité à produire des résultats solides, à partir de données d'entrée agglomérées dans la perspective de l'utiliser pour élaborer des solutions techniques en phases amont dans la conception du bâtiment.*

MOTS-CLÉS : *Transferts thermiques, Simulation Thermique Dynamique, Normalisation*

ABSTRACT. *COMETH is dynamic energy simulation software developed by the CSTB. Its key stone is the heat balance model that is used since the 2000 thermal French regulation. In the beginning, it was developed to ensure a good thermal comfort for non-cooled buildings but it was quickly adapted for other purposes. The large dissemination of this model and its connection with the different building product standards, allowed the whole profession to get familiar with its inputs. This feature helped the use and evaluation of new technical solutions for better building energy efficiency. In this paper, we present the adjustment of the building sector and its articulation with the different building references (standards...). The aptitude of the thermal model to reproduce the thermal heat transfers is also presented by the application of the ASHRAE 140 standard. The use of COMETH in earlier phases of building design is discussed and perspectives for further developments are drawn.*

KEYWORDS: *Heat transfer, Dynamic thermal simulation, Standards*

1. INTRODUCTION

Le modèle thermique de COMETH a été développé au CSTB initialement pour s'assurer que le renforcement des exigences énergétiques dans la réglementation thermique 2000 (1) n'entraînait pas une dégradation du confort thermique d'été néfaste pour les occupants. Le calcul de confort thermique, toujours existant dans la réglementation thermique actuelle, consiste à déterminer la température intérieure de confort, température opérative horaire maximale au cours d'une journée chaude. Sa détermination suppose de faire un calcul dynamique sur une journée chaude avec un pas de temps horaire. Ce modèle a été complété pour devenir un logiciel de simulation énergétique dynamique du

bâtiment. Ainsi, il a pu être étendu aux calculs de l'ensemble des indicateurs performantiels des réglementations thermiques qui se sont succédées jusqu'à aujourd'hui grâce à sa robustesse, sa rapidité de calcul, sa modularité et sa relative simplicité d'utilisation. Nous proposons dans l'article de présenter son originalité et son adaptation au secteur du bâtiment. Par ailleurs, de manière à renforcer sa capacité à reproduire la dynamique des transferts de chaleur sur un cas réel, les résultats de sa confrontation au standard Ashrae140 (2) sont également exposés. La discussion ouvre sur sa modularité et sa capacité à conduire à des résultats à partir de données d'entrée agglomérées dans la perspective de son utilisation dans des phases plus amont dans la conception du bâtiment.

2. LA COMPATIBILITE DU MODELE THERMIQUE DE COMETH AVEC LES REGLES PROFESSIONNELLES

Il n'est pas anodin de rappeler le contexte à l'époque de la création du modèle COMETH. La réglementation thermique 2000, qui venait remplacer la réglementation de 1988, nécessitait le recours systématique à l'informatique en exigeant un calcul mois par mois pour le calcul de la consommation et heure par heure sur une journée pour le calcul du confort d'été. Ainsi, il y a quinze ans tous les professionnels susceptibles de faire un calcul réglementaire allaient-ils avoir à leur disposition un outil de calcul numérique capable de réaliser un bilan thermo-aéraulique, pour la partie confort d'été, à chaque pas de temps. Aujourd'hui la méthode TH-BCE 2012, qui reprend le cœur de COMETH, s'applique à toutes les constructions neuves, donc cela suppose que les paramètres soient disponibles et opposables. Par ailleurs, le temps concédé au calcul réglementaire doit être cohérent au coût de la prestation. Finalement, le calcul doit rendre compte à sa juste proportion de l'impact de chaque paramètre. Ces exigences, en réponse à l'évolution législative et aux contraintes de la profession, sont à l'origine du cahier des charges original de ce modèle thermique.

Plus précisément, la réglementation et la pratique sont indissociables. De fait, la réglementation utilise des paramètres et donne des indicateurs de performance qui comparés à un seuil et à une référence vont valider le caractère réglementaire ou non d'une opération. Les professionnels s'en saisissent, jusqu'à connaître, pour les plus aguerris, les ordres de grandeur associés aux solutions techniques mises en œuvre facilitant les orientations à donner à la conception. Lorsqu'en 2000 est introduit le modèle thermique dynamique de COMETH, la première réglementation thermique en 1974, est familière à une génération de thermiciens. La méthode doit donc réaliser une synthèse entre les grandeurs disponibles chez les industriels, familières des bureaux d'études, celles nécessaires pour la représentation dynamique des transferts de chaleur et celles opposables pour l'utilisateur.

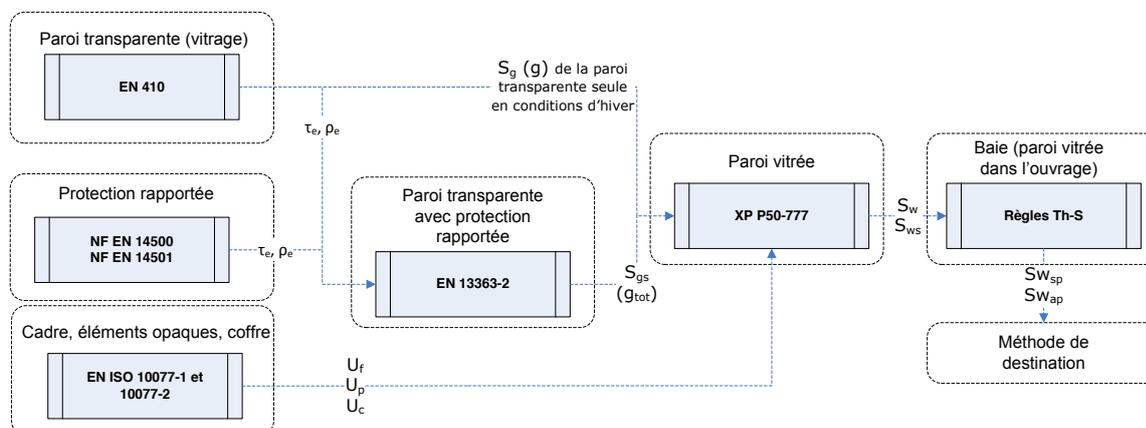


Figure 1 – Interconnexion entre les différentes normes et le calcul thermique dynamique

La figure précédente extraite des règles Th-S montre l'articulation entre les documents normatifs et les textes réglementaires pour la fenêtre qui joue un rôle clé dans la dynamique des transferts de chaleur. Les méthodes de destination sont, en l'occurrence, les méthodes de calcul pour l'application des réglementations thermiques dans les bâtiments neufs et existants qui font appel au bilan thermique dynamique de COMETH.

Les normes permettent de caractériser des produits à l'aide de méthode consensuelles pour une profession et dont les conditions pour les établir sont partagées. Elles jouissent donc à la fois d'une reconnaissance collective et ont un lien avec leurs caractéristiques effectives dans des conditions normalisées. Maîtrisant ces conditions, connaissant ces valeurs, il est alors possible de les adapter en fonction de la situation particulière du produit étudié ou des conventions réglementaires. L'intégration dans l'ouvrage d'un produit peut modifier ses caractéristiques. Pour tenir compte de cette évolution des règles professionnelles ont été écrites pour permettre de paramétrer les logiciels de calcul. Par exemple, les caractéristiques du vitrage sont modifiées par son intégration dans l'ouvrage, qui va créer des phénomènes d'ombrage, et par l'incidence du rayonnement solaire direct. Cependant, ces variations, liées au contexte, ne peuvent par définition être normalisées. La création de règles professionnelles, avec la mise à disposition de méthodes ou de tableaux de données, permettent d'accéder à un calcul permettant de faire le lien depuis la norme, donc le produit, jusqu'à son impact sur la consommation du bâtiment.

3. LE MODELE THERMIQUE – COMETH

Le modèle thermique est inspiré de la norme ISO 13790 (3) qu'il a d'ailleurs aidée à bâtir. Il est basé sur la simplification du transfert de chaleur entre l'environnement intérieur et extérieur à partir d'une analogie électrique. Le calcul est réalisé à l'échelle d'un local supposé avoir des sollicitations thermiques et aérauliques homogènes. On distingue les parois selon leur réaction à une variation de sollicitation thermique d'une heure :

- Si la paroi est en régime transitoire alors elle est considérée épaisse. A une variation en régime établi sera ajoutée une correction pour tenir compte du régime transitoire
- Si la paroi est en régime établi dans l'heure alors, la paroi est considérée fine. Par simplification, seules les parois vitrées sont regroupées dans cette deuxième catégorie.

Les échanges par rayonnement dans l'ambiance sont simplifiés en considérant les parois de surfaces égales et de même facteurs de forme. La représentation des composants du bâtiment est faite ainsi à partir d'un réseau électrique équivalent avec 5 résistances et une capacité (5RC).

Les parois épaisses et fines sont considérées homogènes thermiquement.
Les températures des parois épaisses et fines doivent être proches

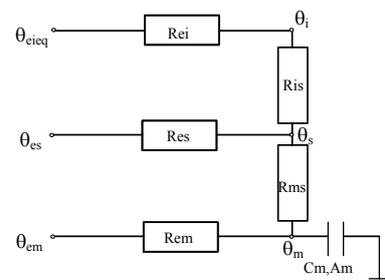


Figure 1 – Réseau 5RC

Ce modèle est décrit plus en détail dans (4) et dans (5).

4. EVALUATION COMETH - NORME ASHRAE 140

Dans une première vérification, le modèle thermique de COMETH a déjà été validé par rapport à la norme EN 15265 (6). Dans un objectif de renforcer la cohérence des résultats de ce modèle, nous les avons comparés à ceux de la norme ASHRAE 140. Dans cette partie nous montrons la capacité, d'une part, du modèle à reproduire les besoins de chaud et de froid, d'autre part, les températures maximales obtenues en évolution libre. Ces grandeurs sont à la base de la construction des indicateurs réglementaires respectivement Bbio et Tic.

4.1. NORME ASHRAE 140

La norme ASHRAE 140 ou BESTEST (Building Energy Simulation TEST) est un test d'évaluation pour les logiciels de simulation énergétique dans le bâtiment mis en œuvre par l'agence internationale de l'énergie (AIE). Il est aussi connu comme la norme ANSI/ASHRAE Standard 140-2001.

De façon synthétique, la procédure BESTEST permet de :

- Comparer les résultats d'un logiciel de simulation avec des logiciels de référence,
- Comparer différents logiciels de simulation en vue d'apprécier les différences entre eux,
- Déterminer les sources de différence entre les logiciels au niveau algorithmique,
- Contrôler un logiciel par rapport à une version antérieure,
- Contrôler un logiciel par rapport à lui-même en changeant à chaque fois un paramètre par rapport à une condition initiale.

Toute la description du bâti est détaillée dans la norme. Une liste non-exhaustive est présentée ci-dessous : Absorptivités et émissivités des parois intérieures et extérieures ; position, surface et dispositif d'ombrage des vitrages ; Puissance des apports internes ; Taux d'infiltration ; coefficients de convection et radiation intérieures et extérieures ; etc. Dans la suite de cette étude, le modèle thermique COMETH utilisé est strictement celui de la réglementation, il n'a pas été modifié, sauf pour les constantes physiques énoncées dans la norme ASHRAE.

Le bâtiment testé est monozone et décrit de façon très simple. Ce bâtiment est entièrement soumis au climat extérieur sévère excepté au niveau du sol où il est fortement isolé.

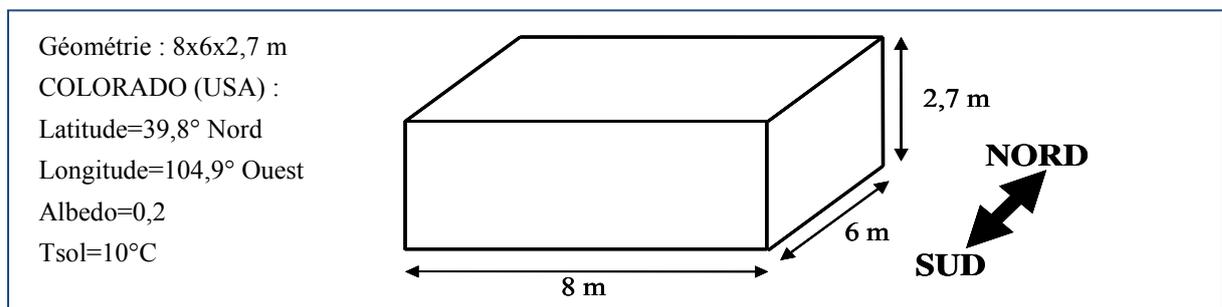


Figure 2 – Géométrie du bâtiment BESTEST

Les configurations des cas test permettent de tester les différents composants du bâtiment et ses caractéristiques. Ces configurations sont présentées brièvement ci-dessous :

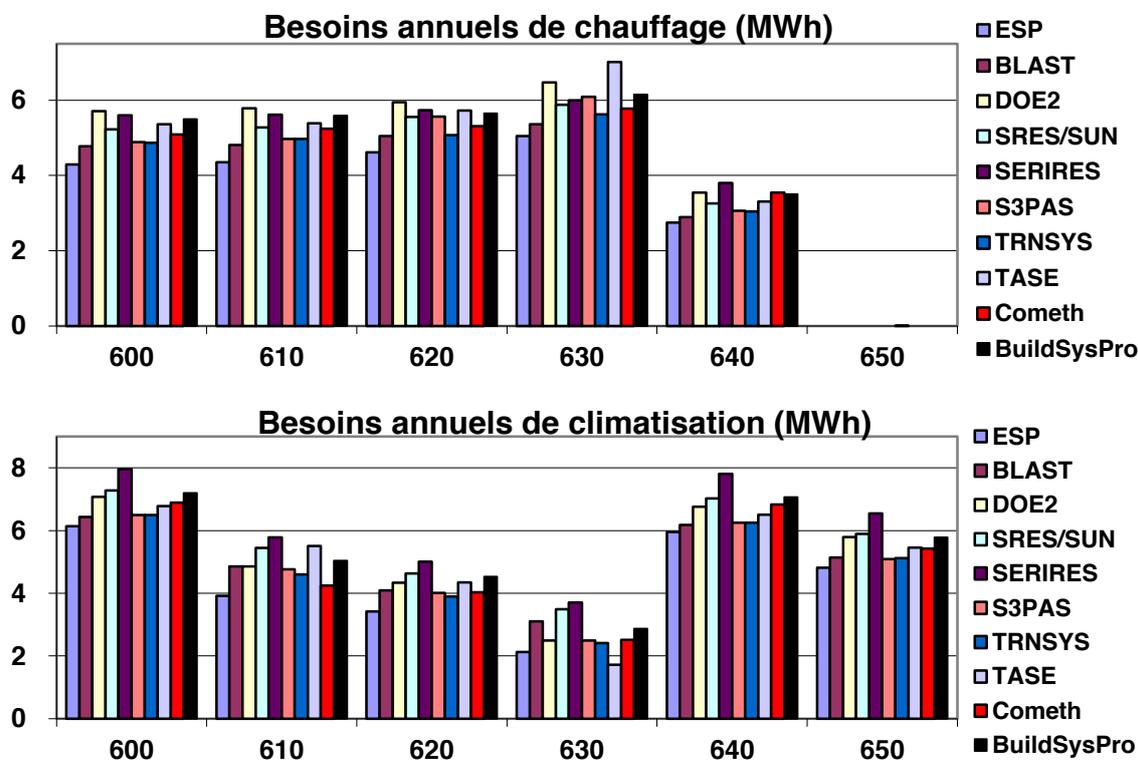
	Inertie	Baies			Consignes Chauffage et Froid (°C)
		m ²	orientation	masques	
600	Inertie légère	12	S	-	Ch=20 ; Fr= 27
610		12	S	horizontal	Ch=20 ; Fr= 28
620		6 / 6	E / O	-	Ch=20 ; Fr= 29
630		6 / 6	E / O	vertical et horizontal	Ch=20 ; Fr= 30
640		12	S		Ch=20/10 réduit nuit ; Fr=27
650		12	S		Ch=NA ; Fr=27; ventilation nocturne
900	Inertie lourde	12	S	-	Ch=20 ; Fr= 27
910		12	S	horizontal	Ch=20 ; Fr= 28
920		6 / 6	E / O	-	Ch=20 ; Fr= 29
930		6 / 6	E / O	vertical et horizontal	Ch=20 ; Fr= 30
940		12	S		Ch=20/10 réduit nuit ; Fr=27
950		12	S		Ch=NA ; Fr=27; ventilation nocturne

Table 1 – Cas Test de la procédure BESTEST

Le critère de validation est composé de valeurs annuelles des besoins de chauffage et climatisation, ainsi que des valeurs maximales de ces besoins. Les températures maximales, moyennes et minimales en évolution libre sont aussi évaluées. D'autres critères plus détaillés existent comme les évolutions horaires des besoins et des températures sur des journées représentatives. Néanmoins, ces derniers indicateurs ne sont pas analysés dans la présente étude.

4.2. RESULTATS

Ci-dessous nous présentons la comparaison entre COMETH et les autres valeurs des autres logiciels présents dans la norme ASHRAE140.



Tous les résultats en termes de besoins de chauffage et climatisation pour les cas à inertie légère sont dans les fourchettes proposées par les autres logiciels.

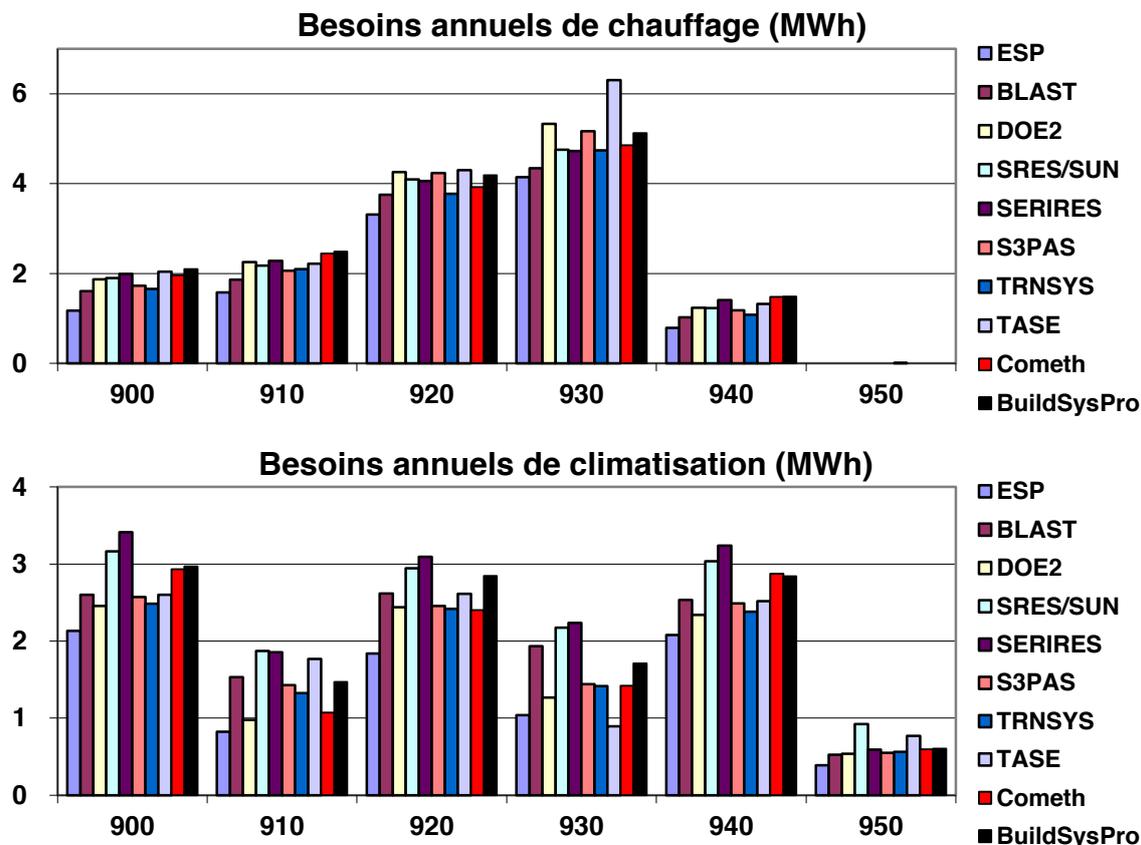


Figure 4 – Besoins annuels de chauffage et climatisation pour les cas inertie lourde

Les résultats pour les cas à inertie lourde montrent aussi une bonne corrélation avec les résultats des autres logiciels. A noter une très légère surestimation des besoins de chauffage pour les cas 910 et 940 en chauffage. Au final, on peut conclure que le calcul du modèle thermique COMETH est comparable en termes de besoins aux autres logiciels dynamiques présentés dans la norme. Les besoins en termes de chauffage et climatisation sont utilisés dans la méthode réglementaire actuelle pour déterminer le besoin bioclimatique Bbio (4).

La figure suivante compare les températures maximales attendues pour les cas 600, 900, 650 et 950 en évolution libre (FF- *free float*) pour les différents logiciels.

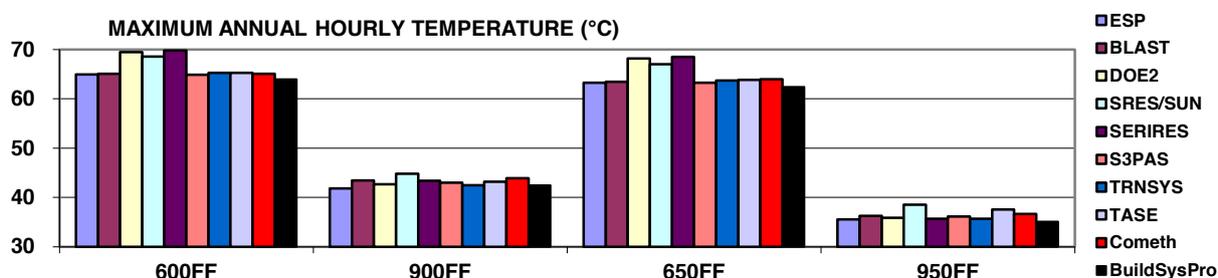


Figure 5 – Températures maximales pour les cas en évolution libre

Le modèle thermique COMETH reproduit bien les valeurs maximales de température. Bien qu'il s'agisse d'une température d'air, la fidélité avec les autres logiciels est de nature à renforcer la capacité du modèle thermique à reproduire les impacts des paramètres sur l'indicateur de confort

d'été, en l'occurrence la température opérative intérieure de confort (indicateur « Tic » RT2012). A noter que cette température, TIC, comporte un correctif statique pour tenir compte des effets séquentiels¹. Compte tenu des caractéristiques des cas BESTEST les effets inertiels sont négligeables.

5. DISCUSSION

Une particularité du présent modèle consiste dans la possibilité d'utiliser des valeurs d'entrée issues des normes produit et des méthodes normalisés, ce qui permet d'avoir des paramètres d'entrée standardisés utilisables par la profession notamment dans les documents de consultation, à l'instar du CCTP pour en garantir l'impartialité (7). L'exemple que nous avons vu auparavant illustre ce cheminement.

Le modèle présenté constitué de trois nœuds avec une capacité et cinq résistances est relativement simple. Le choix de ne fonctionner qu'avec une seule capacité pour l'ensemble de l'enveloppe est audacieux. Malgré cela les résultats de la norme ASHRAE 140 et de la norme CEN (6), confirment sa capacité à reproduire les besoins annuels de chauffage et refroidissement et les températures maximales horaires.

La norme Ashrae met à disposition plus de paramètres en fonction du niveau de détail des outils numériques, notamment elle propose de tenir compte des caractéristiques du vitrage en fonction de l'angle d'incidence ce qui modifie la dynamique des apports solaires. Bien qu'il existe des méthodes détaillées robustes pour déterminer cette évolution dynamique, elles exigent de connaître des valeurs sous un angle à 0° à 90°, par pas de 10°. Cependant, en général, seules les valeurs sous incidence normale sont disponibles et sont opposables. C'est pour cela que le modèle thermique de COMETH fonctionne avec une valeur sous incidence normale à laquelle nous attribuons un correctif statistique moyenné sur une période de l'année, selon le critère calculé², en fonction de la position, de l'orientation et de l'inclinaison (8). Nous voyons que cette valeur moyenne n'affecte pas la précision de nos résultats pour un calcul en cumul et en extremum (Figure 5). Or le bâtiment testé, très vitré sur un site fortement ensoleillé, peut présenter des flux avec des écarts très importants, comme le laisse penser les températures atteintes (Figure 5). Autrement dit, la prise en compte de l'évolution dynamique des caractéristiques du vitrage en fonction de l'angle d'incidence, accentue les fluctuations des flux solaires. Dès lors, il faut s'assurer que la modélisation des interactions entre les flux et l'enveloppe, reproduit bien la dynamique des phénomènes d'absorption et d'émission de la chaleur sensible.

Le travail de collaboration avec EDF, mené dans le cadre du projet MODEBAT, a pour objectif, entre autres, d'étendre la comparaison inter-logicielle sur des bâtiments BBC où les apports solaires deviennent prédominants et pour lesquels les besoins de climatisation peuvent être importants. Les travaux en cours, de comparaison avec l'outil détaillé BuildSysPro, qui permet d'évaluer plus précisément l'impact des flux solaires dans une pièce (notamment vis-à-vis des coefficients d'échange intérieur, du facteur solaire de la baie vitrée et des coefficients de réflexion solaire en courtes

¹ - Avec l'inertie séquentielle est prise en compte la réaction du bâtiment soumis à une onde de température extérieure sous une période de 12 jours.

² Selon que le calcul vise à calculer la consommation sur un bâtiment uniquement chauffé ou également climatisé, ou une température de confort sur une journée chaude la période pour déterminer le correctif du facteur solaire n'est pas la même.

longueurs d'onde et d'émissivité des parois internes), ont pour vocation d'affiner ainsi le paramétrage du facteur solaire de COMETH.

A l'issue de ce travail nous serons en mesure de proposer des améliorations ou de confirmer la capacité du modèle à reproduire ces flux tout en conservant le même niveau de saisie des paramètres du modèle et la même exigence de résultats (sur les cumuls et les extremums). L'objectif visé est de reproduire fidèlement la dynamique horaire, quel que soit l'amplitude des variations de flux.

6. CONCLUSION

Le modèle thermique présenté a été créé en prenant en compte les différentes contraintes de la profession. Malgré sa simplicité, il s'agit d'un modèle robuste et adapté à l'utilisation par les différents acteurs du bâtiment via ses entrées dérivées des normes produit et règles professionnelles.

Les résultats présentés ici viennent renforcer l'aptitude du modèle thermique, des réglementations actuelles, à calculer fidèlement les besoins annuels de chauffage et de refroidissement ainsi que les pics de température. De fait, les résultats du modèle COMETH sont encadrés par le panel de résultats offert par BESTEST.

Des travaux sont en cours pour confirmer ces résultats sur les autres paramètres du standard ASHRAE 140, à savoir l'histogramme de température et les évolutions horaires sur une journée. La prise en compte d'un facteur solaire dynamique fait partie des possibles évolutions dont il conviendra, une fois intégrée, de s'assurer qu'elles répondent fidèlement à tous les critères de la norme ASHRAE. Gardons à l'esprit toutefois que seules les valeurs à la normale sont généralement disponibles.

Une démarche similaire est en cours pour intégrer la prise en compte dynamique des inerties séquentielles et annuelles.

Ce travail d'évaluation avec une norme internationale et l'exercice de comparaison, d'une part, numérique avec le logiciel BuildSYS Pro, d'autre part, expérimentale, dans le cadre du projet MODEBAT, nous permettent de valider et d'améliorer notre cœur de calcul. Ils nous offrent aussi l'opportunité d'élargir le domaine d'application de l'outil jusqu'à couvrir à terme l'ensemble du processus de conception d'un bâtiment, voire en phase d'exploitation.

7. BIBLIOGRAPHIE

1. *Arrêté du 29 novembre 2000 relatif aux caractéristiques thermiques des bâtiments nouveaux et des parties nouvelles de bâtiments. Arrêté du 29 novembre 2000.* 2000, Legifrance.
2. **ASHRAE.** ANSI/ASHRAE Standard 140-2001. *Standard Method of Test for the Evaluation of Building Energy Analysis Computer Programs.* 2001.
3. **ISO 13790.** Performance énergétique des bâtiments -- Calcul des besoins d'énergie pour le chauffage et le refroidissement des locaux. 2008.
4. *An Introduction to the Development of French Energy Regulation Indicators and their calculation methods.* **Jean-Baptiste Videau, Jean-Marie Alessandrini, Benjamin Haas, Charles Pele, Jean-Robert Millet, Paul Jallet, Laurent Reynier, Emmanuel Fleury.** s.l. : Clima 2013, 2013.
5. **Arrêté du 30 avril 2013.** *Arrêté du 30 avril 2013 : portant approbation de la méthode de calcul Th-BCE 2012 prévue aux articles 4, 5 et 6 de l'arrêté du 26 octobre 2010.* s.l. : Legifrance, 2013.
6. **EN 15265.** *Titre : Performances thermiques des bâtiments - Calcul des besoins d'énergie pour le chauffage et le refroidissement des locaux - Critères généraux et procédures de validation.* 2008.
7. **Code des marchés publics.** *Chapitre V : Documents constitutifs du marché. article 13 Cahier des Clauses Techniques Particulières.* 2006.
8. **CSTB.** Guide réglementaire, Règles Th-S. *Annexe à l'arrêté portant approbation de la méthode de calcul TH-BCE 2012.* 2012.

Intégration et tests de méthodes d'analyse de sensibilité et de propagation d'incertitudes appliquées à la simulation thermique dynamique de bâtiment

Baptiste Durand-Estebe*¹, Jérôme Lopez², Laurent Mora³

¹ NOBATEK-INEF4

Esplanade des Arts et Métiers, 33400, TALENCE

² Laboratoire I2M département TREFLE

Esplanade des Arts et Métiers, 33400, TALENCE

*bdurandestebe@nobatek.com

RESUME. L'étude a pour objectif d'employer des méthodes d'Analyse de Sensibilité (AS) couplées à un code de Simulation Thermique Dynamique (STD) pour orienter les choix de conception d'un bâtiment résidentiel. Trois méthodes (SRC, PRCC et Morris) sont employées pour classer 52 paramètres incertains en fonction de leurs influences sur 2 indicateurs de performance. Les résultats permettent d'identifier les propriétés de matériaux ou des systèmes qui facilitent la maîtrise la performance du bâtiment en terme de confort thermique et de besoins de chauffage.

MOTS-CLÉS : Analyse de sensibilité, conception, incertitude.

ABSTRACT. In this study, Sensitivity Analysis methods and thermal simulations are used to guide the design process of a small residential building. Three method (namely SRC, PRCC and Morris) are used to rank the impact of 52 parameters on 2 performance indicators. The results are used to orientate the selection of systems and material properties according to the building's performance in terms of thermal comfort and heat needs.

KEYWORDS : Sensitivity analysis, building design, uncertainty.

1. INTRODUCTION

Au stade de la conception d'un bâtiment, l'évaluation des performances est réalisée soit par des simulations complexes, soit par des modèles simplifiés, soit par des avis d'experts ou des jugements personnels. Dans tous les cas, l'incertitude est rarement prise en compte et les valeurs sont données sous forme de constante (de Wit and Augenbroe 2002). Or l'évaluation des incertitudes au stade amont du projet pourrait améliorer la qualité de la prise de décision. Selon (C. J. Hopfe and Hensen 2011), l'emploi de l'Analyse de Sensibilité (AS) dans le processus de conception permet de simplifier la problématique, grâce à la sélection de paramètres, l'évaluation de la robustesse d'un modèle ou la détection de paramètres sensibles qui n'auraient pas été identifiés. *In fine*, l'objectif est de fournir au preneur de décision, des informations dont la fiabilité est quantifiée.

Dans le processus de conception d'un bâtiment, la Simulation Thermique Dynamique (STD) est fréquemment employée pour obtenir des indicateurs de performance énergétique, ou pour déterminer un niveau de confort des occupants. (C. J. Hopfe and Hensen 2011) étudient la sensibilité des besoins de chauffage/climatisation et identifient les paramètres de conception les plus influents. Tandis que (de

Wit and Augenbroe 2002) emploient un indicateur de confort pour caractériser sa sensibilité aux variables de conception. Les résultats obtenus permettent de décider de la mise en place ou non d'un système de climatisation.

Les STD de bâtiments sont des calculs complexes qui tiennent compte de très nombreux paramètres. Ils concernent généralement : la géométrie du projet (Garcia Sanchez et al. 2014), les caractéristiques des éléments de construction (matériaux ou systèmes) (Hygh et al. 2012), l'environnement et le climat extérieur (de Wit and Augenbroe 2002), les occupants et les usages des équipements du bâtiment (Bruno Peuportier 2016).

Dans cette étude, trois méthodes d'analyse de sensibilité sont employées pour guider les choix de conception d'un bâtiment résidentiel. Les propriétés des matériaux et des systèmes sont déterminées en s'appuyant sur les indices de sensibilité. Finalement, une étude de propagation d'incertitude permet de valider les choix réalisés.

2. LES METHODES D'ANALYSE DE SENSIBILITE POUR LA STD

(Tian 2013) propose une revue complète des méthodes d'AS qui ont été appliquées à l'énergétique du bâtiment. Le choix d'une solution doit se faire en fonction de la nature du problème, du temps de calcul, ou du nombre de paramètres incertains. Dans ces travaux, trois méthodes différentes seront employées et leurs résultats seront comparés.

2.1. METHODE DES INDICES STANDARDISE REGRESSION COEFFICIENTS (SRC)

Cette méthode appartient à la catégorie des régressions. Un échantillon de R configurations est créé en tirant aléatoirement les valeurs de chacun des K paramètres dans leurs intervalles d'incertitude et selon leurs lois de probabilité respectives. Pour la méthode SRC, (Hygh et al. 2012) recommandent une taille d'échantillon comprise entre 500 et 1 000. Dans le cadre de cette étude $R = 900$.

La méthode SRC se base sur l'hypothèse qu'il est possible d'identifier une relation linéaire entre chacun des K paramètres et l'indicateur observé (Saltelli, Andres, and Homma 1995). Si l'on note y le vecteur résultat contenant les R valeurs d'indicateurs obtenus par simulation des R configurations contenues dans l'échantillon, il est possible d'écrire :

$$y_j = b_0 + \sum_{i=1}^K b_i x_{ji} + \varepsilon_j \text{ avec } j = 1, 2, \dots, R \quad (1)$$

Le vecteur b est obtenu en employant une méthode des moindres carrés (ou OLS) comme présenté par (Beck 2001). Une fois b calculée, la régression peut être réécrite :

$$\frac{Y - \bar{Y}}{S(Y)} = \sum_{i=1}^K \mathbf{SRC}(Y, X_i) \frac{\bar{X}_i - \bar{X}_i}{S(X_i)} \text{ avec } \mathbf{SRC}(Y, X_i) = b_i \frac{S(X_i)}{S(Y)} \quad (2)$$

avec \bar{Y} la valeur moyenne des indicateurs contenus dans y et $S(Y)$ l'écart-type associé. \hat{Y} est le vecteur d'estimation obtenu à partir de l'équation 1.

Le vecteur **SRC** contient les coefficients de régression standardisés. En considérant que les paramètres sont indépendants, ils peuvent être employés comme indices de sensibilité. Ils quantifient l'effet de la déviation d'un paramètre par rapport à sa moyenne tout en maintenant les autres à leur valeur initiale.

2.2. METHODE DES INDICES PARTIAL RANKED CORRELATION COEFFICIENT (PRCC)

Cette méthode appartient également à la catégorie des régressions. Elle s'appuie sur le même échantillon de $R = 900$ configurations créées pour l'application de la méthode SRC. La détermination des indices PRCC ne requiert donc pas de simulation supplémentaire.

La corrélation fournit une indication sur la correspondance linéaire entre des paramètres x (de dimension (K, R)) en entrée et une sortie y de dimension (R) . Les Coefficients de Corrélation CC ou coefficients de Pearson peuvent se calculer selon l'équation (3) :

$$CC_{x_j, y} = \frac{Cov(x_j, y)}{\sqrt{Var(x_j)Var(y)}} \text{ avec } j = 1, 2, \dots, K \quad (3)$$

La corrélation partielle caractérise la relation linéaire entre un paramètre x_j et la sortie y une fois que tous les effets linéaires des paramètres restants ont été supprimés. Le PCC entre un paramètre x_j et une sortie y est le CC entre les résidus $(x_j - \hat{x}_j)$ et $(y - \hat{y})$ ou \hat{x}_j et \hat{y} sont les modèles de régression linéaires suivants :

$$\hat{x}_j = c_0 + \sum_{p=1, p \neq j}^K c_p x_p \quad \hat{y} = b_0 + \sum_{p=1, p \neq j}^K b_p x_p \quad (4)$$

Finalement les indices de Corrélation Partielle « classés » (PRRC) sont obtenus en « classant » les vecteurs x_j et y par ordre croissant, puis en calculant les PCC à partir des vecteurs classés. Selon (Marino et al. 2008) cette méthode permet d'obtenir des indices de sensibilité robustes adaptés à la caractérisation de systèmes non linéaires, mais monotones.

2.3. METHODE DE MORRIS

Cette méthode appartient à la catégorie des études par criblage. Elle est adaptée aux applications possédant de très nombreux paramètres incertains (de Wit and Augenbroe 2002). Elle propose un classement qualitatif des paramètres et permet une première évaluation de leurs interactions (Recht et al. 2014).

Elle repose sur l'analyse d'une répétition de R_{ite} plan OAT (One At a Time), où les K paramètres incertains du modèle varient un à un dans chaque plan. Une simulation est réalisée pour chaque variation et la totalité des résultats forme le plan d'expérience.

Pour chaque répétition i des R_{ite} plans OAT et pour chacun des k paramètres, la méthode calcule l'effet élémentaire de la variation δ du paramètre selon la formule :

$$dX_i = \frac{F(x_1^i, \dots, \mp \delta, \dots, x_k^i) - F(x_1^i, \dots, x_j^i, \dots, x_k^i)}{\delta} \quad (1)$$

Deux indices μ_i^* et σ_i sont calculés selon les équations suivantes :

$$\mu_i^* = E(|dX_i|) \quad (2)$$

$$\sigma_i = \sigma(dX_i) \quad (3)$$

où μ_i^* caractérise l'effet du paramètre sur l'incertitude de l'indicateur observé, et σ_i fournit une indication sur l'effet non linéaire du paramètre et ses interactions. L'effet total du paramètre est obtenu en calculant la distance euclidienne d^* entre l'origine et le point (μ_i^*, σ_i) . Concernant les autres caractéristiques du criblage la configuration retenue s'appuie sur les travaux de (Recht et al. 2014) avec

$R_{ite} = 15$, $Q = 6$ correspondant à la discrétisation de l'espace de chaque paramètre et $\delta = \frac{Q}{2 \times (Q-1)} = 0.6$.

2.4. LA BOITE A OUTILS ASPIC POUR L'ANALYSE DE SENSIBILITE

Dans le cadre du projet STD+ porté par l'ITE INEF4 et mené en collaboration par Nobatek et le laboratoire I2M département TREFLE, une boîte à outils a été développée sous la forme d'une librairie Python3. Elle permet de réaliser des Analyses de sensibilité : CC, SRC, PRCC, Morris et indices de Sobol à partir d'un métamodèle (Merheb 2013). Elle autorise des traitements statistiques : histogramme, régression vers une loi normale asymétrique, etc. Elle est utilisable pour l'évaluation de tout type de système, mais est particulièrement adaptée au fonctionnement avec l'outil de calcul EnergyPlus (calcul parallélisé).

3. UTILISATION DE L'AS DURANT LA PHASE DE CONCEPTION D'UN BATIMENT DE LOGEMENT

Le bâtiment étudié est situé sur la commune de Bussy St George (77). Il comporte deux appartements de type T3 et s'élève sur un 1 étage. L'objectif de performance énergétique visé est le niveau réglementaire RT-2012. L'équipe de maîtrise d'œuvre (MOE) souhaite employer la STD pour orienter les choix des caractéristiques des matériaux et le fonctionnement des systèmes de façon à favoriser le confort estival des occupants. L'indicateur de confort retenu est le pourcentage d'heures d'occupation où la température opérative dépasse 28°C. Les figures ci-dessous proposent un aperçu 3D du bâtiment :

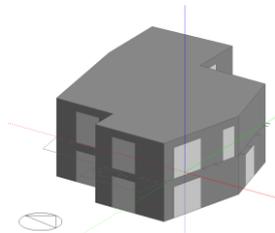


Figure 1 : aperçu enveloppe

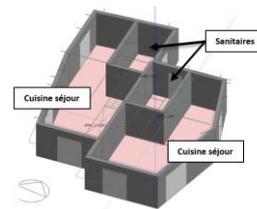


Figure 2 : aperçu RDC

Concernant l'enveloppe, les murs et la toiture sont en voiles béton isolés par l'extérieur. Le plancher sur terre-plein est isolé sous la dalle et les menuiseries sont en doubles vitrages. La centrale de traitement d'air (CTA) de type double flux est équipée d'un échangeur de chaleur avec by-pass pour la période estivale. Le chauffage est assuré par une chaudière à gaz qui alimente des émetteurs dans chaque pièce.

Les paramètres d'entrée qui sont étudiés peuvent être classés en deux catégories. Les paramètres de conception dont l'incertitude correspond à l'espace de conception et sont bornés par les valeurs mini et maxi acceptables. Les paramètres incertains dont l'incertitude est liée à leur valeur nominale. Leur comportement est celui d'une loi normale.

Au total 54 paramètres relatifs au bâtiment sont considérés et peuvent être répartis en 3 classes. L'enveloppe du bâtiment qui comprend les propriétés des matériaux, les propriétés des menuiseries, ou le niveau d'infiltration d'air. Les systèmes CVC et leurs stratégies de régulation : température de consigne de chauffage, rendement de l'échangeur de la CTA, débits de renouvellement d'air. Les occupants et les équipements. Bien que cette dernière classe n'appartienne pas au paramètre de conception, il est souhaitable de l'intégrer pour juger de son impact sur les indicateurs observés.

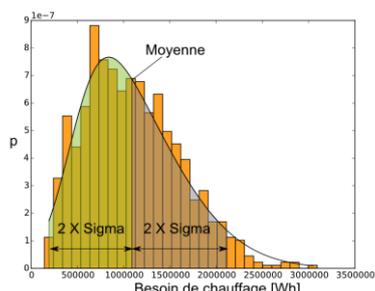
En employant les méthodes d'analyse de sensibilité décrites, le double objectif de cette étude est :

- de sélectionner une valeur pour chacun des paramètres de conception qui permette à la fois de maîtriser les besoins de chauffage et de garantir un bon confort des occupants
- d'estimer l'incertitude finale qui persiste sur les indicateurs observés.

3.1. RESULTATS DE L'ETUDE SUR LE CHAMPS DE CONCEPTION

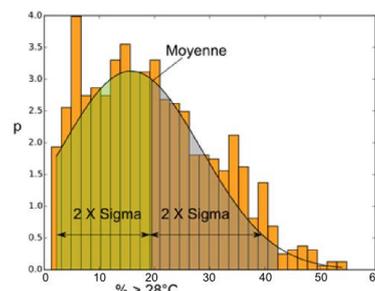
Pour le calcul des SRC et PRCC un échantillon de 900 simulations est obtenu par tirage aléatoire des valeurs des paramètres dans leurs espaces de conception ou d'incertitude. Pour l'analyse selon la méthode de Morris, l'échantillon possède une taille de 795 configurations (soit 15 plans OAT). Les indicateurs de confort et de besoins de chauffage sont calculés pour chaque configuration des deux échantillons. Les temps de calcul sont de l'ordre de 4h pour 900 simulations.

Selon une première analyse statistique des résultats sur l'espace de conception :



Besoin annuel de chauffage	
Moyenne	1 090 kWh
Ecart-type	513 kWh
Incertitude	94%

Figure 3 : besoins de chauffage conception



% de dépassement de 28°C (sur occupation)	
Moyenne	19 %
Ecart-type	11 %
Incertitude	115 %

Figure 4 : inconfort thermique conception

Pour les deux indicateurs étudiés, on observe une très forte dispersion des résultats sur l'ensemble du domaine de conception. Concernant les besoins de chauffage et en ne considérant que les 52 paramètres incertains identifiés, la conception a une probabilité de 95% d'avoir un besoin inférieur à 2 117 kWh (5.29kWh/m). Concernant le confort thermique des occupants, l'indicateur est plus difficile à interpréter puisqu'il s'agit d'une moyenne sur l'ensemble des zones thermiques. Cependant il semblerait que le risque de surchauffe soit très important avec plus de 90% de probabilité d'avoir un taux de dépassement supérieur à 2% (niveau performant au sens du référentiel HQE® bâtiment tertiaire (Certivéa 2011)).

Les indices de sensibilité SRC, PRCC et Morris sont calculés de manière à orienter la conception. L'objectif est d'obtenir une indication qualitative de l'impact de chaque paramètre sur les indicateurs. On propose donc de classer les paramètres du plus influent au moins impactant selon les résultats des 3 méthodes, et d'observer le classement moyen final :

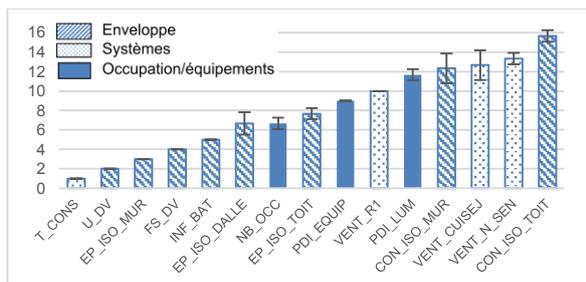


Figure 5 : sensibilité besoins chauffage initial

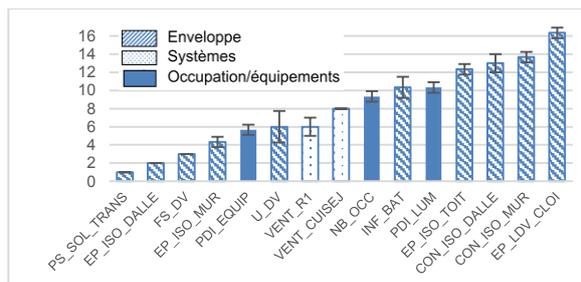


Figure 6 : sensibilité confort initial

Les 3 catégories de paramètres (enveloppe, systèmes et occupation) sont distinguées par des motifs différents dans les 2 graphiques 5 et 6. Concernant les besoins de chauffage, les 3 méthodes classent les 5 paramètres les plus influents dans le même ordre. Le classement diffère peu pour les 10 paramètres suivants. Concernant le taux d'inconfort, les 3 paramètres les plus influents sont identifiés par les 3 méthodes. L'erreur associée au classement des 12 paramètres suivant est sensiblement plus importante. Par ailleurs, on remarque que plusieurs paramètres sensibles ont une forte action (parfois contradictoire) sur les deux indicateurs. Notamment : le renouvellement d'air (mécanique et par infiltration), les propriétés des isolants (épaisseur, conductivité), les propriétés des vitrages (conductivité, facteur solaire), etc. De façon à guider la conception, un graphe basé sur les indices PRCC est proposé :

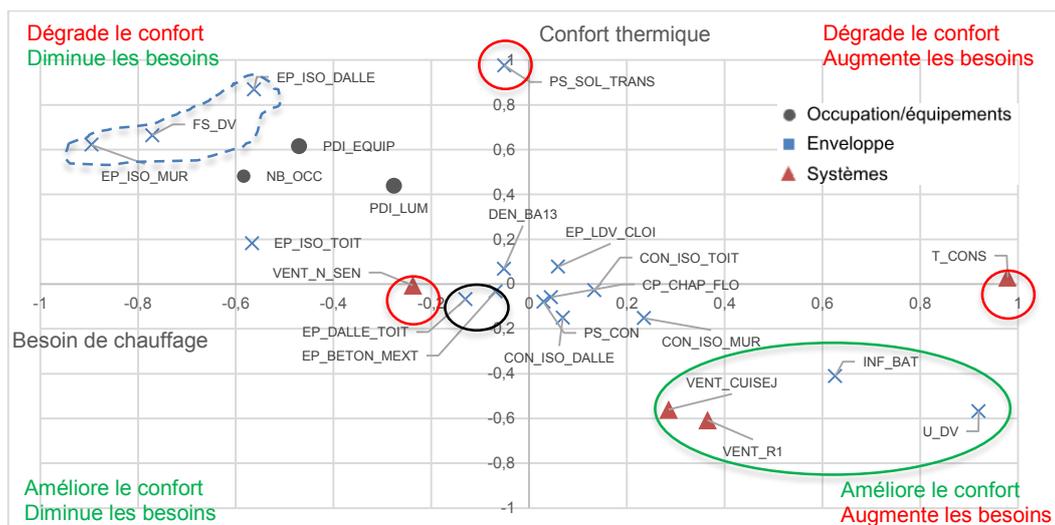


Figure 7 : graphique PRCC croisé

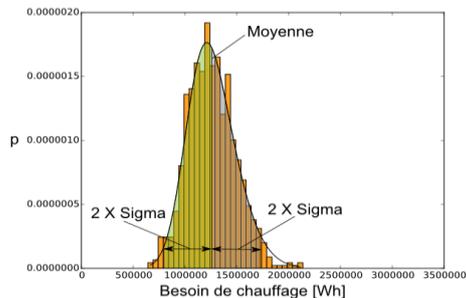
La figure ci-dessus présente les résultats du calcul des indices PRCC pour les deux indicateurs sous la forme d'un nuage de point. L'axe des abscisses caractérise l'effet des paramètres sur le besoin de chauffage, et l'axe des ordonnées l'effet sur le confort des occupants. Le graphique permet à la fois de quantifier l'effet des paramètres sur les indicateurs (distance du point à l'origine) et d'observer les interactions entre les deux objectifs. Les 3 catégories de paramètres sont identifiées par des symboles différents.

L'observation de la figure 7 permet faciliter les choix de conception de manière à favoriser le confort thermique des occupants tout en maîtrisant les consommations d'énergie. Les paramètres entourés en rouge et situés près des axes ont un effet sur un seul indicateur. Il est aisé de sélectionner une valeur dans l'intervalle de conception. Les paramètres cerclés en vert et en pointillé bleu ont des effets contradictoires sur les deux objectifs. Il est alors nécessaire de fixer une valeur pour obtenir un bon compromis, ou si possible d'appliquer un fonctionnement hiver/été (ventilation). Finalement, les paramètres cerclés en noir possèdent un impact positif sur les deux indicateurs. Leur valeur de conception peut être fixée à son maximum.

À l'issue du processus, chaque paramètre de conception se voit attribuer une valeur. Le choix est guidé par les résultats de l'analyse de sensibilité et la volonté du concepteur de privilégier tel ou tel indicateur.

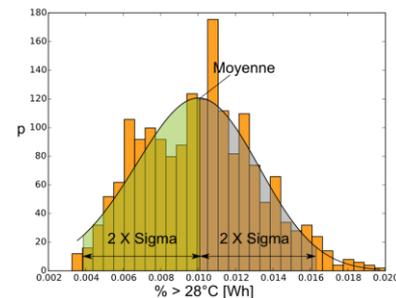
3.2. RESULTATS DE L'ETUDE APRES SELECTIONS DES PARAMETRES

Cette seconde étape a pour objectif de valider les choix effectués précédemment. Les paramètres de conception sont désormais considérés comme des paramètres incertains et sont régis par une loi normale caractérisée par la valeur nominale et l'incertitude liée à la mise en œuvre. Deux nouveaux échantillons de 900 et 785 simulations sont générés et calculés. L'analyse statistique des résultats est présentée ci-dessous :



Besoin annuel de chauffage	
Moyenne	1 259 kWh
Ecart-type	231 kWh
Incertitude	36%

Figure 8 : besoins de chauffage incertitude



% de dépassement de 28°C (occupation)	
Moyenne	1,00 %
Ecart-type	0,31 %
Incertitude	62 %

Figure 9 : inconfort thermique incertitude

On observe une nette diminution des niveaux d'incertitude par rapport au domaine de conception. A ce stade, il est possible d'estimer que la probabilité d'avoir un besoin de chauffage inférieur à 1 722 kWh est de 96%. Concernant le confort des occupants, le choix d'avantager cet indicateur lors de la sélection des valeurs de conception à l'étape précédente a permis d'améliorer très nettement les résultats. La probabilité d'obtenir un indicateur global de confort inférieur ou égale à 2% est de 99%.

4. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Cette étude propose l'utilisation des méthodes d'analyse de sensibilité pour étudier le comportement thermique d'un bâtiment et orienter les choix de conception lorsque les objectifs visés sont contradictoires. 3 méthodes distinctes ont été présentées puis utilisées pour observer l'effet des paramètres incertains sur les besoins de chauffage et sur un indicateur de confort thermique des occupants. Deux méthodes dites de régression SRC et PRCC et la méthode de criblage Morris. L'observation des résultats indique que les 3 méthodes permettent d'identifier les 15 paramètres les plus influents avec une bonne précision. Selon les indicateurs, les 3 ou 5 paramètres les plus impactant sont classés dans le même ordre. Ces résultats tendent à valider la performance des méthodes.

De manière à guider l'utilisateur dans les choix de conception, une représentation graphique des PRCC pour deux indicateurs est proposée. Elle permet de visualiser l'importance relative de chaque paramètre sur les deux objectifs de conception et d'opérer un choix en fonction des objectifs de la MOE.

Finalement une propagation d'incertitude est réalisée à partir des valeurs des paramètres retenus en y associant une incertitude. Les résultats permettent de valider les choix opérés à l'étape précédente tout en spécifiant un intervalle de confiance.

Par la suite une nouvelle AS pourrait être menée sur la base des échantillons calculés pour l'incertitude. Elle permettrait d'identifier quels sont les nouveaux paramètres les plus influents sur les indicateurs. Ils représenteraient « les points sensibles » de la conception qu'il serait nécessaire de

maîtriser tout au long du processus de conception/construction. Finalement, de nouvelles méthodes d'AS tel que les indices de Sobol pourraient être ajoutées pour consolider les résultats.

5. BIBLIOGRAPHIE

- Beck, Nathaniel. 2001. "OLS in Matrix Form" 1 (2): 1–14.
- Bruno Peuportier. 2016. *Energétique Des Bâtiments et Simulation Thermique*. Eyrolles.
<http://www.eyrolles.com/BTP/Livre/energetique-des-batiments-et-simulation-thermique-9782212142754>.
- Certivéa. 2011. "Guide Pratique Du Référentiel Pour La Qualité Environnementale Des Bâtiments - Bâtiments Tertiaires," 461.
- de Wit, Sten, and Godfried Augenbroe. 2002. "Analysis of Uncertainty in Building Design Evaluations and Its Implications." *Energy and Buildings* 34 (9): 951–58. doi:10.1016/S0378-7788(02)00070-1.
- Garcia Sanchez, D., B. Lacarrière, M. Musy, and B. Bourges. 2014. "Application of Sensitivity Analysis in Building Energy Simulations: Combining First- and Second-Order Elementary Effects Methods." *Energy and Buildings* 68 (PART C). Elsevier B.V.: 741–50. doi:10.1016/j.enbuild.2012.08.048.
- Hopfe, Christina, Jan Hensen, Wim Plokker, and Aad Wijsman. 2007. "Model Uncertainty and Sensitivity Analysis for Thermal Comfort Prediction," no. March: 1–10.
- Hopfe, Christina J., and Jan L M Hensen. 2011. "Uncertainty Analysis in Building Performance Simulation for Design Support." *Energy and Buildings* 43 (10). Elsevier B.V.: 2798–2805. doi:10.1016/j.enbuild.2011.06.034.
- Hygh, Janelle S., Joseph F. DeCarolis, David B. Hill, and S. Ranji Ranjithan. 2012. "Multivariate Regression as an Energy Assessment Tool in Early Building Design." *Building and Environment* 57. Elsevier Ltd: 165–75. doi:10.1016/j.buildenv.2012.04.021.
- Marino, Simeone, Ian B. Hogue, Christian J. Ray, and Denise E. Kirschner. 2008. "A Methodology for Performing Global Uncertainty and Sensitivity Analysis in Systems Biology." *Journal of Theoretical Biology* 254 (1): 178–96. doi:10.1016/j.jtbi.2008.04.011.
- Merheb, R. 2013. "Fiabilité Des Outils de Prévision Du Comportement Des Systèmes Thermiques Complexes." <http://www.theses.fr/2013BOR14959>.
- 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." *Ibpsa*, 1–8.
http://ibpsa.fr/jdownloads/Conferences_et_Congres/IBPSA_France/2014_conferenceIBPSA/Articles/recht-1144.pdf.
- Saltelli, A., T.H. Andres, and T. Homma. 1995. "Sensitivity Analysis of Model Output. Performance of the Iterated Fractional Factorial Design Method." *Computational Statistics & Data Analysis* 20 (4): 387–407. doi:10.1016/0167-9473(95)92843-M.
- Tian, Wei. 2013. "A Review of Sensitivity Analysis Methods in Building Energy Analysis." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 20 (April). Elsevier: 411–19. doi:10.1016/j.rser.2012.12.014.

ISABELE method: In-Situ Assessment of the Building Envelope performances

Pierre Boisson^{*1}, Rémi Bouchié¹

¹ Université Paris Est – Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB)
84 avenue Jean Jaurès – Champs-sur-Marne 77447 Marne-la-Vallée, FRANCE
[*pierre.boisson@cstb.fr](mailto:pierre.boisson@cstb.fr)

RESUME. Ce travail a pour vocation d'évaluer la performance énergétique « intrinsèque » de l'enveloppe d'un bâtiment à partir de mesures sur site au moment de la réception des travaux d'un bâtiment neuf ou à la suite d'une lourde rénovation. La méthodologie employée doit alors être suffisamment courte et réalisée sans présence d'occupants. Le principe général consiste à injecter une puissance de chauffage contrôlée à l'intérieur du bâtiment testé et de mesurer sa réponse thermique afin de remonter aux propriétés thermiques de l'enveloppe.

Pour y parvenir, une méthode d'identification basée sur un modèle thermique simplifié issu de la norme ISO 13790 a été développée. L'objectif est d'identifier le coefficient de déperditions thermiques par transmission H_{tr} de l'enveloppe, ainsi que d'autres paramètres d'inertie thermique.

Le but final est de détecter d'éventuels écarts entre les performances thermiques théoriques de conception et les performances réelles de l'enveloppe en termes de déperditions.

MOTS-CLÉS : garantie de performance, enveloppe, mesures in-situ

ABSTRACT. The scope of this work is to assess "intrinsic" energy performance of a building by developing a measurement methodology applicable at the acceptance step during the construction process of a new building or after deep refurbishment works on an existing building. This methodology must be short enough and is only applicable in buildings without occupant inside. The general principle is to inject a controlled heating power inside the tested building and to measure its thermal reaction in order to deduce the thermal properties of the envelope.

To achieve that, an identification method has been developed, based on the thermal model used in the international standard ISO 13790. The aim is to identify the heat loss coefficient by transmission through the building envelope H_{tr} , and thermal inertia parameters.

The final aim is to detect gaps between the design and as-built thermal performances of the envelope, especially for heat losses.

KEYWORDS : performance assessment, building envelope, in-situ measure protocol

1. INTRODUCTION

The scarcity of natural energy resources and the climate change issue have led all building industry actors to reduce energy consumption by constructing new efficient buildings and by improving existing buildings by refurbishments. Mostly, requirements and labeling of the building energy performances are based on theoretical calculations of energy use in the design phase. However, several studies showed that the actual energy performance after the construction phase may deviate significantly from the theoretical designed calculations (Sutton, Stafford, and Gorse 2012).

ISABELE method is a short method to characterize the thermal properties of the envelope of a building at the acceptance stage in controlled test conditions. It has been developed in order to be able to compare design and real building envelope performance.

It is important to notice that even if occupant behavior and energy system management are key points to achieve this goal, the real intrinsic thermal performance of the envelope is crucial. Performance gaps have been identified due to bad conception or workmanship: air circulations around insulation products can increase the U-value of a cavity wall by more than 300% (Hens 2007), and it has been shown that the overall heat loss through the envelope of houses, measured by co-heating tests, can be up to 200 % of its designed value (Sutton, Stafford, and Gorse 2012).

ISABELE method is intended to help to reduce gap between design and real energy performance and then promote the energy performance guarantee approach.

2. DESCRIPTION OF THE DEVELOPPED METHOD

2.1. TEST PROTOCOL

The purpose of this paper is to present a new building performance assessment method called ISABELE, which stands for “In-Situ Assessment of the Building Envelope performancEs”. This method has been developed in order to characterize the thermal properties of the envelope of a building at the acceptance stage after the construction process of a new building or after deep refurbishment works on an existing building. Therefore it must be short enough (2 weeks maximum) and is only applicable in buildings with no occupant inside. The general principle is to inject a controlled heating power inside the tested building and to measure its thermal reaction in order to deduce the thermal properties of the envelope.

The thermal properties we want to assess are the heat loss coefficient by transmission through the building envelope H_{tr} and linked thermal inertia. Performances are obtained by identification using a thermal model based on the French Thermal Regulation RT2012 (Th-BCE 2012) which is derived from the international ISO standard 13790:2013 (ISO-1 2013). The identification process consists in fitting the thermal model to the measured dynamic internal temperature using least squares minimization. It runs using hourly average data.

The experimental test protocol includes three steps, as shown in Figure 1:

- Step 1: No heating power injected. The aim at this stage is to assess initial thermal energy stored in the thermal mass of the building. If the building is in a quasi-permanent state before starting the test (internal temperature maintained to a quasi-constant value for several weeks), this step is not required.
- Step 2: Heating power injected to lead internal temperature to a fixed setpoint. The temperature setpoint is deduced from internal average temperature measured in step 1 in order to increase it by about 10 K.
- Step 3: Heating power is turned off to observe a free-decrease of the internal temperature.

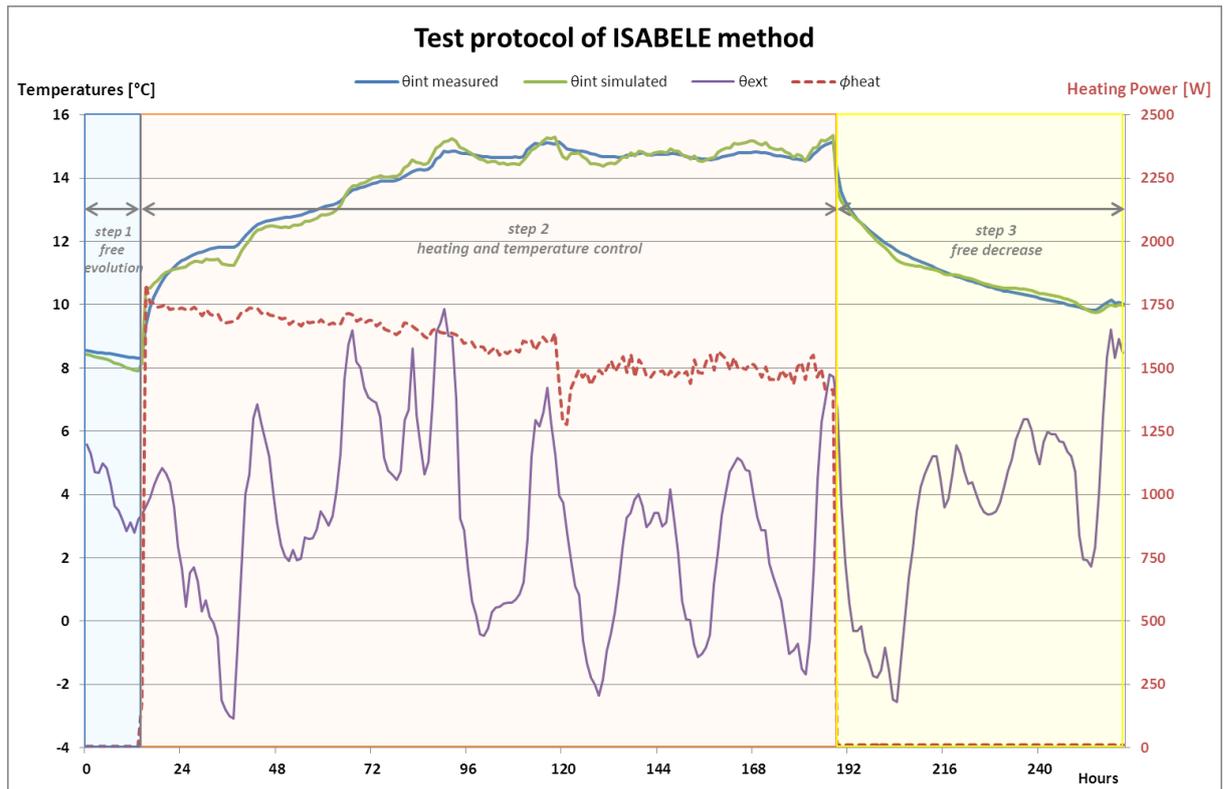


Figure 1: Principle and experimental steps for ISABELE method

At all steps, internal temperature, heat power injected, air infiltration rate and external climatic conditions (outside temperature, solar radiation, long-wave radiation, wind speed), are measured (or estimated) and then inputted in the model to identify H_{tr} and inertia parameters. Time step of several minutes are required for data measurements.

The identification process is based on the global heating power, so one of the difficulties is to reduce thermal impact of other parameters such as air infiltration and solar gain. To achieve this, all window shading devices must be shut down, ventilation must be turned off and the air intakes and outlets must be blocked during the entire test. It is also possible to measure thermal impact of air infiltration rate (by a gas tracer dilution method) or estimate it by calculation using airtightness and wind speed data.

For light inertia buildings a sequence of 2 or 3 days can be considered as sufficient. For higher inertia buildings this could lead to a reduced accuracy of results. Works are in progress to find the best balance between the results accuracy and the aim to have a short period for the experiment.

2.2. THERMAL MODEL USED

The identification procedure is based on the building thermal model used in French Thermal Regulation RT 2012 (Th-BCE 2012). This model runs with an hourly time step and includes five thermal resistances and one thermal capacity (Figure 2).

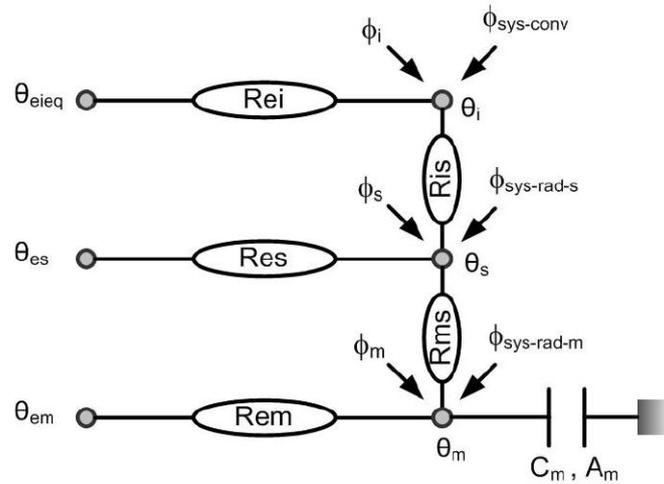


Figure 2: 5RIC thermal model used for the identification procedure (from (Th-BCE 2012))

θ_{eieq} , θ_{es} and θ_{em} are equivalent external temperatures, respectively for the air incoming in the building by ventilation and infiltration, for glazing components (windows, curtain walls...) and opaque walls.

θ_i and θ_s are indoor air temperature and a temperature mixing indoor air temperature with mean indoor radiant temperature. θ_s results from a conversion of a delta network in a star network.

R_{ei} and R_{es} are thermal resistances, in K/W, due to air renewal (by ventilation and by infiltration through to envelope) and thermal transmission through glazing components.

R_{is} is the thermal resistance due to internal thermal exchanges by convection and radiation.

Glazing components are supposed not to have a significant thermal mass that is why an equivalent external temperature θ_{es} variation is immediately visible on temperature node θ_s .

Thermal resistance of all opaque walls and thermal bridges R_{th} is splitted in two parts: an equivalent thermal resistance of the thermal mass R_{ms} due to internal exchanges between the thermal mass of heavy components and indoor environment, and the complementary resistance R_{em} (with $R_{th} = R_{em} + R_{ms}$). Between these two thermal resistances, the temperature node θ_m , corresponding to equivalent temperature of the thermal mass of the building, is plugged on the thermal capacity C_m .

Thermal flows injected on different internal nodes are divided between solar and internal free gains (Φ_i , Φ_s and Φ_m) and another part due to energy production of thermal emitters ($\Phi_{sys-conv}$, $\Phi_{sys-rad-s}$, $\Phi_{sys-rad-m}$). Thermal flows partition between these three temperature nodes depends on the type of emitted flows and standardized hypothesis (for example on partition between convective and radiant parts and on partition of direct solar gains (short longwaves) transmitted through windows on the air temperature θ_i and the other nodes θ_s and θ_m).

A sensor has been especially designed and validated to measure external thermal radiation effects on the envelope (solar absorption and long-wave radiation), i.e. to measure the equivalent external temperatures per façade θ_{es} and θ_{em} (Bouchié et al. 2014).

The conditions of the test protocol (no internal gain due to occupancy, all shutters closed) imply that:

$$\Phi_i = \Phi_s = \Phi_m = 0 \quad (1)$$

Concerning the heat production during the test protocol, the thermal flows due to emitters are considered only convective. Indeed the heat is provided by electric heaters that are accompanied with fans in order to homogenize the air temperature in the entire heated volume:

$$\Phi_{sys-rad-s} = \Phi_{sys-rad-m} = 0 \quad (2)$$

2.3. MODELING OF INERTIA

The thermal inertia used in the model of the RT2012 is the daily inertia that characterizes the damping of the daily temperature wave and the recovery rate of heat gains in winter (over 24 hours).

Th-I Rules (Règles Th-I 2012) define daily thermal inertia of a building zone with two parameters:

- The heat capacity for a wave of 24 hours (C_m , in kJ/K)
- The equivalent exchange surface of heavy walls with the indoor environment (A_m , in m²).

These two parameters are calculated as follows:

$$C_m = \sum_k A_k \chi_{d,k} \quad (3)$$

$$A_m = \left(\sum_k A_k \chi_{d,k} \right)^2 / \left(\sum_k A_k \chi_{d,k}^2 \right) \quad (4)$$

With:

A_k Surface of the wall k, in m²

$\chi_{d,k}$ Surface heat capacity of the wall k for a period of 24 hours (index d for daily period), in kJ/(m².K), calculated according to standard ISO 13786: 2008 “Thermal performance of building components — Dynamic thermal characteristics — Calculation methods” (ISO-2 2008), without taking into account the surface resistance.

In Equation 3, C_m is calculated without the inertia of furniture, which is normally considered on a fixed basis in Th-I Rules.

In the 5R1C model, the equivalent exchange surface A_m is used to calculate the thermal resistance R_{ms} with the following formula:

$$R_{ms} = \frac{1}{h_{is} A_m} \quad (5)$$

With:

h_{is} Sum of convective and radiant heat exchange coefficients, in W/m²/K

The first experiments of ISABELE method showed that for tests over one week and for buildings with heavy inertia, the daily inertia is not sufficient to reproduce the dynamic behavior of the building. Thus, it has been decided to slightly modify the model by adding a longer-term inertia, called “sequential inertia” (in Th-I Rules) and characterized by a wave of a period of 12 days.

Similarly as for the daily inertia, sequential inertia is defined by the parameters C_{ms} et A_{ms} :

$$C_{ms} = \sum_k A_k \chi_{s,k} \quad (6)$$

$$A_{ms} = \left(\sum_k A_k \chi_{s,k} \right)^2 / \left(\sum_k A_k \chi_{s,k}^2 \right) \quad (7)$$

With:

$\chi_{s,k}$ Surface heat capacity of the wall k for a period of 12 days, in kJ/(m .K)

The impacts of inertia are dealt by the principle of superposition of states: sequential effects using the RC network on a time step of one day can be superimposed on the daily effects treated in terms of deviation from the sequential values. Therefore an additional flow resulting from the resolution of a differential equation using the sliding 24h - mean value of θ_m and the sequential capacitance C_{ms} is injected in the temperature node θ_m in the 5R1C model.

Figure 4 illustrates the complementary RC network taking into account the sequential effects.



Figure 4: Secondary RC network for sequential inertia calculations

The resolution of the differential equation is performed using the sliding 24h - mean value of θ_m and the following parameters:

$$C_{m_sq} = C_{ms} - C_m \quad (8)$$

$$R_{ms_sq} = R_{ms_s} - R_{ms} \quad (9)$$

Where:

$$R_{ms_s} = 1 / (h_s A_{ms}) \quad (10)$$

2.4. IDENTIFICATION WITH LEAST SQUARES MINIMIZATION

It aims to identify the coefficient H_{tr} and A_m , C_m , A_{ms} and C_{ms} . H_{tr} is defined from the resistances of the model as follows:

$$H_{tr} = H_{tr,op} + H_{tr,w} = \frac{1}{R_{em} + R_{ms}} + \frac{1}{R_{es}} \quad (11)$$

With:

$H_{tr,op}$ Heat loss coefficient by transmission through the opaque walls, in W/K

$H_{tr,w}$ Heat loss coefficient by transmission through the windows, in W/K

In the minimization algorithm to converge faster and avoid getting away from the most likely solution, we choose to start from the theoretical solution, which corresponds to the design calculated values. We define the theoretical values of the desired parameters: $H_{tr,th}$, $H_{tr,op,th}$, $H_{tr,w,th}$, $A_{m,th}$, $C_{m,th}$, $A_{ms,th}$ and $C_{ms,th}$.

To limit the number of parameters to be identified, we choose to identify only one parameter for daily inertia (and similarly for sequential inertia). Indeed, A_m and C_m are relatively linked according to their formula, which suggests that they vary in the same direction and almost proportionally.

Thus we define the following ratios:

$$Cid_{H_{tr}} = H_{tr} / H_{tr_th} \quad (12)$$

$$Cid_{C_m} = C_m / C_{m_th} = A_m / A_{m_th} \quad (13)$$

$$Cid_{C_{ms}} = C_{ms} / C_{ms_th} = A_{ms} / A_{ms_th} \quad (14)$$

In this way, the three parameters that are identified are: $Cid_{H_{tr}}$, Cid_{C_m} et $Cid_{C_{ms}}$, and initial values are 1.

The RC network takes as inputs the following variables from the measurements:

- Rate of air infiltration, which is used to calculate R_{ei} .
- External temperature θ_e (θ_{eieq} is equal to θ_e because we consider only air infiltration from outside).
- Solar radiation and longwave radiation with the sky which are used to calculate the equivalent external temperatures θ_{em} and θ_{es} .
- Heating power $\Phi_{sys-conv}$.

The identification method minimizes the mean square error between simulated and the measured indoor temperature θ_i and uses “fminsearch” Matlab function, in which the algorithm is a Nelder-Mead simplex search method (Lagarias et al. 1998).

3. CONCLUSION

The proposed approach of ISABELE method to measure the intrinsic performance of building envelopes has been presented in this paper. Application of this method both on early stage virtual simulations and on real-scale houses and chalet can be found in other communications (Boisson and Bouchié 2014; Schetelat and Bouchié 2014; Brun, Boisson, and Thebault 2014).

Initial results based detailed simulations with SIMBAD tool are encouraging for the future because the coefficient H_{tr} is correctly identified: in the range of +/-5% in most cases (Boisson and Bouchié 2014).

Howether, some results have shown that taking into account the inertia in the identification model was quite rigid and not optimal for heavyweight buildings. A novel approach based on greybox modeling will be developed and presented in upcoming works, with special efforts in uncertainty quantification of ISABELE result, which is crucial to discern a real performance gap between theoretical and measured performance H_{tr} .

Studies are still being conducted on a broader spectrum, both in simulation and experimental tests to confirm the validity of the method and its feasibility.

4. BIBLIOGRAPHY

Boisson, P, and R Bouchié. 2014. “ISABELE Method : In-Situ Assessment of the Building Envelope Performances.” In *9th International Conference on System Simulation in Buildings*, 1:1–20.

Liege.

- Bouchié, Rémi, Stéphanie Derouineau, Charlotte Abele, and Jean-robert Millet. 2014. “Conception et Validation D ’ Un Capteur de Mesurage de La Température Extérieure équivalente D ’ Une Paroi Opaque D ’ Un Bâtiment.” In *Conférence IBPSA France*, 1–8. Arras.
- Brun, Adrien, Pierre Boisson, and Simon Thebault. 2014. “Short Methodologies for in-Situ Assessment of the Intrinsic Thermal Performance of the Building Envelope.” In *Sustainable Places*. Nice.
- Hens, Hugo. 2007. *Building Physics - Heat, Air and Moisture*. Ernst & Sohn.
- ISO-1. 2013. *ISO 13790:2013 - Energy Performance of Buildings - Calculation of Energy Use for Space Heating and Cooling*.
- ISO-2. 2008. *ISO 13786: 2008 - Thermal Performance of Building Components - Dynamic Thermal Characteristics - Calculation Methods*.
- Lagarias, J.C., J.A. Reeds, H. Wright, and P.E. Wright. 1998. “Convergence Properties of the Nelder–mead Simplex Method in Low Dimensions.” *Journal of Optimization* 9 (1): 112–17.
doi:10.1137/S1052623496303470. <http://people.duke.edu/~hpgavin/ce200/Lagarias-98.pdf>.
- Règles Th-I. 2012. “Caractérisation de L’inertie Thermique Des Bâtiments.” In *Règles Th-Bât Réglementation Thermique 2012*. CSTB Marne-la-Vallée, France.
- Schetelat, Pascal, and Rémi Bouchié. 2014. “ISABELE : A Method for Performance Assessment at Acceptance Stage Using Bayesian Calibration.” In *9th International Conference on System Simulation in Buildings*, 1–16. Liège.
- Sutton, Ruth, Anne Stafford, and Chris Gorse. 2012. “The Coheating Test : The Value of a Number.” http://www.leedsbeckett.ac.uk/as/cebe/projects/iea_annex58/coheating_test_value_of_a_number.pdf.
- Th-BCE. 2012. “Arrêté Du 30 Avril 2013 Portant Approbation de La Méthode de Calcul Th-BCE 2012 Prévus Aux Articles 4, 5 et 6 de L’arrêté Du 26 Octobre 2010 Relatif Aux Caractéristiques Thermiques et Aux Exigences de Performance énergétique Des Bâtiments Nouveaux.” *Journal Officiel n°0106*, p. 7782.

Caractérisation de paramètres et analyse d'identifiabilité par méthode Bayésienne appliquée au bâtiment

Simon Rouchier*¹

¹ LOCIE CNRS-UMR5271, Université de Savoie
Campus Scientifique, Savoie Technolac, 73376 Le Bourget-du-Lac, France
*simon.rouchier@univ-smb.fr

RESUME. La difficulté intrinsèque des problèmes inverses rend obligatoire un examen critique rigoureux de leurs résultats. L'identifiabilité des paramètres d'un modèle est une mesure de la fiabilité de l'estimation qu'on peut en faire à partir d'un jeu d'observations donné. Le travail présenté dans cet article est l'application de la méthode Bayésienne pour la résolution de deux problèmes inverses : la caractérisation des propriétés hygrothermiques d'un matériau, et le diagnostic des déperditions énergétiques à l'échelle d'un local. Le but est de démontrer l'intérêt de la méthode Bayésienne pour la résolution de problèmes inverses, et son applicabilité à tout type de phénomène physique.

MOTS-CLÉS. problème inverse, caractérisation, identifiabilité, Bayésien

ABSTRACT. The inherent difficulty of inverse problems makes a careful examination of their results mandatory. Parameter identifiability is a measure of the reliability of their estimation from a given set of observations. The present paper shows the application of Bayesian inference to the resolution of two inverse problems : the hygrothermal characterisation of a building material, and the thermal audit of a test box. The target is to demonstrate the potential of the Bayesian methodology for the resolution of inverse problems concerning any type of physical phenomenon.

KEYWORDS. inverse problem, characterization, identifiability, Bayesian

1 INTRODUCTION

Les méthodes inverses peuvent trouver de nombreuses applications dans le domaine des sciences du bâtiment, indépendamment du phénomène physique observé : mesure de la performance réelle de l'existant, caractérisation des matériaux et des systèmes, calibration de modèles, diagnostic énergétique... Ces méthodes sont un moyen de tirer des enseignements depuis des observations indirectes ou incomplètes, et ainsi de recourir à une instrumentation réduite et non intrusive sans perte de précision dans les variables recherchées.

Les problèmes inverses sont aujourd'hui un important sujet dans la science des transferts thermiques (Beck, 1985) et une large base documentaire est disponible pour comprendre et résoudre les défis qu'ils représentent (Maillet et al., 2014a,b; Alifanov, 2012; Kaipio & Fox, 2011; Stuart, 2013). Dans le domaine du bâtiment, les méthodes numériques pour leur résolution gagnent en popularité, du fait des enjeux du domaine et de leur accessibilité croissante. Certains exemples

d'application, entre autres, sont : la modélisation inverse de bâtiments multi-zone (Cai & Braun, 2015; Kramer et al., 2013), la caractérisation de propriétés hygrothermiques des matériaux (Rouchier et al., 2015; Biddulph et al., 2014), le diagnostic in-situ (Brouns et al., 2013) ou le calibrage de modèle en vue d'une réhabilitation (Heo et al., 2012).

La difficulté principale de résolution d'un problème inverse réside à la fois dans son caractère mal posé et l'effet d'amplification du bruit de mesure (Tarantola, 2005). Dans le cas de problèmes linéaires, cela revient à inverser une matrice mal conditionnée (Maillet et al., 2014a). En conséquence, de faibles erreurs d'observation peuvent entraîner d'importantes erreurs sur la valeur des paramètres identifiés. L'*identifiabilité* de chaque paramètre du problème n'est pas toujours garantie. Par conséquent, la solution d'un problème d'identification de paramètres doit toujours être assortie d'une information sur sa fiabilité, au moyen d'analyses de sensibilité ou d'identifiabilité (Brun et al., 2001; Raue et al., 2009).

Parmi les méthodes numériques disponibles pour la résolution des problèmes inverses, l'inférence Bayésienne associée à l'algorithme MCMC (Markov Chain Monte Carlo) est applicable à tout problème physique et toute classe de modèle du fait de son fonctionnement sans gradient. Cette méthode fait une description stochastique de chaque variable d'un problème, et ainsi renvoie une analyse d'incertitude complète sur tous les résultats du problème inverse : son application pour la garantie de performance des bâtiments est prometteuse.

Le travail présenté ici est l'application de la méthode Bayésienne à deux problèmes radicalement différents : la caractérisation de propriétés hygrothermiques à l'échelle d'un matériau, et le diagnostic des déperditions énergétiques à l'échelle d'un local. Le but est de démontrer l'intérêt de la méthode Bayésienne pour la résolution de problèmes inverses, et son applicabilité à tout type de phénomène physique.

2 PROBLÈMES INVERSES ET IDENTIFIABILITÉ

2.1 GÉNÉRALITÉS

L'objectif général d'un problème inverse est de trouver un ensemble d'inconnues θ , connaissant un ensemble d'observations Y :

$$Y = \mathcal{M}(\theta, e) + \varepsilon \quad (1)$$

où $\mathcal{M}(\theta, e)$ est la formalisation mathématique du problème physique, calculée depuis le vecteur des paramètres θ et des entrées fixes e , et ε est le bruit de mesure sur Y . Le problème inverse consiste donc à identifier certaines entrées d'un modèle en fonction d'une mesure de ses sorties. Dans une version plus générique du problème, les propriétés des incertitudes de mesure ε peuvent également être supposées inconnues, et calculées en même temps que θ . C'est le cas du problème montré dans la partie 4.

La méthode la plus courante pour résoudre l'équation 1 est de minimiser l'écart quadratique (moindres carrés) entre la mesure et la sortie du modèle \mathcal{M} , au moyen de méthodes d'optimisation (Evins, 2013). Une première catégorie de méthodes est l'ensemble des techniques à gradient déterministes (Chavent, 2010). Très efficaces et couramment utilisées, elles ne garantissent cependant pas de trouver l'optimum global d'un espace de recherche. Une deuxième catégorie est celle des algorithmes méta-heuristiques, par exemple génétiques (Evins, 2013; Kramer et al., 2013). Leur désavantage est cependant de ne fournir qu'une estimation ponctuelle des propriétés recherchées, sans information sur leur incertitude. L'inférence Bayésienne, en revanche, n'est pas une technique issue du domaine de l'optimisation. Son principe et son implémentation sont décrites dans la section suivante.

2.2 INFÉRENCE BAYÉSIENNE

Le principe de l'inférence Bayésienne est de tirer des enseignements d'observations incomplètes d'un système, et de mettre à jour une connaissance initiale *a priori* du problème avec

l'apport de données. Ce cadre est déjà appliqué aux problèmes inverses thermiques (Kaipio & Fox, 2011) et à la simulation du bâtiment (Biddulph et al., 2014; Zayane, 2011).

Dans le cadre Bayésien, toutes les grandeurs sont stochastiques et décrites par des densités de probabilité. Le principe de base est celui des probabilités conditionnelles :

$$p(\theta|Y) \propto p(Y|\theta) p(\theta) \quad (2)$$

où $p(\theta|Y)$ est la distribution a posteriori de la variable θ sachant les observations Y . $p(\theta)$ est la distribution a priori de θ , ou prior, c'est à dire une connaissance expert indépendante des mesures. $p(Y|\theta)$ est la vraisemblance d'une proposition de θ , obtenue par comparaison des observations et du modèle.

La solution du problème inverse, la distribution a posteriori, est un compromis entre la connaissance a priori sur θ et l'information apportée par les mesures Y . Le poids respectif de chacune de ces sources est déterminée d'une part par la quantité de données disponibles, et d'autre part par le raffinement du prior.

Dans le cas générique où le phénomène physique observé est représenté par un modèle de type boîte noire ou boîte grise, la distribution a posteriori $p(\theta|Y)$ ne peut pas être exprimée analytiquement. Elle est alors approchée par un échantillonnage produit par une méthode MCMC (Monte-Carlo par chaîne de Markov) comme l'algorithme de Metropolis-Hastings (Hastings, 1970).

2.3 ANALYSE D'IDENTIFIABILITÉ

La notion d'identifiabilité d'un paramètre de modèle mesure la précision avec laquelle il peut être estimé à partir d'un jeu d'observations donné. Un paramètre est identifiable si les intervalles de confiance de son estimation sont finis (Raue et al., 2009).

L'importance d'un paramètre dans les sorties du modèle, mesurée par une analyse de sensibilité, n'est pas une condition suffisante d'identifiabilité. Un bon exemple pour illustrer ce fait est l'exemple d'estimation d'une conductivité λ et d'une capacité thermique c_p à partir d'une même série de mesures de température : seul leur rapport (diffusivité thermique) peut être identifié, menant à une infinité de solutions pour chaque paramètre λ et c_p .

Dans ce travail, l'identifiabilité des paramètres de chaque modèle est illustrée par le raffinement des distributions a posteriori en fonction de la quantité de données fournies à l'algorithme MCMC.

3 APPLICATION 1 : MODÈLE HAM

3.1 PROBLÉMATIQUE ET PARAMÉTRISATION

Le premier des deux exemples sur lesquels l'inférence Bayésienne est illustrée ici est le cas des transferts couplés 1D d'humidité et de chaleur (HAM) à travers une paroi mono-couche. Le problème est la caractérisation des propriétés hygrothermiques d'un matériau de type isolant hygroscopique, sur la base de mesures dynamiques de température, d'humidité et de flux de chaleur dans le milieu et à ses bords. Il s'agit d'un benchmark numérique dont toutes les conditions sont décrites dans (Rouchier et al., 2015).

Le matériau est paramétrisé par un ensemble de 9 paramètres qui définissent l'ensemble de ses propriétés hygrothermiques et leurs variations. Leur définition est récapitulée dans le tableau 1. Une simulation dynamique d'une semaine, avec des valeurs de référence de ces propriétés, sert à produire les observations Y qui sont ensuite bruitées et utilisées pour estimer à nouveau θ .

3.2 RÉSULTATS

On a donné à l'inconnue θ un prior uniforme à 9 dimensions, représentant une connaissance faible sur les valeurs supposées de chaque paramètre. Trois instances de l'algorithme MCMC ont

TABLE 1: Parameterisation of material properties

Variable	Formulation	Paramètres
Capacité thermique c_p	Constant	1
Conductivité λ	Fonction linéaire de T et w	$\lambda_0 + \lambda_m \frac{w}{\rho t} + \lambda_t T$
Perméabilité δ_p	Interpolation linéaire	$[\delta_{p,25\%}, \delta_{p,75\%}]$
Capacité hygrique ξ	Polynôme de degré 2	$[\xi_{25\%}, \xi_{50\%}, \xi_{75\%}]$

été menées, utilisant respectivement 1, 2 et 7 jours de mesures, afin d’observer le raffinement progressif du posterior avec la quantité de données, et donc d’estimer qualitativement l’identifiabilité des paramètres. Les résultats sont montrés en figure 1.

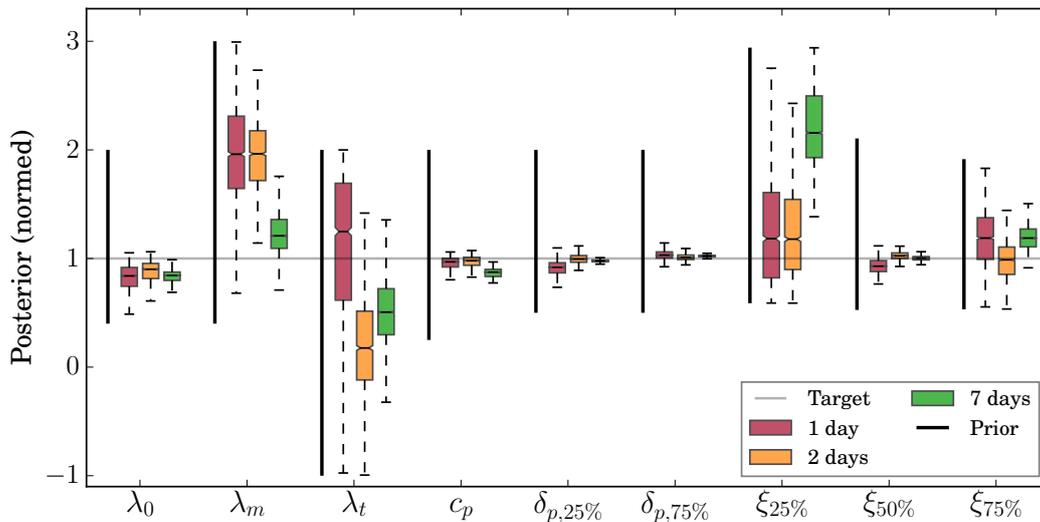


FIGURE 1. Distributions a posteriori de chaque paramètre du modèle HAM pour des temps de mesure croissants

Les distributions a posteriori montrent la qualité de l’estimation de chaque paramètre, et si une quantité plus ou moins importante de données est nécessaire pour une estimation précise. Certains paramètres (λ_0 , c_p , $\delta_{p,25\%}$, $\delta_{p,75\%}$, $\xi_{50\%}$) montrent un raffinement a posteriori rapide, indiquant qu’une faible quantité de données est suffisante pour en avoir une estimation précise. Un raffinement élevé n’est cependant pas une garantie d’exactitude de la solution, puisque cette convergence peut aboutir sur des valeurs éloignées de la cible. À l’opposé, les distributions de λ_t et $\xi_{25\%}$ demeurent larges après une longue période de mesure. Leur identifiabilité est donc plus faible dans cette expérience.

4 APPLICATION 2 : MODÈLE RC

4.1 PROBLÉMATIQUE ET PARAMÉTRISATION

Le second exemple d’application de l’inférence Bayésienne est une expérience réalisée dans le cadre de l’Annexe 58 de l’AIE (ECBCS, 2015). Il s’agit de l’installation *Round Robin Test Box* (RRTB), schématisée sur la figure 2, et dont les participants de l’Annexe étaient chargés de retrouver la composition sur la base des mesures d’ambiance fournies.

Le banc RRTB est représenté ici par un modèle 1R1C. La variable d’observation Y est la mesure de la température intérieure du banc. Les conditions aux limites du modèle RC sont la

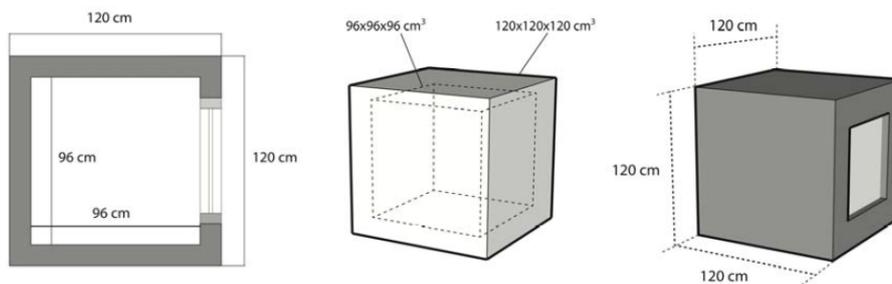


FIGURE 2. Banc de test RRTB de l'Annexe 58 (ECBCS, 2015)

température extérieure T_e , l'apport de chaleur interne Q_h et l'ensoleillement global horizontal q_{sw} .

L'installation est paramétrée par 3 valeurs inconnues : la résistance et la capacité thermiques globales, respectivement R et C , et un coefficient de gain solaire gA , sans dimension, qui représente un apport direct de chaleur dans la boîte à travers la vitre. L'incertitude de mesure sur Y est également considérée comme inconnue : on suppose un bruit de mesure Gaussien dont l'écart type σ doit être estimé. Le vecteur d'inconnues θ est donc à 4 dimensions.

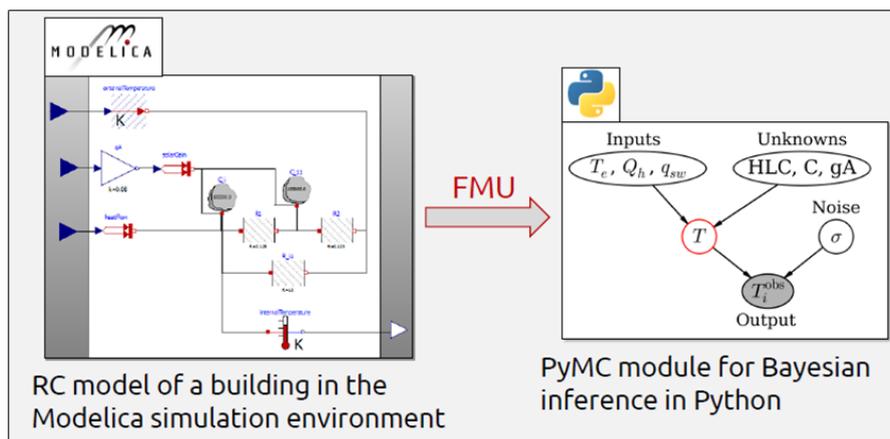


FIGURE 3. Co-simulation entre l'environnement de modélisation et le code pour l'automatisation des simulations

La procédure numérique pour la résolution du problème est résumée sur la figure 3 : le modèle RC est réalisé en langage Modelica, puis exporté sous le format FMU¹ pour être lu par l'algorithme MCMC implémenté en langage Python².

4.2 RÉSULTATS

Comme pour l'exemple d'identification HAM ci-dessus, trois instances de l'algorithme MCMC ont été menées avec des quantités variables d'observations. On a fait varier la quantité de mesures fournies à l'algorithme en supposant différents pas de temps d'acquisition pour une même durée totale de mesure (3h, 2h ou 1h). Un prior uniforme large a été assigné à chaque paramètre, à l'exception de l'incertitude de mesure de la température σ qui a un prior de type exponentiel (on suppose que le bruit de mesure est faible, sans exclure la possibilité du contraire). Les densités a posteriori obtenues pour chacune des 4 inconnues sont résumées en figure 4.

Contrairement au cas du benchmark numérique HAM, les valeurs réelles des paramètres sont inconnues. L'intervalle d'incertitude sur chaque paramètre identifié diminue avec la quantité de

1. <https://fmi-standard.org/>

2. <https://github.com/pymc-devs/pymc>

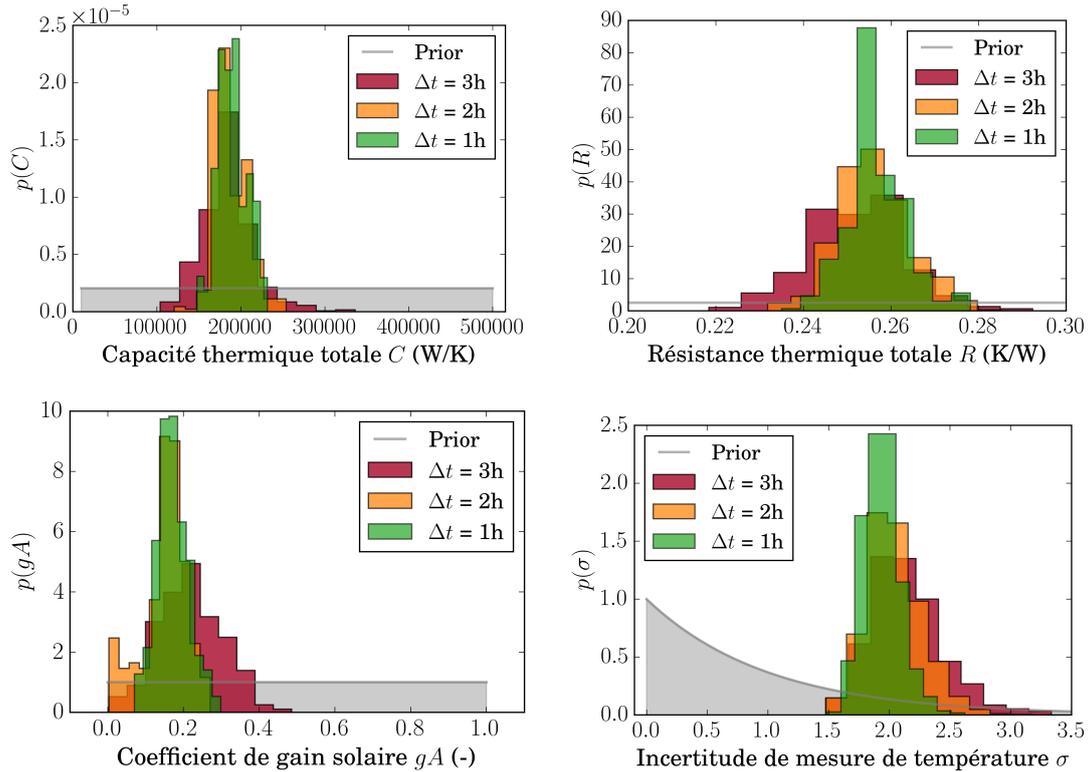


FIGURE 4. Distributions a posteriori de chaque paramètre du modèle RC pour des temps de mesure croissants

données. Pour chacune des 4 inconnues, on observe un raffinement conséquent des distributions a posteriori à partir du prior. Le biais apporté par le prior n'a que peu d'influence sur la solution. Par exemple, l'incertitude de mesure de température est estimée à environ 2 K, alors qu'elle était supposée plus faible avec un a priori relativement fort. Pour le cas des autres paramètres, le choix de distributions initiales uniformes ne favorise aucune solution dans les intervalles de recherche.

Il est à noter que le modèle 1R1C est une représentation très simplifiée du banc RRTB, décrit par seulement 3 grandeurs physiques. Par conséquent, l'identification de ces grandeurs est simple : sa complexité croît significativement si on recherche une description plus fine de l'installation.

5 CONCLUSION

L'intérêt de la méthode Bayésienne pour l'identification de paramètres de modèles est illustré ici sur la base de deux exemples : la caractérisation des propriétés hygrothermiques d'un matériau, et le calibrage du modèle RC d'un local. L'avantage de cette méthode pour la résolution des problèmes inverse réside d'une part dans son applicabilité générale à tout type de modèle, et d'autre part dans sa description stochastique de chaque variable : les variables identifiées sont automatiquement assorties d'intervalles de confiance.

Un aspect essentiel dans la résolution d'un problème inverse est la notion d'identifiabilité de ses inconnues. Celle-ci dépend de la paramétrisation du problème, autant que des mesures disponibles utilisées pour l'identification, leur type et leur quantité. Les résultats ont été présentés ici avec un moyen d'estimer qualitativement cette identifiabilité, en observant le raffinement progressif des distributions a posteriori en fonction du nombre de points de mesures.

RÉFÉRENCES

- Alifanov, O. M. (2012). *Inverse Heat Transfer Problems*. Springer Science & Business Media.
- Beck, J. V. (1985). *Inverse Heat Conduction : Ill-Posed Problems*. James Beck.
- Biddulph, P., Gori, V., Elwell, C. A., Scott, C., Rye, C., Lowe, R., & 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.
- Brouns, J., Nassiopoulos, A., Bourquin, F., & Limam, K. (2013). State-parameter identification for accurate building energy audits. In *Building Simulation 2013 conference* (pp.7). France : .
- Brun, R., Reichert, P., & Künsch, H. R. (2001). Practical identifiability analysis of large environmental simulation models. *Water Resources Research*, 37(4), 1015–1030.
- Cai, J. & Braun, J. (2015). An inverse hygrothermal model for multi-zone buildings. *Journal of Building Performance Simulation*, (0), 1–19.
- Chavent, G. (2010). *Nonlinear Least Squares for Inverse Problems : Theoretical Foundations and Step-by-Step Guide for Applications*. Springer.
- ECBCS, I. (2015). Annex 58 reliable building energy performance characterisation based on full scale dynamic measurements.
- Evins, R. (2013). A review of computational optimisation methods applied to sustainable building design. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 22, 230–245.
- Hastings, W. K. (1970). Monte Carlo sampling methods using Markov chains and their applications. *Biometrika*, 57(1), 97–109.
- Heo, Y., Choudhary, R., & Augenbroe, G. A. (2012). Calibration of building energy models for retrofit analysis under uncertainty. *Energy and Buildings*, 47, 550–560.
- Janssens, A., Roels, S., & Vandaele, L. (2011). Full scale test facilities for evaluation of energy and hygrothermal performances.
- Kaipio, J. P. & Fox, C. (2011). The Bayesian Framework for Inverse Problems in Heat Transfer. *Heat Transfer Engineering*, 32(9), 718–753.
- Kramer, R., van Schijndel, J., & Schellen, H. (2013). Inverse modeling of simplified hygrothermal building models to predict and characterize indoor climates. *Building and Environment*, 68, 87–99.
- Maillet, D., Jarny, Y., & Petit, D. (2014a). Problèmes inverses en diffusion thermique : Formulation et résolution du problème des moindres carrés. *Techniques de l'ingénieur - Transferts thermiques*, base documentaire : TIB214DUO(ref. article : be8266).
- Maillet, D., Jarny, Y., & Petit, D. (2014b). Problèmes inverses en diffusion thermique : Outils spécifiques de conduction inverse et de régularisation. *Techniques de l'ingénieur - Transferts thermiques*, base documentaire : TIB214DUO(ref. article : be8267).
- Raue, A., Kreutz, C., Maiwald, T., Bachmann, J., Schilling, M., Klingmüller, U., & Timmer, J. (2009). Structural and practical identifiability analysis of partially observed dynamical models by exploiting the profile likelihood. *Bioinformatics*, 25(15), 1923–1929.

- Rouchier, S., Woloszyn, M., Kedowide, Y., & Bejat, T. (2015). Identification of the hygrothermal properties of a building envelope material by the covariance matrix adaptation evolution strategy. *Journal of Building Performance Simulation*, 0(0), 1–14.
- Stuart, A. M. (2013). The Bayesian Approach To Inverse Problems. *arXiv :1302.6989 [math]*.
- Tarantola, A. (2005). *Inverse Problem Theory and Methods for Model Parameter Estimation*. SIAM.
- 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.

Impact des incertitudes de mesure des variables météorologiques sur le processus de comparaison mesure/simulation en simulation thermique dynamique

Jeanne Goffart*¹, Mickael Rabouille¹, Nathan Mendes¹

¹ Pontificia Universidade Católica do Paraná
1155 Rua Imaculada Conceição, Prado Velho, Curitiba, Brésil
*jeanne.goffart@gmail.com

RESUME. La quantification et la propagation des incertitudes sont primordiales dans le processus de la comparaison mesure/simulation. Les sollicitations météorologiques conditionnent le comportement du bâtiment et le niveau d'incertitude associé à certaine variable météo pourrait induire des incertitudes significatives sur la réponse d'une plateforme expérimentale. L'enjeu de cet article est de présenter une méthodologie pour quantifier cet impact. Pour cela, le profil temporel de la température sèche, de l'humidité relative et des rayonnements sont perturbés selon une incertitude de mesure aléatoire. Une analyse d'incertitude et de sensibilité est faite sur le modèle d'une des maisons de la plateforme expérimentale INCAS à travers les différents scénarios mis en place. Les résultats montrent un impact significatif des incertitudes sur le profil temporel de la température et humidité relative intérieures et notamment dû aux rayonnements solaires. Ainsi une pré-étude lors de la mise en place d'une plateforme expérimentale amènerait des informations pertinentes sur le niveau d'instrumentation requis.

MOTS-CLÉS : analyse de sensibilité et d'incertitude, comparaison mesure/simulation, incertitude des données météo

ABSTRACT. The quantification and the propagation of the uncertainties are paramount in the process of comparison of the measurement / simulation. The meteorological solicitations affect the behavior of the building and the level of uncertainty associated with some meteorological variables may involve a significant uncertainty on the response of the experimental platform. The aim of this article is to present a methodology to quantify this impact. For this, the temporal profile of the dry bulb temperature, relative humidity and radiations are disturbed by a random measurement uncertainty. An uncertainty and sensitivity analysis is performed on a model of one of the houses of the INCAS experimental platform across the different measurement scenarios implemented. The results show a significant impact of uncertainties on the temporal profile of the temperature and the humidity of the ambient and partly due to solar radiations. Thus a pre-study in the establishment of an experimental platform would bring relevant information about the level of instrumentation required.

KEYWORDS : Uncertainty and sensitivity analysis, comparison measure/simulation, uncertainty of weather data

1 INTRODUCTION

La communauté internationale de la thermique du bâtiment développe et valide des modèles utilisés dans la Simulation Thermique Dynamique (STD) depuis plus de 40 ans. Un des aspects de la méthodologie de validation consiste à la comparaison entre mesure et simulation. Dans le cadre du projet ANR FIABILITE (2010-2014) plusieurs plateformes expérimentales ont été mises à profit de manière à évaluer les principales sources de biais et d'incertitudes dans la simulation thermique dynamique. La présente étude s'appuie sur des travaux issus de cette collaboration nationale.

Le processus de calibration et/ou de validation de modèle est complexe de par l'ensemble des incertitudes qui y sont présentes. Elles interviennent à différents niveaux et sont de différentes natures. Il peut s'agir d'incertitude systématique ou bien aléatoire, des biais liés au modèle ou à des hypothèses sous-jacentes. Pour permettre une comparaison mesure/simulation il faut pouvoir évaluer l'ensemble des incertitudes présentes sur le signal mesuré mais également leurs effets sur les résultats de simulation. Or ce dernier aspect est fastidieux et complexe. Il existe en effet un nombre important de paramètres qui interviennent en STD. Il faut donc d'une part quantifier l'ensemble des incertitudes des entrées de la STD pour ensuite les propager dans la simulation afin d'obtenir un comportement non plus déterministe mais un intervalle de confiance.

Dans les travaux (Spitz 2012) et (Merheb 2013) les analyses d'incertitude et de sensibilité sont utilisées afin de réduire le nombre d'entrées sur lesquelles appliquer la quantification et la propagation des incertitudes. Cependant la plupart des études ne prennent en compte que les entrées dites statiques, c'est à dire constantes durant la simulation thermique dynamique. Les conditions limites telles que les occupants ou les variables météorologiques dites sollicitations temporelles ne sont que rarement prises en compte dans le processus de quantification des incertitudes en phase de validation (ou pour la comparaison mesure/simulation). Pourtant ces sollicitations sont prédominantes pour le comportement du bâtiment et parmi les entrées potentiellement les plus incertaines. Ce manque peut s'expliquer notamment par la difficulté de quantifier et propager les incertitudes sur un profil temporel. Par ailleurs, les méthodes d'analyse de sensibilité globale ne permettent pas *a priori* l'analyse de profils temporels. L'analyse de sensibilité doit se faire par groupe afin de préserver les autocorrélations des variables (Sobol 2007).

Il peut donc être intéressant d'évaluer la sensibilité d'un bâtiment expérimental futur, face à l'incertitude de mesure des données météorologiques. Une pré-étude basée sur les méthodes d'analyse de sensibilité et d'incertitude avec la STD renseignerait sur le niveau de précision nécessaire pour la mesure de chaque variable. Cette pré-étude influencerait le choix de la station météorologique et justifierait éventuellement l'achat de capteur plus précis pour certaines variables météorologiques mais plus coûteux alors que d'autres variables météorologiques ne nécessiteraient pas ce niveau de précision.

Le présent papier, propose une nouvelle approche d'analyse de sensibilité et d'incertitude sur les variables météorologiques mesurées afin de quantifier leur impact sur l'ambiance d'un modèle thermique d'une maison individuelle issue d'une plateforme expérimentale. L'enjeu est d'illustrer les capacités des méthodes d'analyse de sensibilité et d'incertitude lors de discussions sur les choix d'instrumentations et éventuellement des scénarios pouvant être mis en place pour l'exploitation de la plateforme. Les variables météorologiques considérées sont la température sèche, l'humidité relative et les rayonnements (global horizontal, direct normal et diffus horizontal).

2 METHODOLOGIE

2.1 PRINCIPE DES ANALYSE DE SENSIBILITE ET D'INCERTITUDE

Le schéma en Figure 1 illustre le principe de l'analyse d'incertitude dans le cas simple des entrées statiques. Un échantillon de N simulations est généré en tirant aléatoirement et indépendamment les valeurs de chaque entrée X_i à partir de la définition de leur incertitude (loi de distribution ou fonction de répartition), représentée par une loi normale sur le schéma. N valeurs de sortie (dans ce cas scalaire)

sont obtenues après propagation de la matrice d'échantillon des entrées. A partir de ces N valeurs de Y on établit l'intervalle de confiance (l'incertitude) sur la sortie. On calcule ensuite les indices de sensibilité pour identifier les entrées responsables de la dispersion de sortie.

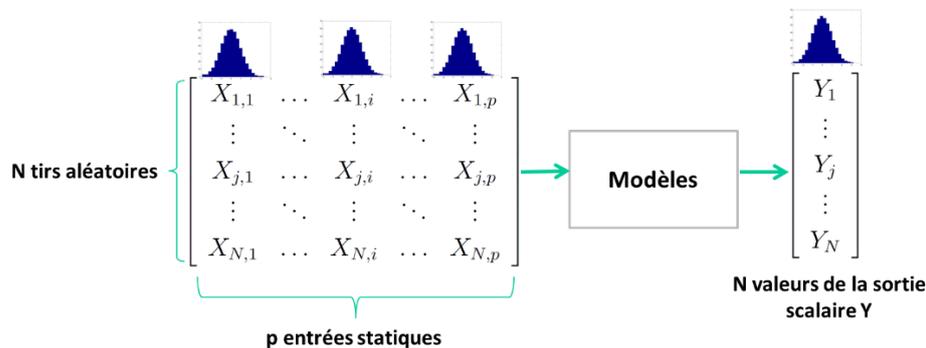


Figure 1. Schéma du principe de l'analyse d'incertitude.

Si on transpose le cas ci-dessus avec p entrées statiques, à un cas avec k variables météorologiques de N_t pas de temps (i.e. $N_t = 8760$ pour une année au pas de temps horaire), chaque $X_{j,i}$ représenté en Figure 1 n'est plus une valeur mais un vecteur et chaque X_i est associé à une variable météorologique qui est une matrice de N par N_t . Chaque matrice représente une variable météorologique : température, humidité, rayonnement, etc. Nous souhaitons évaluer l'influence de chaque groupe et donc chaque variable météorologique sur le mois entier et non l'influence à chaque pas de temps. Pour cela on évalue les indices de sensibilité par groupe (Sobol 2007). Cette méthode permet d'évaluer la part de variance (les variations) de sortie induite par la variance de chaque groupe d'entrées (i.e. chaque variable météo). Une des conditions fortes est l'indépendance dans l'échantillonnage de chaque groupe (ce qui est respectée car les incertitudes générées dans notre cas sont aléatoires et indépendantes des incertitudes des autres variables). On obtient l'effet seul du groupe ou de l'entrée X_i sur Y défini par S_i l'indice du premier ordre (Sobol 1993) :

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

Telle que $V(\cdot)$ la variance et $E(\cdot)$ l'espérance mathématique. Les indices de sensibilité de Sobol sont robustes, populaires, intuitifs et compatibles avec l'analyse de sensibilité par groupe. Les indices sont compris entre 0 et 1, avec 0 exprimant aucun effet de la variable sur la sortie, et 1 toute la variance de sortie est expliquée par la variance partielle produite par l'entrée incertaine. Si l'on ne considère que des entrées statiques il est recommandé d'utiliser la méthode RBD-FAST qui nécessite un nombre beaucoup moins important de simulations pour la convergence. Voir (Goffart 2015) pour plus d'informations et quelques descriptions des bonnes pratiques pour l'analyse de sensibilité en STD.

2.2 INCERTITUDE DES CAPTEURS METEO

Pour permettre l'analyse de sensibilité une étape importante est la quantification des incertitudes (Lilburne 2009). Dans le cadre de ce travail on se concentre sur l'incertitude de mesure de certaines variables météorologiques et du possible impacte sur les performances du bâtiment. La nature de la loi de distribution associée à la mesure est une loi normale. On définit donc les valeurs d'incertitudes à 95 % de niveaux de confiance.

En termes de métrologie, l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM) est une référence, elle publie des rapports sur les niveaux acceptables pour la mesure des grandeurs météorologiques ainsi que des bonnes pratiques pour le traitement de ces mesures (OMM, 2014). L'OMM définit ainsi différents niveaux de qualité de mesure pour le cas d'un pyranomètre (mesure du rayonnement global et du diffus): la qualité supérieure, associée aux appareils d'étalonnage avec 3 % d'incertitude en horaire ; la bonne qualité, pour une exploitation du réseau avec 8 % en horaire et 5 % en journalier, ce qui correspond à un pyranomètre de classe 1 ; et enfin la qualité moyenne, avec 20 % d'incertitude horaire et 10 % en journalier qui correspond à un pyranomètre de classe 2. En termes d'humidité relative et de température plusieurs fabricants sont étudiés dont *Honeywell* ; *Sensirion*, *Siliconlabs*. Les niveaux de précision vont respectivement de 1,7 % HR et 0,2 °C en passant par 3 % HR et 0,5 °C pour finalement atteindre une moyenne qualité de 5 % HR et 1 °C.

Dans le cadre de ce travail nous souhaitons évaluer la réponse du bâtiment dans un cas correct mais peu optimisé pour la précision des capteurs. Les valeurs retenues pour les plages de variations des entrées météorologiques sont donc associées au niveau bas de précision parmi les capteurs fins, telles que pour la valeur horaire de mesure est associée l'incertitude suivante à 95 % d'intervalle de confiance :

- Humidité Relative $\pm 5\%$
- Température sèche : $\pm 1^\circ\text{C}$
- Rayonnements : $\pm 20\%$

Les rayonnements font référence au trois composantes sachant que le global et le diffus sont estimés par pyranomètre dont l'incertitude de classe 2 est de 20 % et que le calcul du direct fait intervenir par conséquent au minimum 20 % d'incertitude.

3 CAS D'ETUDE

3.1 MODELE THERMIQUE

Le bâtiment simulé est la maison Béton Banché (BB) de la plateforme expérimentale INCAS sur le site de l'INES au Bourget du Lac. Le modèle thermique a été développé lors du projet ANR FIABILITE (Stefaniou 2014) pour l'étude de la validation et la calibration de la STD. Le modèle est configuré pour suivre les scénarios mis en place dans le bâtiment expérimental (Jay 2012). L'outil de simulation est EnergyPlus V8.4. L'ensemble des hypothèses de simulation sont décrites dans (Stefaniou 2014).

La maison BB est une maison basse consommation de stratégie d'économie d'énergie dite "passive" dont l'isolation des murs, des planchers et des plafonds ainsi que l'inertie est importante. La structure est composée de 15 cm de béton banché et de 20 cm d'isolation par l'extérieure en polystyrène extrudé. Les gains solaires sont maximisés en hiver par les larges baies vitrées du côté Sud. En été le bâtiment se protège de ces gains par des protections solaires dues au débord de toit et au balcon. Le modèle EnergyPlus est constitué de 4 zones thermiques qui correspondent au 4 niveaux du bâtiment : le rez-de-jardin (RDJ), l'étage, le vide sanitaire et les combles.

Les scénarios mis en place s'étendent de la période du 13 septembre 2011 au 22 avril 2012. Avec 9 scénarios dont un d'initialisation (scénario 0). Pour illustrer le propos de cet article l'ensemble de la période des scénarios est étudié. Les scénarios concernent les composants suivants :

- L'état des volets (**F**ermeture/**I**ntermittent/**O**uverture) ;

- Le régime de la double flux (by-pass forcé (**Marche-Forcée** : contourne l'échangeur) / **Auto**) ;
- Le débit de la VMC en m³/h selon 4 niveaux (**0/ 1** : 110/ **2** : 135/ **3** : 270) ;
- La consigne de chauffage (**Off/20°C/22°C/24°C**) ;
- La mise en place d'une séparation entre RDJ et Etage(**Off/On**).

L'ensemble des scénarios sont regroupés dans (Jay 2012). Les données météo qui on servit pour la comparaison proviennent de l'aéroport. Les sorties étudiées sont la température intérieure et l'humidité relative du RDJ.

3.2 PROCEDURE DE GENERATION DES INCERTITUDES ET DE SIMULATION

L'objectif de l'étude est d'obtenir le profil d'incertitude de la température et humidité relative intérieures sur la période correspondant à la campagne de mesure. On souhaite également obtenir l'influence de chaque variable météorologique sur la période d'étude.

Pour cela, on génère une incertitude aléatoire sur le profil de référence des variables. Il s'agit des données mesurées à l'aéroport de Aix-Chambéry durant la période d'étude. On génère tout d'abord des matrices correspondant à l'incertitude aléatoire définit en section 2.2 et on ajoute cette incertitude au profil. Le résultat donne un signal bruité aléatoire pour chaque pas de temps. L'opération est répétée pour la température sèche, l'humidité relative et les rayonnements où l'incertitude associée au rayonnement global horizontal est également associée aux rayonnements direct normal et diffus horizontal. On crée 1000 échantillons puis on perturbe ces 1000 échantillons pour en générer 1000 autres selon la méthodologie de (Mara 2008) afin d'obtenir les indices de sensibilité des 3 variables avec seulement 2000 simulations.

Afin de garder une cohérence physique sur l'impact de l'incertitude de la température sèche et de l'humidité relative la température humide est recalculée à partir de leurs valeurs et de la valeur de la pression selon les équations psychrométriques d'EnergyPlus. On propage ensuite ces échantillons dans le modèle pour obtenir l'intervalle de confiance sur les profils temporelles de la température et de l'humidité relative de l'ambiance intérieure du RDJ, ainsi que les indices de sensibilité pour chaque entrée que sont les rayonnements, la température sèche et l'humidité relative. Le temps de simulation du modèle est d'environ 16 secondes, ce qui pour 2000 simulations amène un temps de calcul de moins de 9h, soit environ 2 h sur les 4 processeurs d'un ordinateur classique.

4 RESULTATS

La Figure 2 regroupe l'ensemble des informations de l'étude pour la température et l'humidité relative à travers deux groupes de trois sous graphes chacun. Le premier groupe (*A*) correspond aux informations relatives à la température de l'ambiance du RDJ et le second groupe (*B*) correspond à l'humidité relative. Pour chaque sortie d'intérêt (groupe) on représente en premier sous graphe l'évolution sur la période d'étude ; les couleurs bleu et rouge représentent respectivement la limite haute et basse des 95 % d'informations des 1000 simulations. La moyenne journalière des conditions extérieures (respectivement la température et l'humidité relative extérieures) sont représentées en gris clair selon les mêmes limite haute et basse des 95 % d'informations pour les 1000 fichiers météos générés. Le second sous graphe est l'erreur (écart-type) des 1000 résultats pour chaque pas de temps horaire. Et le troisième représente les indices de sensibilité pour les trois variables associées à la sortie

étudiée. Pour permettre la visualisation de l'impact des scénarios, ceux-ci sont délimités par les dates de début et fin ainsi qu'un tableau décrivant les conditions expérimentales associées.

En Figure 2A on observe que l'erreur sur le profil de température est relativement faible avec un écart-type de moins de 0.4 °C, ce qui à 95 % d'intervalle de confiance n'excède pas une valeur de température à ± 0.8 °C soit moins d'un degré. L'évolution des erreurs dépend du scénario, on observe que cette erreur augmente lorsque le rayonnement solaire devient plus influent (en rouge dans le troisième sous graphe). Il s'agit de période où les volets sont ouverts. L'humidité relative extérieure pour la température intérieure n'est pas influente contrairement à l'humidité relative intérieure (Figure 2B).

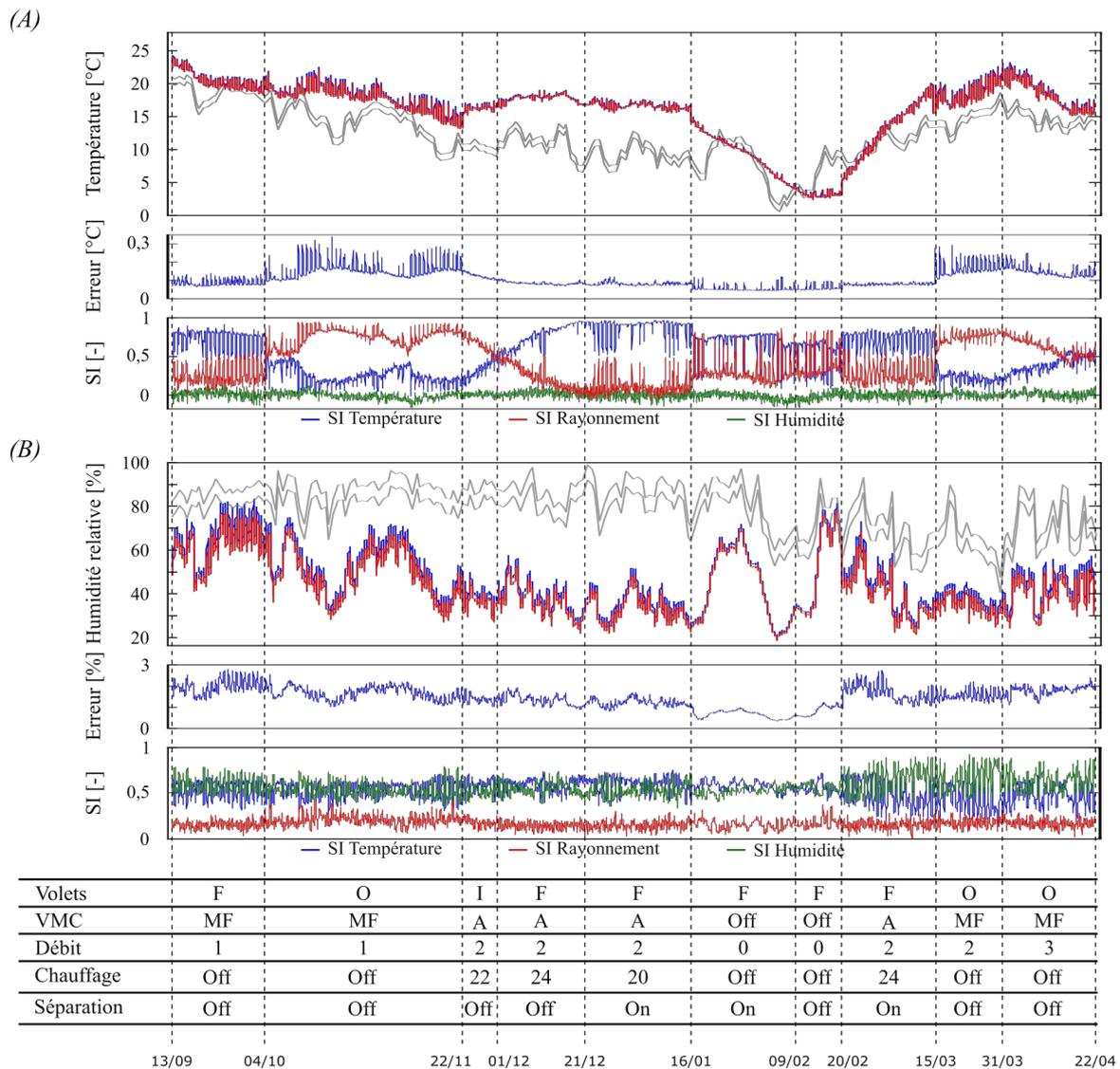


Figure 2 : Evolutions temporelles, erreurs et indices de sensibilité pour la température (A) et l'humidité relative (B) de l'air intérieur du RDJ en fonction des différents scénarios sur la période expérimentale

En Figure 2B, pour l'humidité relative on observe que l'incertitude la plus basse est lorsque l'environnement est contrôlé. Sinon, elle est assez constante et les indices de sensibilité également. Il s'agit d'un effet conjoint de l'humidité et la température extérieures.

En ce qui concerne la détermination de l'influence de chaque paramètre sur l'erreur, il faut rester prudent face à l'interprétation des indices sachant que l'on est dans un cas temporel. Les indices de sensibilité de Sobol sont normalisés par la variance totale à chaque pas de temps. Ainsi dans la Figure 2A on observe que l'effet du rayonnement solaire augmente pour les cas avec volets ouverts (O) et la température diminue. Sachant que la somme des effets doit faire un, il devient délicat d'identifier les causes et conséquences de ce changement d'influence : est-ce la température qui devient moins influente et laisse la place au rayonnement ou est-ce le contraire, *i.e.* le rayonnement devient influent et écrase l'impact de la température ? Pour remédier à cette difficulté d'interprétation, nous avons évalué la variance partielle de chaque variable (non montrée ici). Il s'agit bien du rayonnement solaire qui augmente et écrase la température. Ici l'explication est assez simple à obtenir mais dans le cas de plus d'entrées et de cas plus complexes le développement de nouveau indicateur peut être intéressant.

On observe en Figure 2A que l'influence du rayonnement solaire reste ; lors des scénarios avec volets ouverts, a une valeur au-dessus de 0.5 et ce, également durant la nuit où le rayonnement n'est pas présent. Ce qui montre que le rayonnement solaire a un impact la nuit, qui est dû à l'inertie du bâtiment. Cette constatation a également été faite par comparaison avec une maison type INCAS dite dégradée pour laquelle l'influence du rayonnement solaire la nuit était nulle (Goffart 2013).

Ainsi des niveaux d'incertitudes réalistes pour la mise en place d'une plateforme expérimentale montre que l'impact sur les modèles de STD reste assez minime notamment pour un cas d'étude inertiel et isolé. La maison BB est en effet moins sensible à la température et humidité contrairement aux rayonnements dans la gamme d'incertitude considéré pour les variations des variables d'entrées. L'enjeu de cette étude est de montrer que pour un cas de calcul modéré d'environ 2h sur un poste de travail, on peut obtenir une évaluation de l'impact des niveaux d'incertitude. Ce qui peut renseigner également sur les phénomènes en jeu et sur l'impact de certains aspects de la simulation grâce à l'enchaînement des scénarios.

5 CONCLUSION

Nous avons montré qu'à faible coût une pré-étude peut être menée sur une future plateforme expérimentale de manière à évaluer l'impact des incertitudes de mesure sur la performance et l'ensemble des phénomènes du bâtiment. Les méthodes d'analyse de sensibilité et d'incertitude sont utilisées pour cette évaluation. Les niveaux d'incertitude de sortie sont satisfaisants bien que les incertitudes des entrées soient associées à des capteurs dits de moyenne qualité. Cependant il s'agit de la période hivernale avec un rayonnement plus faible. Il serait intéressant de répéter l'étude sur des scénarios en été. Par ailleurs les résultats dépendent du cas d'étude qui est inertiel et optimisé énergétiquement.

Lors des recherches effectuées pour ce travail d'autres problématiques ont été soulevées :

- Le calcul du rayonnement solaire et les incertitudes associées. Dans l'étude présentée, l'incertitude associée aux rayonnements solaire a été considérée équivalente quelques soit la composante du rayonnement. Or la détermination de la composante directe en fonction de la mesure des autres peut amener à de forte incertitude en fonction du modèle solaire utilisé. Ainsi le choix du modèle solaire impacte potentiellement sur le résultat.
- Les autres incertitudes relatives à la station météo comme sa mise en place. Les incertitudes prises en compte dans ce travail sont de type aléatoire. D'autres types d'incertitude pourraient être pris en

compte mais un travail important de quantification doit être fait. Par exemple, Météo-France estime qu'une mauvaise mise en place d'une station météo (plus de 50 % de béton dans la zone) impacte le résultat de température de $\pm 5^{\circ}\text{C}$. Le comportement de l'incertitude est de type biais. L'inertie du béton en contrebas amène une incertitude plus complexe qui peut être autocorrélée. Dans ce cas, l'incertitude aura sûrement un impact plus important sur le bâtiment (qui peut être assimilé à un filtre basse pass).

- Les incertitudes en fonction de la gamme mesurée. Dans la plupart des fiches techniques de capteur, l'incertitude double voir triple dès que des valeurs au-delà de 90 % HR sont mesurées. Ce qui pour un climat tempéré a peu d'impact. Or pour le cas du Brésil par exemple ou en général les climats tropicaux et donc à forte humidité, l'impact peut être particulièrement important. Une étude récente sur les modèles d'humidité et l'incertitude de certaines hypothèses en amont de ces modèles, montre par exemple que la définition de la courbe de sorption dans les niveaux importants d'humidité joue un rôle très important (Goffart 2015). Ainsi l'addition d'une incertitude impacterait fortement. Pour le cas de climat à forte humidité, la précision sur la haute humidité devra être particulièrement contrôlée (stabilité de mesure à haute HR). Or c'est dans les périodes extrêmes qu'un besoin de précision dans la mesure est nécessaire pour justement évaluer l'adaptation du bâtiment aux phénomènes critiques.

6 REFERENCES

- 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*, décembre, 1-21. doi:10.1080/19401493.2015.1112430.
- Goffart, Jeanne, 2013 « Impact de la variabilité des données météorologiques sur une maison basse consommation. Application des analyses de sensibilité pour des entrées temporelles » Thèse de doctorat de l'Université de Grenoble
- Jay, Arnaud, 2012. « Description détaillée des dispositifs expérimentaux et de leur instrumentation (T0+12) » 4.3. ANR Fiabilité. Le Bourget du Lac, 2012, rapport technique, CEA
- Lilburne, L. and S. Tarantola. 2009. « Sensitivity analysis of spatial models » *International Journal of Geographical Information Science*, 23(2) :151–168
- Mara, Thierry and Onimihamina Rakoto Joseph. « Comparison of some efficient methods to evaluate the main effect of computer model factors ». *Journal of Statistical Computation and Simulation*, 78(2) :167–178
- Merheb, Rania, 2013 « Fiabilité des outils de prévision du comportement des systèmes thermiques complexes », Thèse de doctorat de l'Université de Bordeaux
- OMM, 2014 « Guide des instruments et des méthodes d'observation météorologiques: (guide CIMO) », 2014 (édition 2008, mise à jour en 2010), 742 p., (OMM N°8) ISBN : 978-92-63-20008-2 <http://library.wmo.int/>
- Sobol, I. M. 1993 « Sensitivity estimates for nonlinear mathematical models ». *Mathematical Modelling and Computational Experiment* 1 :407-414
- Sobol, I., Tarantola, S., Gatelli, D., Kucherenko, S., et Mauntz, W. 2007. « Estimating the approximation error when fixing unessential factors in global sensitivity analysis ». *Reliability Engineering & System Safety*, 92 :957-960
- Spitz, Clara, 2012 « Analyse de la fiabilité des outils de simulation et des incertitudes de métrologie appliquée à l'efficacité énergétique des bâtiments », Thèse de doctorat de l'université de Savoie
- Stefanoiu, Ana Maria, Monika Woloszyn, Etienne Wurtz, Arnaud Jay 2014 « Comparaison mesures-simulations et analyse de sensibilité », Conférence Francophone IBPSA France, Arras.

Surfaces de réponse pour l'étude de la réflectivité solaire et l'isolation des toitures des bâtiments commerciaux au Brésil.

Mickaël Rabouille*¹, Jeanne Goffart¹, Nathan Mendes¹

¹ Pontifícia Universidade Católica do Paraná
1155 Rua Imaculada Conceição, Prado Velho, Curitiba, Brésil
*mickael.rabouille@gmail.com

RESUME. Cet article présente une méthodologie basée sur les surfaces de réponse afin de produire une visualisation complète du comportement de la toiture en fonction de ses entrées les plus influentes. Ces entrées sont l'épaisseur d'isolation, la réflectivité solaire et l'émissivité thermique. La construction de la surface de réponse est réalisée via un métamodèle par développement en polynôme de chaos (PCE). L'étude porte sur le potentiel d'amélioration des toitures des bâtiments commerciaux au Brésil et considère d'une part un critère relatif à la performance de la toiture et d'autre part à l'îlot de chaleur urbain. Les climats de deux villes – Curitiba et Recife – sont étudiés. La méthodologie des surfaces de réponses est générique et permet l'évaluation rapide et visuelle des performances de la toiture sur plusieurs critères en fonction de l'ensemble des opérations d'isolation et de réflectivité sur la toiture. Les interactions entre variables sont aisément visualisées ainsi que l'impact de la dégradation des matériaux sur les performances.

MOTS-CLÉS : Métamodèle, Toiture réfléchive, Climatisation.

ABSTRACT. This article presents a methodology based on the response surface to produce a complete visualization of the behavior of the roof based on its most influential inputs. These inputs are the thickness of insulation, the solar reflectivity and the thermal emissivity. The construction of the response surface is performed via a metamodel constructed by polynomial chaos expansions (PCE). The study focuses on the potential for improvement of the roofs of commercial buildings in Brazil and considers first a criterion relating to the performance of the roof and another one related to the urban heat island effect. The climate of two cities – Curitiba and Recife – have been studied. The response surface methodology is generic and allows quick and visual evaluation of the roofing performance on several criteria according to the set of the values of the thickness insulation and the reflectivity. The interactions between variables are easily visualized as well as the impact of the deterioration of materials on the performance.

KEYWORDS : Metamodel, CoolRoof, Cooling needs.

1 INTRODUCTION

Cela fait quelques années que les effets bénéfiques des toitures réfléchives (« CoofRoof ») sur la réduction de consommation de climatisation et sur la diminution de l'îlot de chaleur urbain ont été montrés (Parker et Barkaszi 1997; Magli et al. 2015; Hernández-Pérez et al. 2014). Cependant, peu d'études sont disponibles pour le cas des climats tropicaux (Suehrcke, Peterson, et Selby 2008; Zingre et al. 2015) et notamment pour le Brésil (Brito Filho et Santos 2014). Or la généralisation des *CoolRoofs* dans l'existant et la définition de bonnes pratiques au Brésil pourrait diminuer les besoins en refroidissement et donc les consommations du secteur bâtiment responsables de 50 % de l'énergie finale en 2014 et en augmentation par rapport à 2010. Par ailleurs, leur mise en place minimiserait l'îlot de

chaleur urbain particulièrement présent dans les grandes métropoles brésiliennes pour la plupart peuplées de millions d'habitants voire de la dizaine de millions.

Actuellement, la réglementation brésilienne conseille, pour atteindre le niveau réglementaire A dans les édifices commerciaux conditionnés, une toiture réfléchive (absorptivité¹ $\alpha \leq 0.5$) et isolée (fonction de la zone climatique Zone 1 et 2 : $U=0,50$ W/m K, Zone 3 à 8 : $U=1,00$ W/m K.). Cependant peu d'informations sont disponibles sur les raisons de ces seuils d'isolation ou de réflectivité, et la diversité de climat rend délicate l'étude des potentiels d'amélioration des bâtiments existant. De plus, les matériaux de constructions ont des propriétés très variables qui sont sujettes à des altérations. En effet, les phénomènes de vieillissement (« ageing effect ») ou d'altération (« weathering ») viennent dégrader les performances de réflectivité mise en place et ce majoritairement lors de la première année (Suehrcke, Peterson, et Selby 2008). Ainsi la problématique d'évaluer le potentiel d'amélioration des bâtiments au Brésil par l'intermédiaire des toitures réfléchives, fait intervenir plusieurs climats, deux critères de performances respectivement à l'échelle de la ville et du bâtiment et enfin la solution elle-même doit pouvoir être évaluée en fonction des incertitudes liées aux paramètres d'entrée et des contraintes matériels sur place.

Cet article propose une méthodologie pour permettre une visualisation du potentiel d'amélioration et des choix de solutions pour une toiture légère typique d'un bâtiment commercial au Brésil. Pour cela on évalue l'impact de la réflectivité solaire sur l'ensemble des configurations d'isolation et d'émissivité thermique pour deux grandes villes du Brésil que sont Curitiba et Recife représentatives des bornes des zones climatiques respectivement 1 et 8, avec la zone 8 étant la plus chaude et la zone 1 la moins chaude. Des surfaces de réponse sont générées par métamodèle afin de visualiser l'ensemble du comportement de la toiture et les interactions entre variables.

2 METHODOLOGIE

En termes d'opération sur le toit, trois caractéristiques thermo physiques peuvent être facilement modifiées et ont été identifiées dans la littérature comme les plus influentes : l'absorptivité solaire, l'émissivité thermique et l'épaisseur d'isolant. Ces entrées sont modifiées sur l'ensemble de leur plage de variation pour analyser le comportement pour toutes les combinaisons possibles. Les parties suivantes présentes le cas d'étude et les techniques employées

2.1 MODELE THERMIQUE

Le modèle pour l'étude est un cas simple de type « toiture seule » pour permettre d'obtenir des conclusions générales indépendamment des configurations du bâtiment commercial et notamment de son usage. Dans le cas des bâtiments commerciaux la surface de toiture est généralement de grande dimensions et un système de climatisation efficace maintient la température d'air intérieure constante quel que soit les sollicitations. Par conséquent, la partie centrale de la toiture a peu d'interaction avec les nombreux autres phénomènes présents tels que la géométrie du bâtiment, l'inertie interne, l'occupation ou la ventilation. Seul intervient encore les températures des surfaces intérieures (sur lesquelles rayonne la face intérieure de la toiture) qui sont prises égales à la température d'air.

Ainsi, le modèle thermique est un cube de 4 m de côté constitué d'une toiture qui, sur sa face extérieure dépend du fichier météorologique, et sur sa face intérieure échange par convection avec l'air à 24°C (température de consigne) et par rayonnement avec les 5 autres surfaces maintenues à la

¹ A noter que la somme de la réflectivité et de l'absorptivité (α) solaires est égale à 1.

	Epaisseur	Densité apparente	Capacité calorifique	Conductivité thermique
	[m]	[kg/m ³]	[J/kg.°K]	[W/m.°K]
Bac acier	0.0015	7824	501.6	45.22
Isolation	Variable	42.40	1212	0.0288
Membrane	0.009525	1120	1463	0.1622

Tableau 1 : Propriétés des matériaux (ASHRAE handbook 2005 fundamental. §39.45, §25.65, §25.5)

	Plage de variation	Loi de distribution	Unité
Epaisseur d'isolant	0 – 0.1	Uniform	[m]
Absorptivité solaire	0.2 – 0.9	Uniform	[-]
Absorptivité thermique	0.2 – 0.9	Uniform	[-]

Tableau 2 : Définition des variations des entrées pour la construction des surfaces de réponse

température de l'air. Une composition classique de toiture légère est étudiée, elle est composée (de l'intérieur vers l'extérieur) d'un bac acier, d'une isolation et d'une membrane. Le Tableau 1 regroupe les propriétés des matériaux, issues de l'ASHRAE handbook 2005 fundamental. Les variables de l'étude et leurs propriétés sont spécifiées au Tableau 2.

La simulation thermique du modèle est obtenue avec EnergyPlus V8.2. Deux sorties associées à la toiture sont observées, représentatives de deux échelles de phénomènes : Effets sur le bâtiment via le flux par conduction en face intérieure, *i.e.* le flux sortant de la toiture vers l'ambiance intérieure, afin d'évaluer la part d'énergie arrivant dans l'ambiance et qui impacte donc sur la consommation énergétique ; Effets sur l'environnement proche du bâtiment via la température en face extérieure, afin d'appréhender le flux par la convection et le rayonnement thermique de celle-ci.

2.2 CONSTRUCTION DES SURFACES DE REPONSE

2.2.1 Méthodologie du métamodèle

Les techniques avancées de construction de métamodèle sont utilisées dans cette étude. Un métamodèle permet de reproduire le comportement d'une sortie d'intérêt de la simulation thermique dynamique (une sortie scalaire) selon la variation de certaines valeurs d'entrée. La nécessité de réaliser un métamodèle s'explique par le nombre important de simulation devant être réalisé, si 15 niveaux sont choisis pour seulement trois entrées, il est nécessaire de réaliser 3375 simulations pour un seul climat. Construire un métamodèle demande moins de simulation et permet par la suite d'évaluer n'importe quelle combinaison possible (sur des plages de variation définie) avec un coût de calcul négligeable.

La technique du Chaos Polynomial est employée (Blatman et Sudret 2011). Le modèle est estimé par une suite de polynômes multivariés dont les coefficients sont évalués via l'algorithme adaptatif adapLAR (Blatman et Sudret 2010). A chaque terme de cette suite est associé un coefficient devant être déterminé par l'algorithme de résolution en fonction d'évaluations du modèle initial. Ces évaluations du modèle sont issues d'une étude de Monte-Carlo sur l'ensemble de l'espace des paramètres et sont assurées par l'outil de gestion des simulations EPLab (Rabouille 2014) développé sous MatLab. Une méthode quasi-aléatoire nommée Lp-tau (Shukhman 1994) est employée pour obtenir une convergence plus rapide des résultats. L'algorithme adaptatif adapLAR recherche alors les coefficients influents dans cette base et permet de rejeter ceux qui ne le sont pas. La solution produite correspond à un polynôme creux où seuls les polynômes associés à des coefficients influents sont présents. Cette méthode permet une recherche de solution avec moins de simulation qu'il n'y a d'inconnues. De plus la décomposition

polynomiale permet d'identifier les contributions de chaque entrée et par conséquent les indices de sensibilité tels que définis par les méthodes ANOVA. Au final l'erreur commise est évaluée sur les points qui ont servi à construire le métamodèle par un estimateur d'erreur appelé Q . Cet estimateur correspond à une évaluation « leave one out » et donne une estimation plus fiable que le R classique.

Le métamodèle ainsi construit est utilisé pour générer des surfaces de réponse afin d'analyser les interactions entre variables.

2.2.2 Procédure de simulation

Pour chaque climat, on réalise 600 combinaisons des trois variables selon des distributions uniformes pour être représentatif de l'équiprobabilité d'un choix de solution parmi l'ensemble des interventions possibles sur la toiture. Les résultats sont extraits, pour chaque climat, sur la série de 30 jours où la température extérieure est la plus chaude. Les données de température et de flux sont respectivement moyennées pour chaque heure afin de produire 24 valeurs représentant l'évolution horaire moyenne sur une journée. Afin d'étudier le comportement critique de la toiture, la valeur maximale de la moyenne horaire de chaque simulation est prise comme sortie d'intérêt.

Un métamodèle est créé pour chaque climat et sortie, il est composé de la base polynomiale construite avec des polynômes de Legendre (distribution uniforme des entrées) jusqu'à l'ordre total de 12 et avec toutes les interactions, ce qui porte le nombre de coefficient à rechercher à 455. Au final, l'analyse des erreurs en fonction du nombre de simulation montre de très bons résultats avec une erreur de Q inférieure à 10^{-5} pour tous les métamodèles.

3 RESULTATS : SENSIBILITE ET SURFACES DE REPONSE

3.1 ANALYSE DE SENSIBILITE

A partir des métamodèles on peut estimer dans un premier temps les indices de sensibilité des entrées pour chaque sortie. Pour rappel, ces indices varient de 0 à 100 % et permettent d'évaluer l'effet de chaque entrée sur l'ensemble de la plage de variation de sorties, voir (Goffart, Rabouille, et Mendes 2015) pour l'utilisation et la compréhension des analyses de sensibilité des modèles de simulation thermique dynamique du bâtiment. Le Tableau 3 présente les valeurs des indices de sensibilité et montre pour les deux climats une cohérence dans le comportement de la toiture. L'absorptivité solaire est le paramètre le plus influent pour la température extérieure et l'épaisseur d'isolant est le plus influent pour la conduction. Les meilleures performances seront donc atteintes avec l'étude conjointe des deux entrées. Par ailleurs, on note qu'avec 90 % en somme des indices pour la sortie conduction il y a la présence d'interaction entre variable.

3.2 SURFACES DE REPONSE

Ces métamodèles sont alors utilisés pour produire des surfaces de réponse pour chaque climat et chaque sortie, celles-ci sont regroupées en Figure 1 et 2. Ces surfaces de réponse représentent, via la coloration et les lignes de niveau, l'augmentation de la sortie concernée en fonction des deux variables les plus influentes, qui sont l'épaisseur d'isolation et l'absorptivité solaire. La troisième entrée, l'émissivité thermique, est l'entrée la moins influente et est également la moins libre de choix. Son impact est représenté via trois surfaces de réponse qui correspondent aux trois valeurs les plus observées en thermique du bâtiment (0,3 0,6 et 0,9).

	Maximum moyenne horaire Température Face Externe [°C]		Maximum moyenne horaire Conduction Face Interne [W/m ²]	
	Curitiba	Recife	Curitiba	Recife
Isolation	1%	2%	73%	79%
Emissivité thermique	9%	8%	1%	1%
Absorptivité Solaire	89%	90%	14%	10%
Total	99%	99%	88%	91%

Tableau 3 : Indices de sensibilité des deux climats pour les trois entrées étudiées sur les deux sorties

Les surfaces de réponse sur la température extérieure en Figure 1 présentent des courbes de niveau parallèles, ce qui montre que les effets de chacune des deux entrées sont indépendants. Les interactions sont très faibles ce qui est en cohérence avec les résultats d'analyse de sensibilité du Tableau 3 avec une somme des indices proche de 100%. On remarque également que l'épaisseur d'isolation ne joue un rôle que jusqu'à des valeurs de 1,5–2 cm et produit une augmentation de la température extérieure. Au-delà de cette valeur d'épaisseur, l'effet de l'absorptivité solaire reste la même quel que soit l'épaisseur, l'isolation n'a plus d'effet (ce qui justifie le faible indice de sensibilité). Les surfaces de réponse sur le flux entrant en Figure 2 présentent quant à elles un comportement plus complexe. L'absorptivité solaire qui a pourtant un indice de sensibilité plutôt faible (10–14 %) joue un rôle significatif selon le graphique. En effet, on remarque que les lignes de niveau ne sont plus parallèles, elles s'écartent avec l'augmentation de l'isolation et le tableau des indices montre en effet des interactions avec une somme des indices de 90 %. On observe qu'en fonction de la valeur d'isolation que l'on sélectionne, l'effet de l'absorptivité solaire est plus ou moins important, l'absorptivité solaire est ainsi en interaction avec l'épaisseur d'isolation. Ces résultats sont physiques puisque plus l'isolation est importante moins les conditions limites de la surface extérieure impacte sur les transferts par conduction en face interne.

Les figures précédentes montrent également un effet de l'émissivité thermique. L'influence pour la température de surface, à laquelle est associé un indice de sensibilité de 8–9 %, est clairement visible sur la Figure 1. Pour la Figure 2 cet effet est visible mais reste faible, indice de sensibilité de 1–2 %.

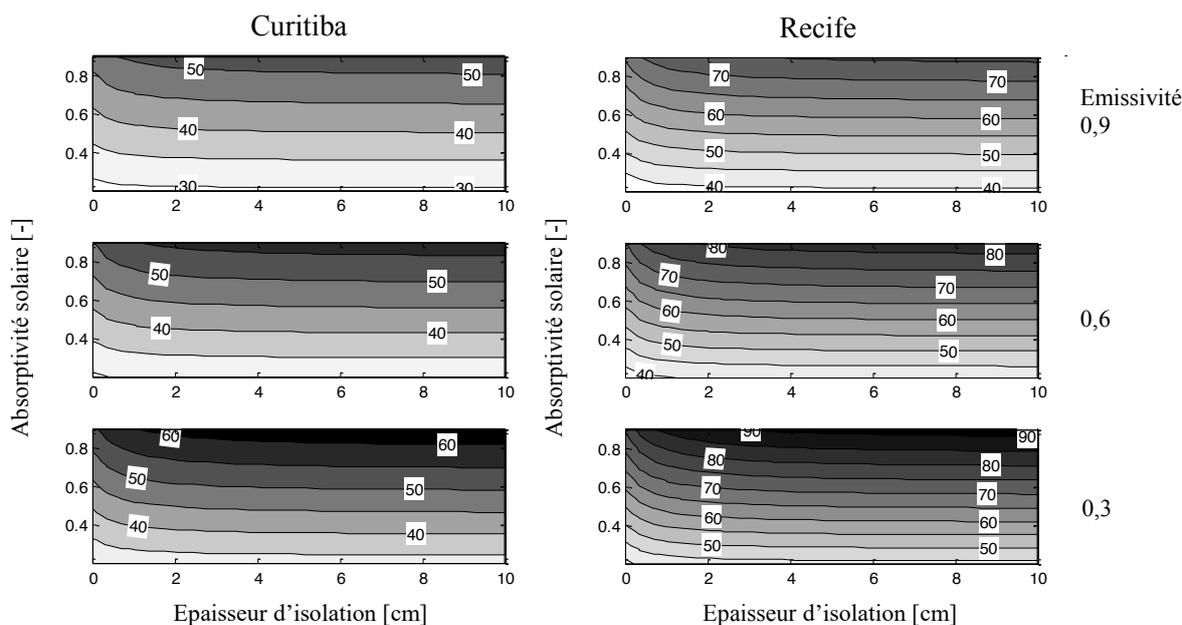


Figure 1 Evolution de la température maximale [°C] en face extérieure de toiture en fonction des trois variables épaisseur d'isolant (abscisse), absorptivité solaire (ordonnée), émissivité thermique (trois graphes) pour les climats de Curitiba (à gauche) et de Recife (à droite)

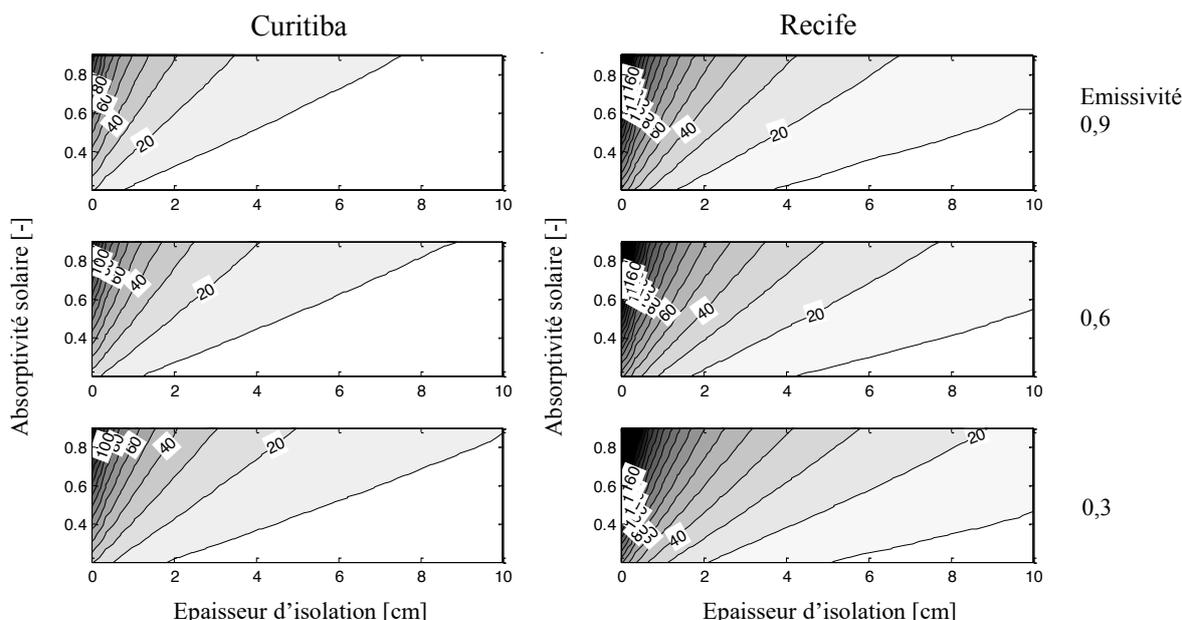


Figure 2 Evolution de la conduction maximale [W/m^2] en face interne de toiture en fonction des trois variables épaisseur d'isolant (abscisse), absorptivité solaire (ordonnée), émissivité thermique (trois graphes) pour les climats de Curitiba (à gauche) et de Recife (à droite)

Ainsi le choix de l'émissivité a un impact sur les températures de surface or ce paramètre contrairement à la réflectivité ne dépend pas de la couleur du revêtement mais de sa composition et de l'état de surface. Les propriétés sont variables selon les types de revêtements et il n'est pas observé dans la littérature de corrélation significative entre la réflectivité solaire et l'émissivité thermique (Suehrcke, Peterson, et Selby 2008).

Par ailleurs, on observe en Figure 1 qu'une isolation sans toiture réfléchive génère des températures de surface extérieures importantes pouvant atteindre $90^\circ C$ à Recife si l'émissivité thermique est faible. Ce cas est à proscrire aussi bien pour l'effet sur l'îlot de chaleur urbain, que pour les sollicitations et les écarts de température que subirait la toiture.

4 DISCUSSION DES RESULTATS

L'isolation est un élément important pour le transfert d'énergie en toiture et donc pour les consommations. Cependant il ne faut pas négliger la réflectivité d'une toiture qui peut, à moindre coût apporter une amélioration sur le flux et également contribuer à limiter l'îlot de chaleur urbain. Ainsi, on observe en Figure 1 qu'un toit non réfléchive génère à isolation constante une augmentation drastique de la température par rapport à un cas réfléchive. Cependant, les valeurs de réflectivité sont sujettes aux modifications que ce soit par l'« ageing effect » et/ou le « weathering ». De plus, l'interaction observée entre l'isolation et la réflectivité impacte sur les transferts par conduction de la toiture et par conséquent sur les performances énergétiques. Ainsi, on observe dans la Figure 2 qu'une toiture non isolée est très sensible au changement des propriétés réfléchives du toit.

Or, les *CoolRoofs* sont particulièrement sujets à la dégradation de leur propriété ce qui implique des pertes de 10 à 30 % d'albédo intervenant majoritairement la première année. D'après la littérature (Suehrcke, Peterson, et Selby 2008) un *CoolRoof* de 0,35 d'absorptivité solaire peut ainsi subir un gain typique de 0,113, en supposant une absorptivité de 0,8 pour la poussière. Cela peut avoir rapidement un impact significatif sur les besoins de refroidissement et la température de surfaces extérieure.

Pour un cas non isolé on estime cette augmentation pour Curitiba et Recife, respectivement de 3,2 °C et 5,0 °C pour la température de surface extérieure et de 15 W/m² contre 26 W/m² pour le flux entrant en face interne. On peut ainsi estimer que sur un bâtiment commercial climatisé de 300 m², une toiture réfléchive mais non isolée amènerait après la première année à une sous-estimation des besoins énergétiques de près de 7,8 kW pour la ville de Recife en moyenne au moment le plus critique de la journée.

Dans le cas où la toiture réfléchive s'accompagne d'une isolation, on remarque, en plus d'une réduction évidente des transferts, une réduction de l'impact de l'incertitude de dégradation de réflectivité sur les performances. Pour une épaisseur d'isolant de 3 cm (U inférieur à 1 W/m K), les écarts de performance dus à la perte de réflectivité sont alors de 3,8 °C et de 6,1 °C pour la température extérieure de toiture ; et de 3,0 W/m² et de 4,7 W/m² pour la conduction en face interne. L'écart sur la température de surface est légèrement en hausse mais on observe une réduction très importante de l'incertitude présente sur le flux. On peut ainsi estimer en moyenne que le même bâtiment commercial climatisé de 300 m² subira une sous-estimation moindre, de 1,4 kW pour Recife.

Cette recherche de l'amélioration des toitures sous incertitude peut être faite grâce aux métamodèles et leurs surfaces de réponse. Les surfaces de réponse permettent d'évaluer rapidement l'écart de performance dus à la dégradation des propriétés réfléchives du toit. De plus, elles permettent une discussion sur les choix constructifs des toitures vis-à-vis des incertitudes ou des modifications de performances des produits.

5 CONCLUSION

Comme cela a été montré dans plusieurs études, isolation et réflectivité sont deux paramètres importants. Cet article a permis de présenter le comportement de ces variables sur toute leur plage de variation pour les bornes des zones climatiques, *i.e.* 1 et 8, respectivement, Curitiba et Recife.

Cette étude a été menée pour une configuration typique de toiture légère et permet une évaluation générique du fonctionnement sur le mois le plus chaud. Elle peut donc être adaptée voire étendue dans l'étude d'un large spectre de bâtiments commerciaux dans le cas d'ambiance climatisée au Brésil. L'objectif est de fournir une meilleure compréhension du comportement de la toiture face au choix des propriétés des matériaux et l'impact de leur évolution dans le temps tels que le « ageing » ou « weathering effect ».

Nous avons montré qu'une toiture réfléchive permet de réduire la température de surface et également le flux intérieur, cependant la dégradation des propriétés dues au « weathering » et/ou « ageing » amènent une modification significative des performances qui peut mener à une augmentation du besoin maximal moyen à Recife de 7,8 kW pour 300 m² de toiture. L'ajout d'une isolation sur une toiture réfléchive permet de réduire les besoins et limite l'impact de la dégradation à 1,4 kW.

Nous avons appliqué la méthodologie à un climat chaud mais celle-ci peut être étendue au climat tempéré en ajoutant une évaluation des performances sur la période froide. En effet, dans le cas des climats nécessitant à la fois des périodes de chauffage et de refroidissement, une évaluation de l'impact des valeurs d'entrées doit être faite pour les deux configurations afin de compléter l'approche multicritère.

Par ailleurs, l'étude a été menée sur deux critères à l'échelle du bâtiment et les résultats prônent la mise en place de toiture réfléchive et émissive. Cependant, l'énergie renvoyée dans l'atmosphère peut induire des effets qui ne se visualisent qu'à une plus grande échelle, (Yang, Wang, et Kaloush 2015) montrent une modification de la pluviométrie à l'échelle de la ville voire régionale. Ainsi, il peut être nécessaire d'ajouter aux surfaces de réponse un troisième critère évaluant l'impact à plus large échelle de la mise en place de toiture réfléchive sur les mégapoles brésiliennes.

6 REFERENCES

- Blatman, Géraud, et Bruno Sudret. 2010. « An adaptive algorithm to build up sparse polynomial chaos expansions for stochastic finite element analysis. » *Probabilistic Engineering Mechanics* 25 (2). Elsevier Ltd: 183-97. doi:10.1016/j.probenmech.2009.10.003.
- . 2011. « Adaptive sparse polynomial chaos expansion based on Least Angle Regression. » *Journal of Computational Physics* 230 (6): 2345-67. doi:10.1016/j.jcp.2010.12.021.
- Brito Filho, J.P., et T.V. Oliveira Santos. 2014. « Thermal analysis of roofs with thermal insulation layer and reflective coatings in subtropical and equatorial climate regions in Brazil. » *Energy and Buildings* 84 (décembre). Elsevier B.V.: 466-74. doi:10.1016/j.enbuild.2014.08.042.
- 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*, décembre, 1-21. doi:10.1080/19401493.2015.1112430.
- Hernández-Pérez, I., G. Álvarez, J. Xamán, I. Zavala-Guillén, J. Arce, et E. Simá. 2014. « Thermal performance of reflective materials applied to exterior building components - A review. » *Energy and Buildings* 80. Elsevier B.V.: 81-105. doi:10.1016/j.enbuild.2014.05.008.
- Magli, S, C Lodi, FM Contini, A Muscio, et P Tartarini. 2015. « Dynamic analysis of the heat released by tertiary buildings and the effects of urban heat island mitigation strategies. » *Energy & Buildings*. Elsevier B.V. doi:10.1016/j.enbuild.2015.05.037.
- Parker, Danny S., et Stephen F. Barkaszi. 1997. « Roof solar reflectance and cooling energy use: field research results from Florida. » *Energy and Buildings* 25: 105 - 15. doi:10.1016/S0378-7788(96)01000-6.
- Rabouille, Mickael. 2014. « Recherche de la performance en simulation thermique dynamique : Application à la réhabilitation des bâtiments. » Thèse de l'Université de Grenoble.
- Shukhman, B. 1994. « Generation of quasi-random (LP τ) vectors for parallel computation. » *Computer Physics Communications* 78 (3): 279-86. doi:10.1016/0010-4655(94)90006-X.
- Suehrcke, Harry, Eric L. Peterson, et Neville Selby. 2008. « Effect of roof solar reflectance on the building heat gain in a hot climate. » *Energy and Buildings* 40 (12): 2224 - 35. doi:10.1016/j.enbuild.2008.06.015.
- Yang, Jiachuan, Zhi-Hua Wang, et Kamil E. Kaloush. 2015. « Environmental impacts of reflective materials: Is high albedo a 'silver bullet' for mitigating urban heat island? » *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 47 (juillet). Elsevier: 830-43. doi:10.1016/j.rser.2015.03.092.
- Zingre, Kishor T., Man Pun Wan, Shanshan Tong, Hua Li, Victor W.-C. C Chang, Swee Khian Wong, Winston Boo Thian Toh, et Irene Yen Leng Lee. 2015. « Modeling of cool roof heat transfer in tropical climate. » *Renewable Energy* 75 : 210-23. doi:10.1016/j.renene.2014.09.045.

Identification de paramètres incertains influents en analyse de cycle de vie des bâtiments

Marie-Lise Pannier*¹, Patrick Schalbart¹, Bruno Peuportier¹

¹ MINES ParisTech PSL – CES (Centre d'Efficacité Énergétique des Systèmes)
60 Bd Saint Michel 75272 Paris Cedex 06 - France,
[*marie-lise.pannier@mines-paristech.fr](mailto:marie-lise.pannier@mines-paristech.fr)

RESUME. Les outils d'analyse de cycle de vie (ACV) des bâtiments sont utilisés pour orienter la conception vers des ensembles bâtis plus durables. Ils doivent donc être des outils d'aide à la décision robustes. Or, les praticiens d'ACV sont confrontés à de nombreux choix (méthodes, scénarios, paramètres...) induisant des incertitudes dans les sorties du modèle et potentiellement une remise en question des résultats. Dans ce cadre, l'influence des paramètres incertains doit être mieux connue. Trois types d'analyses de sensibilité (le criblage de Morris et les analyses de sensibilité locale et globale), offrant différents compromis coût calculatoire - précision, ont permis d'identifier les paramètres les plus influents pour une maison individuelle performante. Ces travaux, menés avec l'outil d'ACV novaEQUER ont souligné l'influence de la durée de vie du bâtiment, du mix de production d'électricité et des contributeurs majeurs de l'efficacité énergétique de l'enveloppe. Une meilleure compréhension de l'effet des paramètres influents contribue à réduire l'incertitude et à fiabiliser les résultats d'ACV des bâtiments.

MOTS-CLÉS : Bâtiment, Analyse de cycle de vie, Analyses de sensibilité.

ABSTRACT. Building life cycle assessment (LCA) tools help designing more sustainable built environments and have therefore to be robust. However, LCA practitioners are facing a lot of choices (methods, scenarios, parameters values) inducing uncertainty in the results or model output and potentially changing the ranking of different project alternatives. It is necessary to better understand the influence of uncertain parameters. Three sensitivity analysis types (the Morris screening and the local and global sensitivity analysis), offering different computation time – precision compromise, were conducted in order to identify the most influential parameters in the case of an energy efficient single family house. In this work, performed with the building LCA tool novaEQUER, the building life span, the electricity mix and parameters affecting the envelope energy performance were identified as influential parameters. Better understanding them will help in reducing the uncertainty and making building LCA results more robust.

KEYWORDS: Building, Life Cycle Assessment, Sensitivity analysis.

1. INTRODUCTION

De part son approche multicritère et multi-étapes, la méthode normalisée (NF EN ISO 14040 2006) d'analyse de cycle de vie (ACV) est couramment employée pour évaluer et comparer les impacts sur l'environnement de systèmes rendant les mêmes services. Adapter l'ACV au secteur bâtiment, levier pour résoudre les défis énergétiques et environnementaux, permet d'orienter la conception ou la rénovation vers les variantes constructives les plus durables. Les outils d'éco-conception des ensembles bâtis doivent toutefois être suffisamment fiables pour guider les choix des décideurs vers les alternatives les plus performantes sur le cycle de vie complet du bâtiment incluant sa fabrication, son utilisation, sa démolition et ses éventuelles phases de rénovation. Cependant, lors des études

d'ACV, de nombreux choix peuvent altérer la robustesse des résultats. En effet, des hypothèses et scénarios doivent être définis sur le bâtiment et son usage ; la durée de vie d'un bâtiment est longue et les données relatives à l'évolution du contexte du bâtiment ou à sa fin de vie ne sont pas encore connues. De plus, les données environnementales relatives aux matériaux ou aux procédés utilisés dans le secteur du bâtiment peuvent ne pas être assez représentatives. Ces incertitudes sur les paramètres d'entrée sont susceptibles de remettre en question les choix. Afin de rendre les outils d'ACV des bâtiments plus robustes, il est nécessaire de mieux connaître les effets des paramètres incertains. Pour cela, des analyses de sensibilité ont été menées. Elles permettent de caractériser l'influence des paramètres d'entrée sur l'incertitude des indicateurs environnementaux calculés en sortie de l'outil d'ACV des bâtiments novaEQUER. Cette démarche a été appliquée sur le cas d'une maison individuelle performante.

2. METHODOLOGIE

2.1. MODELE D'ANALYSE DE CYCLE DE VIE

NovaEQUER (Polster 1995 ; Popovici 2005) est un outil d'ACV des bâtiments et des quartiers permettant d'évaluer les impacts d'un projet au travers de douze indicateurs environnementaux à chaque étape de la vie du bâti : construction, utilisation, rénovation et démolition. Du fait de la longue durée de vie des bâtiments, les impacts liés à l'utilisation sont prépondérants (Cabeza et al. 2014), ce qui nécessite d'évaluer cette phase avec précision. Pour ce faire, novaEQUER est couplé au modèle thermique dynamique de bâtiment COMFIE (Peuportier et Blanc-Sommereux 1990) et dans lequel le bâtiment est divisé en zones thermiques à température homogène avant d'être maillé. Un bilan thermique est ensuite effectué sur chaque maille pour aboutir aux températures et besoins de chauffage et climatisation par zone. COMFIE transmet à novaEQUER la géométrie et les besoins du bâti. La description de la phase d'utilisation est complétée par des informations sur les consommations d'eau, la production de déchets ou encore le transport des occupants. Pour les autres phases, des données environnementales issues de la base de données ecoinvent (Frischknecht et al. 2007) sont associées aux matériaux de construction du projet pour définir leurs modes de production et d'élimination. Enfin, les durées de vie des matériaux non structurels sont renseignées pour modéliser les rénovations.

2.2. PLATEFORME DE SIMULATION

Le traitement des incertitudes requiert généralement la réalisation d'un grand nombre d'évaluations du modèle. De plus, des traitements statistiques sont nécessaires pour analyser les effets des incertitudes. Une plateforme de simulation a donc été utilisée pour étudier l'influence des paramètres incertains. Elle est constituée des outils COMFIE et novaEQUER ainsi que de l'outil statistique R chargé de créer des plans d'expériences adaptés aux études, gérer les simulations et traiter les sorties.

2.3. CAS D'ETUDE

Pour déterminer quels paramètres ont le plus d'influence sur les sorties de l'outil novaEquer, la maison en béton banché (I-BB) de la plateforme INCAS au Bourget-du-Lac a été utilisée comme cas d'étude. Munaretto (2014) propose une description précise du bâtiment dans sa thèse. Des hypothèses spécifiques concernant l'habitation ont été prises pour cette étude. La maison est occupée et les scénarios liés à l'occupation correspondent à des scénarios usuels pour une habitation ayant quatre

pièces principales (Vorger 2014). Le chauffage est à l'électricité. Le transport des occupants et la production de déchets en phase d'utilisation ont été exclus de l'étude. De plus, tous les matériaux sont considérés comme des déchets inertes en fin de vie à l'exception du bois qui est incinéré.

Vingt-deux paramètres incertains ont été étudiés dans ce travail, ils sont présentés avec leurs plages de variation dans le tableau 1. Il s'agit essentiellement de paramètres incertains liés à des hypothèses sur le bâtiment ou son contexte, mais des incertitudes sur la méthodologie, l'inventaire de cycle de vie ou les méthodes de calcul des impacts environnementaux sont aussi représentées.

	Paramètres incertains	Distribution de probabilité	Unité	
Hypothèses sur le bâtiment et son contexte	Climat et site	Température extérieure	$N_r (\mu=0 ; \sigma=0.25)$	°C
	Climat et site	Rayonnement global horizontal	$N_r (\mu=0 ; \sigma=5)$	%
	Climat et site	Albédo	$U_r (\text{min}=-15 ; \text{max}= 15)$	%
	Scénario	Consigne de température	$N_r (\mu=0 ; \sigma=0.25)$	°C
	Scénario	Scénarios d'occupation	$N_r (\mu=0 ; \sigma=5)$	%
	Scénario	Scénarios d'apports internes	$N_r (\mu=0 ; \sigma=5)$	%
	Scénario	Scénarios de ventilation	$N_r (\mu=0 ; \sigma=5)$	%
	Enveloppe	Résistance thermique des fenêtres U	$N_r (\mu=0 ; \sigma=2.5)$	%
	Enveloppe	Facteur solaire des fenêtres Sw	$N_r (\mu=0 ; \sigma=2.5)$	%
	Enveloppe	Epaisseur d'isolant	$N (\mu=20 ; \sigma=0.25)$	cm
	Enveloppe	Epaisseur de béton	$N (\mu=15 ; \sigma=0.25)$	cm
	Enveloppe	Ponts thermiques	$N_r (\mu=15 ; \sigma=25)$	%
	Enveloppe	Surplus de matériaux (chantier)	$N (\mu=5 ; \sigma=3)$	%
	Durée de vie	Durée de vie du bâtiment	$N (\mu=80 ; \sigma=20)$	ans
	Durée de vie	Durée de vie des fenêtres	$N (\mu=35 ; \sigma=12)$	ans
	Durée de vie	Durée de vie des revêtements	$N (\mu=22 ; \sigma=7)$	ans
	Climat et site	Distance de transport usines-site	$N (\mu=75 ; \sigma=30)$	km
	Climat et site	Distance de transport site-décharge	$N (\mu=25 ; \sigma=10)$	km
	Contexte	Efficacité du réseau d'eau	$N (\mu=74 ; \sigma=13)$	%
	Méthodologie	Mix de production d'électricité	C [annuel ; horaire]	-
Données d'inventaire	Type de béton	C [normal ; précontraint]	-	
Méthode d'évaluation des impacts	Horizon temporel GIEC	C [20 ans ; 500 ans]	-	

Tableau 1 : Paramètres incertains et distributions de probabilité considérés. N =loi normale, U =loi uniforme et C = variable catégorielle, r : variation relative autour de la valeur de référence.

Pour les paramètres concernant des hypothèses sur le bâtiment, des plages de variation faibles ont été choisies car les caractéristiques de la maison I-BB sont bien connues et documentées. Une forte incertitude a toutefois été considérée pour les ponts thermiques car les données trouvées dans la littérature peuvent varier de manière significative pour un même pont.

Pour les variables catégorielles (discrètes et non ordonnées), il ne s'agit pas de définir une plage de variation autour d'une valeur de référence mais de choisir entre plusieurs scénarios possibles. Pour représenter différentes approches méthodologiques, deux mix de production d'électricité implémentés dans novaEquer ont été utilisés: un mix fixe sur l'année et un autre variant au pas de temps horaire et par usage. Les incertitudes sur les données d'inventaire ont été investiguées sur le cas du béton : des données environnementales pour un béton normal et un précontraint sont tirées à tour de rôle. Enfin, l'effet du choix de la méthode d'évaluation des impacts a été étudié en choisissant différents horizons temporels pour le potentiel de réchauffement global ; l'effet de serre dépendant de la vitesse de dégradation des gaz, l'horizon temporel retenu fait varier les résultats.

2.4. METHODES D'ETUDE DE L'INFLUENCE DES PARAMETRES INCERTAINS

Les méthodes d'analyse de sensibilité (AS), au sens de Saltelli et al. (2000), sont utilisées pour déterminer quels paramètres d'entrée contribuent le plus à l'incertitude en sortie. En ACV, ces méthodes sont souvent désignées par les termes d'analyse du problème-clé ou d'analyse de contribution (Heijungs et Kleijn 2001). Elles regroupent les analyses de perturbations (sensibilité du modèle aux paramètres d'entrée) et d'incertitudes pour obtenir l'influence des paramètres incertains.

2.4.1. L'analyse de sensibilité locale

En analyse de sensibilité locale (ASL), l'objectif est d'étudier l'effet de petites variations Δ autour des valeurs de référence des paramètres, en se basant sur le calcul de dérivées partielles. Cela peut être problématique pour les modèles non-linéaires tels que ceux utilisés en thermique. Pour de faibles plages de variation des paramètres d'entrée du modèle thermique, reflétant une bonne connaissance du bâtiment étudié, il est cependant possible de faire l'approximation de linéarité.

À tour de rôle, pour chaque facteur incertain (plan OAT pour *One-factor-At-a-Time*), l'effet du facteur considéré est investigué alors que tous les autres facteurs restent à leurs valeurs de référence. Des indices de sensibilité sont calculés pour chaque facteur $i \in [1; d]$. Dans le cadre de cette étude, il a été choisi de les calculer comme indiqué dans l'équation (1), en considérant l'écart entre les sorties du modèle aux bornes de l'intervalle $[\mu_i - 2\sigma_i; \mu_i + 2\sigma_i]$.

$$S_i = f(\mu_1, \dots, \mu_i + 2\sigma_i, \dots, \mu_d) - f(\mu_1, \dots, \mu_i - 2\sigma_i, \dots, \mu_d) \quad (1)$$

Le nombre de simulation à réaliser pour cette méthode correspond à deux fois le nombre de paramètres incertains considérés, soit 44 simulations pour ce cas d'étude.

2.4.2. Le criblage de Morris

Les méthodes de criblage permettent une exploration rapide de l'ensemble du domaine de variation des paramètres incertains pour évaluer de manière qualitative leur influence. L'avantage du criblage de Morris (1991) est qu'il est applicable quel que soit la complexité et la régularité du modèle.

Les plages de variation des facteurs incertains sont discrétisés en niveaux. L'hyper-espace exploré correspond alors à une grille de nœuds de dimension d (nombre de paramètres étudiés). La plage de variation retenue pour les paramètres continus est $[\mu - 2\sigma; \mu + 2\sigma]$ et 6 niveaux ont été considérés. Pour les variables catégorielles, deux niveaux, correspondant aux deux choix ont été pris en compte. Un plan d'expérience OAT est ensuite répété r fois, en partant à chaque répétition d'un point de départ différent tiré aléatoirement. Des effets élémentaires, mesurant l'accroissement du modèle, sont estimés à chaque répétition et pour chaque paramètre, comme présenté dans Munaretto (2014). La moyenne des valeurs absolues des effets élémentaires μ_i^* donne des informations sur l'influence du paramètre i : plus celle-ci est élevée, plus le paramètre i est influent. L'écart-type des effets-élémentaires σ_i permet de détecter la présence de non-linéarité ou d'interaction entre les paramètres.

Un nombre de simulation équivalent à $r \cdot (d + 1)$ est nécessaire, 1150 simulations pour 50 répétitions ont donc été réalisées.

2.4.3. L'analyse de sensibilité globale

Une analyse de sensibilité globale (ASG) a été réalisée pour quantifier plus précisément l'influence des différentes entrées incertaines sur l'incertitude en sortie. Cette méthode se base sur la

décomposition de la variance fonctionnelle. Les indices de Sobol (1993) totaux (TSI_i) ont été calculés pour chaque paramètre i , comme indiqué dans l'équation (2), avec Y la sortie du modèle pour la combinaison de valeur d'entrée $X = (X_1, \dots, X_d)$ et $Var(Y)$ et $E(Y)$ sa variance et son espérance. L'indice TSI_i évalue l'effet du paramètre i ainsi que ses interactions avec les autres entrées.

$$TSI_i = \frac{E(Var[Y|X_{\sim i}])}{Var(Y)} \quad (2)$$

Contrairement, aux méthodes présentées précédemment, pour lesquelles un nombre fini de points est exploré sur les domaines de variation des paramètres, une distribution de probabilité est considérée en ASG. Un échantillonnage par hypercube latin a été utilisé pour tirer les jeux de valeurs à simuler dans les distributions de chaque facteur incertain.

L'ASG permet une hiérarchisation plus précise de l'influence des entrées grâce à l'estimation de la part de la variance en sortie expliquée par chaque facteur incertain. Mais ce gain en précision fait augmenter le coût calculatoire. $Ntirage * (d + 2)$ évaluations du modèle sont requises, avec $Ntirage = 1000$ dans notre cas pour assurer la convergence. Au total, 24000 simulations du modèle sont nécessaires. Les simulations de l'ASG sont toutefois réutilisables dans le cadre d'une analyse d'incertitude pour étudier la distribution des sorties.

3. RESULTATS ET DISCUSSION

L'influence relative des paramètres est représentée dans la suite pour chacune des méthodes d'analyse de sensibilité et pour les douze indicateurs environnementaux calculés dans novaEquer

Les indices de sensibilité ont été calculés pour l'ASL pour chaque facteur. Puis, ils ont été divisés pour chaque indicateur par la somme des indices. L'influence des paramètres ainsi obtenue est présentée à la figure 1, relativement à la somme des indices. Cette analyse a été réalisée en 4 min sur un ordinateur de bureau performant disposant de 6 cœurs.

Pour le criblage de Morris, la distance euclidienne entre l'origine et le point $(\mu_i^* ; \sigma_i)$ a été calculée pour chaque paramètre et pour tous les indicateurs environnementaux. Cette distance donne des informations sur l'effet d'un paramètre et de ses éventuelles non-linéarités ou interactions. Les résultats du criblage de Morris sont présentés à la figure 2, relativement à la somme des distances. Il a fallu 2h30 à un ordinateur de bureau performant pour réaliser tous les calculs.

Pour l'ASG, les résultats sont représentés à la figure 3. Le graphique a été construit de la même manière que celui de l'ASL à partir des indices de Sobol totaux, prenant en compte l'effet des paramètres et de leurs interactions avec d'autres paramètres. 18h ont été nécessaires pour ce calcul.

Les résultats donnés par l'ASL et le criblage de Morris sont proches. Dans les deux méthodes, la durée de vie du bâtiment apparaît comme un facteur très influent pour presque tous les indicateurs. Le choix d'un mix électrique annuel ou horaire induit également de fortes différences sur les sorties. Dans le criblage de Morris, l'influence de ce facteur est plus importante car les effets d'interactions avec les autres paramètres sont capturés. Les facteurs influençant fortement les performances énergétiques tels que les ponts thermiques, la température de consigne et la température extérieure se révèlent être également influents pour la performance environnementale. Cela est lié à l'importance de la phase d'utilisation en ACV des bâtiments. Le choix de la méthode d'évaluation des impacts environnementaux influence fortement les résultats, par exemple pour l'indicateur d'effet de serre.

Enfin, certains paramètres ont de l'influence particulièrement sur un indicateur, c'est le cas du rendement du réseau d'eau pour la consommation d'eau.

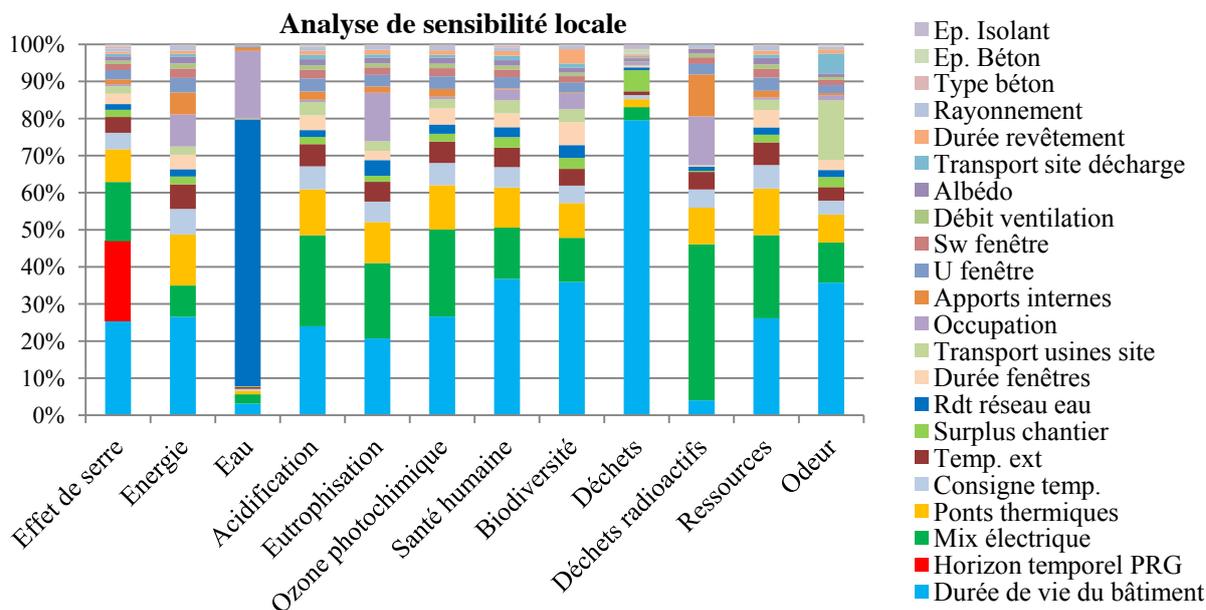


Figure 1 : Influence relative des paramètres incertains en analyse de sensibilité locale.

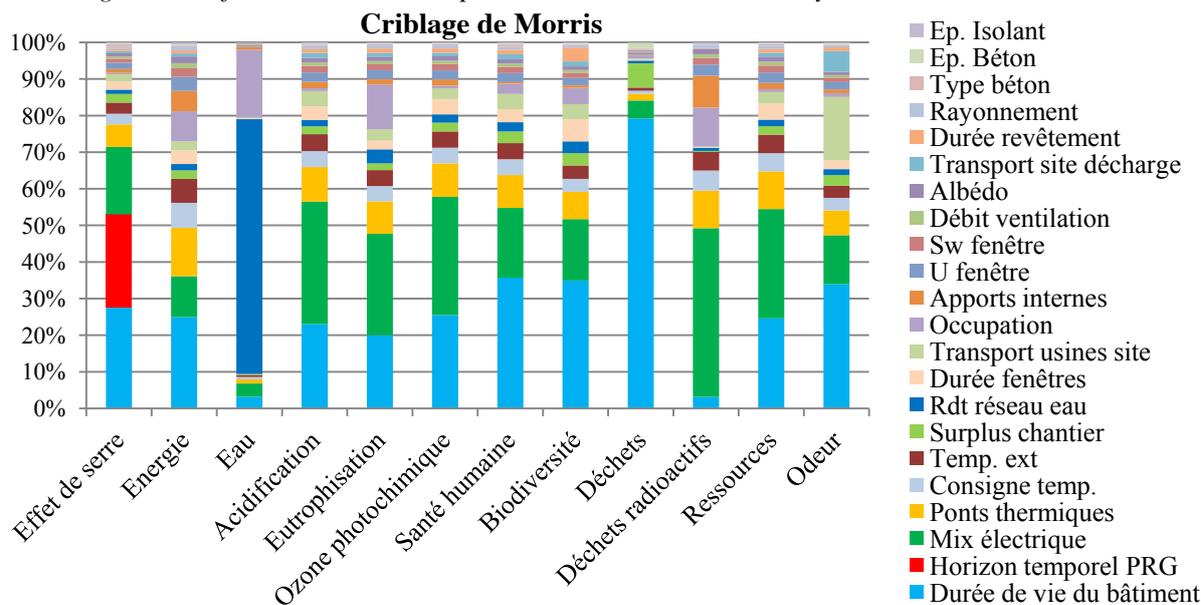


Figure 2 : Influence relative des paramètres incertains avec le criblage de Morris.

En ASG, la variabilité du modèle est majoritairement expliquée par le mix de production d'électricité pour la plupart des indicateurs. Pour l'effet de serre, la consommation d'eau et la production de déchets, la plus grande part de la variance est liée respectivement au choix de la méthode d'évaluation des impacts, au rendement du réseau d'eau et à la durée de vie du bâtiment, les indicateurs étant exprimés par annuité. Ces différences dans l'influence accordée à chaque paramètre pour les trois méthodes peuvent induire des remises en question du classement des facteurs incertains.

Les écarts constatés entre les trois analyses de sensibilité peuvent s'expliquer par la nature des méthodes employées. L'ASL, d'une part, ne permet pas de capturer les interactions ou les non-linéarités. D'autre part, la discrétisation de l'espace en une grille régulière dans le criblage de Morris

conduit à ne privilégier aucune zone des domaines de variation. Cela revient à faire implicitement l'hypothèse d'une distribution de probabilité uniforme pour tous les paramètres alors que des lois normales ont été choisies pour la plupart d'entre eux en ASG. Les non-linéarités ou interactions aux bords de l'intervalle sont donc mieux pris en compte dans le criblage de Morris. Enfin, les trois méthodes n'évaluent pas l'influence de la même manière. L'ASG calcule la contribution de la variance d'un paramètre à la variance totale tandis que l'ASL et le criblage de Morris estiment les effets des paramètres sur les incertitudes en sorties.

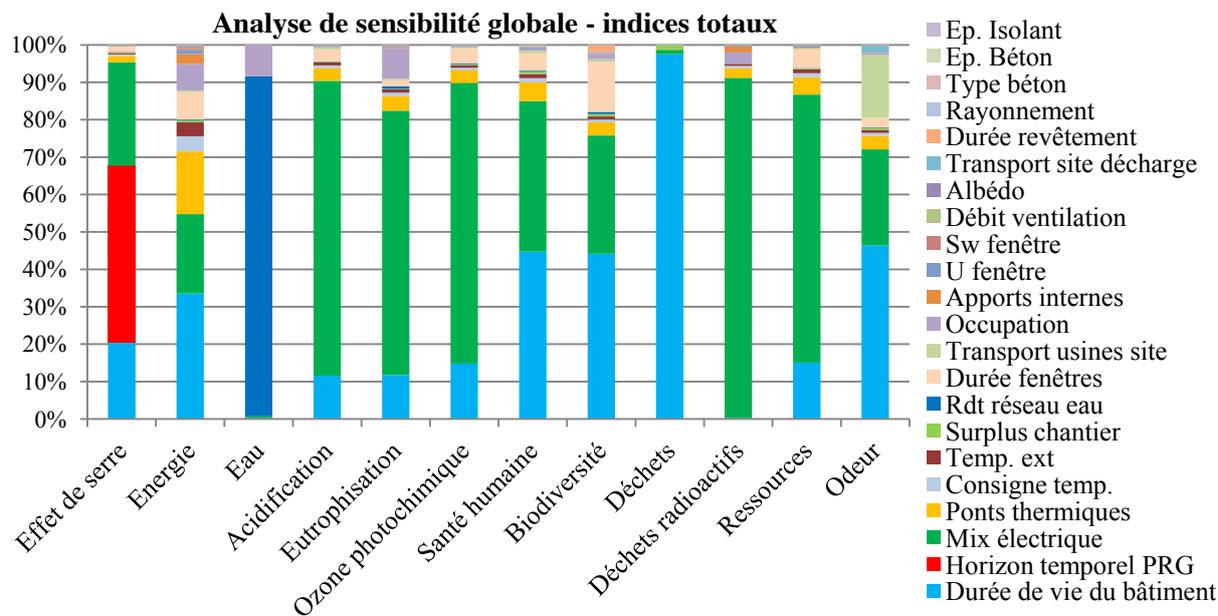


Figure 3 : Influence relative des paramètres incertains en analyse de sensibilité globale.

Bien que l'ASL et le criblage de Morris classent les paramètres différemment, ces deux analyses de sensibilité permettent de mettre en avant les paramètres fortement influents. En effet, les facteurs identifiés par l'ASG (mix de production d'électricité, durée de vie du bâtiment, choix de l'indicateur pour l'effet de serre et rendement du réseau d'eau) ont préalablement été identifiés par les deux autres méthodes. Ainsi, si l'objet d'une étude est de déterminer quels paramètres ont le plus d'influence sur les sorties, les méthodes d'ASL et le criblage de Morris, moins coûteuse en temps de calcul, peuvent suffire. En revanche, s'il est nécessaire de connaître plus précisément l'influence des facteurs incertains, une ASG doit être réalisée. Le temps de calcul de cette dernière méthode dépendant du nombre de paramètres incertains considérés. Le nombre de simulations étant multiplié par un facteur proche de $N_{tirage}/2$ (500, dans notre cas) par rapport à l'ASL, il est préférable d'effectuer un criblage de Morris ou une ASL en amont de l'ASG pour présélectionner les plus influents. L'analyse globale sera alors menée en excluant les facteurs peu influents pour un coût calculatoire réduit.

Pour un cas d'étude, bien documenté, comme celui-ci, de faibles variations sont considérées sur les paramètres d'entrée du modèle thermique et il est possible de faire une approximation de linéarité sur ceux-ci. Dans cette configuration, l'ASL permet en réalisant peu de simulations d'évaluer assez justement les effets des facteurs incertains. Pour des bâtiments moins bien connus, l'hypothèse de linéarité n'est plus valable. Il faut alors s'orienter vers des méthodes telles que le criblage de Morris pouvant capturer aussi l'effet des non-linéarités et des interactions sur les paramètres, mais $r/2$ (25, dans notre cas) fois plus coûteuse en nombre de simulation.

4. CONCLUSION

Trois méthodes d'analyse de sensibilité ont été mises en œuvre pour déterminer les paramètres les plus influents du modèle d'analyse de cycle de vie des bâtiments novaEQUER dans le cas d'une maison individuelle performante. La durée de vie du bâtiment, le type de mix de production d'électricité et des paramètres clés de la performance énergétique ont été identifiés comme particulièrement influents par toutes les méthodes. Même si la hiérarchie de ces entrées incertaines peut varier d'une analyse de sensibilité à l'autre, à cause de différences inhérentes aux méthodes, l'ASL et le criblage de Morris permettent d'identifier tous les facteurs ayant beaucoup d'influence, pour un coût calculatoire faible devant celui de l'ASG. Les caractéristiques du bâtiment étant bien connues dans ce travail, l'ASL offre ici le meilleur compromis coût calculatoire – précision. Cette étude sera poursuivie en considérant un plus grand nombre de facteurs incertains afin d'obtenir un classement de l'influence de tous les paramètres des outils d'analyse environnementale des bâtiments et des quartiers. Cela permettra de mieux comprendre les sources d'incertitudes et de progresser vers la fiabilisation des résultats d'ACV des ensembles bâtis.

Remerciements :

Ce travail a été supporté par la chaire VINCI-Paristech *Eco-conception des ensembles bâtis et des infrastructures*.

5. BIBLIOGRAPHIE

- Cabeza, Luisa F., Lúdia Rincón, Virginia Vilariño, Gabriel Pérez, et Albert Castell. 2014. « Life cycle assessment (LCA) and life cycle energy analysis (LCEA) of buildings and the building sector: A review ». *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 29 (janvier): 394-416. doi:10.1016/j.rser.2013.08.037.
- Frischknecht, Rolf, Niels Jungbluth, Hans-Jörg Althaus, Gabor Doka, Roberto Dones, Thomas Heck, Stefanie Hellweg, et al. 2007. « The Ecoinvent Database: Overview and Methodological Framework ». *International Journal of Life Cycle Assessment*, 77.
- Heijungs, Reinout, et René Kleijn. 2001. « Numerical Approaches towards Life Cycle Interpretation Five Examples ». *The International Journal of Life Cycle Assessment* 6 (3): 141-48. doi:10.1007/BF02978732.
- Morris, Max D. 1991. « Factorial sampling plans for preliminary computational experiments ». *Technometrics* 33 (avril): 161-74. doi:10.2307/1269043.
- Munaretto, Fabio. 2014. « Etude de l'influence de l'inertie thermique sur les performances énergétiques des bâtiments ». Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris.
- NF EN ISO 14040. 2006. Management environnemental - Analyse du cycle de vie - Principes de cadre, 2006.
- Peuportier, Bruno, et Isabelle Blanc-Sommereux. 1990. « Simulation tool with its expert interface for the thermal design of multizone buildings ». *International Journal of Solar Energy* 8 (2): 109-20. doi:10.1080/01425919008909714.
- Polster. 1995. « Contribution à l'étude de l'impact environnemental des bâtiments par analyse du cycle de vie ». Thèse de doctorat, Ecole des Mines de Paris.
- Popovici, Emil. 2005. « Contribution to the life cycle assessment of settlements ». Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris.
- Saltelli, Andrea, Karen Chan, et E. Marian Scott. 2000. *Sensitivity Analysis : Gauging the Worth of Scientific Models*. Vol. 134. Wiley.
- Sobol, I. 1993. « Sensitivity estimates for nonlinear mathematical models ». *Sensitivity analysis for nonlinear mathematical models. Mathematical Modelling and Computational Experiment*, 407-14.
- Vorger, Eric. 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.

Analyse de cycle de vie conséquentielle appliquée à l'étude d'une maison individuelle

Charlotte Roux*¹, Patrick Schalbart¹, Bruno Peuportier¹

¹ MINES ParisTech, PSL – Research University, CES – Centre pour l'efficacité énergétique des systèmes

*charlotte.roux@mines-paristech.fr

RESUME. L'analyse du cycle de vie (ACV) est une méthode de plus en plus utilisée dans le secteur du bâtiment, en particulier pour l'aide à la conception. Les études d'ACV sont classées en deux grandes familles : l'approche attributionnelle (ACV-A) et l'approche conséquentielle (ACV-C). Les études ACV-A allouent une responsabilité environnementale au cycle de vie du produit étudié (e.g. l'impact d'un bâtiment). L'ACV-C se focalise sur les conséquences environnementales d'une décision (e.g. décision de construire un nouveau bâtiment). Ceci influence la réalisation de l'étude, notamment au niveau des données utilisées et des techniques d'allocations employées (allocation ou extension du système). Cette communication propose une comparaison entre ACV-A et ACV-C sur un cas d'étude simple : une maison individuelle passive située près de Chambéry. Les différences entre les deux approches sont importantes et peuvent affecter le classement de variantes de conception. Les deux approches sont discutées en fonction de leur apport concernant un objectif d'éco-conception.

MOTS-CLÉS : Analyse du cycle de vie, Éco-conception, Bâtiments

ABSTRACT. Life cycle assessment (LCA) is increasingly used in green building design. LCA studies are usually classified in two categories: attributional LCA (ALCA) and consequential LCA (CLCA). ALCA allocates environmental burden to the life cycle of a product or service (e.g. environmental impact of a building) whereas CLCA focuses on the environmental consequences of a decision (e.g. consequences of the decision to construct a new building). This affects the study process, leading to different choices for production data (average versus marginal production data) and to different choices concerning the allocation procedure (allocation versus system expansion). This paper presents a comparison between ALCA and CLCA using an energy-efficient single family house located near Chambéry. Discrepancies between the two approaches are important and may change the ranking of design alternatives. Consistency of ALCA and CLCA is discussed regarding an eco-design objective.

KEYWORDS : Life cycle assessment, Eco-design, Buildings

1. INTRODUCTION

La méthode ACV est aujourd'hui de plus en plus répandue dans le secteur de la construction (Chevalier 2009). Elle peut être appliquée à différents objectifs : en aide à la conception, aide à la rénovation, aide à la gestion, certification (Zabalza et al. 2009). Des projets européens comme REGENER se sont attachés à définir une méthodologie spécifique pour prendre en compte les particularités de ce secteur (Peuportier 2001).

Le logiciel novaEQUER (anciennement EQUER) a été développé pour modéliser le cycle de vie des bâtiments depuis l'étape de construction jusqu'à la démolition en passant par la vie en œuvre et les étapes de rénovation (Polster et al. 1996 ; Peuportier et al. 2013). Il est chaîné à l'outil de simulation

thermique dynamique COMFIE (Peuportier et Blanc Sommereux, 1990). Il évalue 12 indicateurs environnementaux, listés dans le Tableau 1.

Indicateurs	Unité	Facteur de normalisation (unité/hab/an)
Energie Primaire (CED)	GJ	177,9
Consommation d'eau (W)	m ³	339,0
Epuisement des ressources abiotiques (ADP)	kg Sb-eq	32,6
Production de déchets non-radioactifs (NRW)	t eq	10,4
Production de déchets radioactifs (RW)	dm ³	0,5
Potentiel de réchauffement global (GWP 100)	t CO ₂ -eq	8,7
Potentiel d'acidification (AP)	kg SO ₂ -eq	62,3
Potentiel d'eutrophisation (EP)	kg PO ₄ -eq	38,1
Domage à la biodiversité (BD)	PDF.m ² .yr	13700
Domage à la santé humaine (HD)	DALY	0,01
Formation d'ozone photochimique (POP)	kg C ₂ H ₄ -eq	19,7
Odeur (O)	Mm ³	-

Tableau 1 : Indicateurs environnementaux du logiciel novaEQUER.

Les études ACV sont généralement classées en deux grandes familles dans la littérature : l'approche attributionnelle (ACV-A) et l'approche conséquentielle (ACV-C) qui permettent de répondre à différents objectifs (Halvgaard et al. 2012). L'approche attributionnelle cherche à allouer une part de responsabilité à un système donnée alors que l'approche conséquentielle cherche à modéliser les conséquences environnementales d'une décision.

Cette communication propose une comparaison entre ACV-A et ACV-C sur un cas d'étude simple : une maison individuelle passive située près de Chambéry. Après une présentation des hypothèses méthodologiques caractérisant les deux approches, le cas d'étude est présenté et deux options de conception sont évaluées : le choix d'un mode constructif, béton banché ou ossature bois et la décision d'installer des panneaux photovoltaïques. Ceci permet d'analyser les conséquences du choix d'une approche ACV-A ou ACV-C en terme d'aide à la décision en phase de conception amont d'un projet.

2. ACV-A ET ACV-C

Les principales différences entre ACV-A et ACV-C sont détaillées dans les travaux de Brander et al. (2008). Elles concernent notamment l'objectif de l'étude, les frontières du système étudiés, le type de données utilisées, les méthodes d'allocations et la prise en compte d'effets indirects hors du cycle de vie considéré. Les différences prises en compte dans l'étude exposée ici sont listées dans le Tableau 2 et explicitées brièvement dans les paragraphes suivants.

	ACV-A	ACV-C
Objectif de l'étude	Certification/statuquo	Aide à la décision
Frontières du système	Cycle de vie, chaîne de valeur étudiée	Ensemble des conséquences liées à la décision prise
Données utilisées	Moyennes	Marginales
Allocations	Allocations / coproduit	Expansion du système / Impacts évités
Carbone biogénique	Bilan neutre	Bilan différencié
Fin de vie	Méthode des stocks	Méthode des impacts évités

Tableau 2 : Principales différences méthodologiques entre ACV-A et ACV-C

2.1. OBJECTIFS DE L'ETUDE

L'ACV-A est principalement associée à des objectifs de certification, de diagnostic de l'existant, d'évaluation d'une situation existante et figée. A contrario l'ACV-C est orientée vers des objectifs d'évolution d'un système, d'analyse de politiques publiques, d'aide à la décision (Earles et Halog 2011).

2.2. FRONTIERES DU SYSTEME ETUDIE ET ALLOCATIONS

En ACV-A, les frontières du système étudié se limitent précisément à la chaîne de valeur permettant de réaliser le produit ou service étudié. En ACV-C, le système étudié inclut (dans la mesure du possible) les éléments affectés par la décision prise. La principale implication méthodologique de cette différence est l'intégration d'impacts évités en ACV-C. Par exemple, si de l'électricité est produite en surplus par le bâtiment, elle est envoyée vers le réseau où elle sera consommée dans d'autres bâtiments. En ACV-A, l'électricité exportée n'est pas incluse dans les frontières du système. Les impacts de la fabrication, maintenance et fin de vie des panneaux photovoltaïques sont par ailleurs alloués au bâtiment au prorata de l'énergie auto-consommée. En ACV-C, l'intégralité des impacts liés aux équipements est affectée au bâtiment mais on comptabilise également des impacts « évités » liés à l'export d'électricité vers le réseau. Cet export permet au réseau de ne pas produire d'électricité, ce qui évite des impacts, bénéfique qui est associé au projet de bâtiment étudié.

2.3. DONNEES MOYENNES VS DONNEES MARGINALES

L'estimation des impacts dans une situation de *statu quo* figée telle que modélisée en ACV-A requiert l'utilisation de données moyennes de production, alors que les conséquences d'un changement, d'une évolution de l'existant seront mieux représentées par des données marginales en ACV-C. Ceci implique par exemple que sur un marché où plusieurs technologies sont en concurrence (e.g. marché des métaux entre filière vierge et filière de recyclage, marché de l'électricité, de la chaleur sur un réseau urbain), l'ACV-A utilisera le mix moyen de production des technologies et l'ACV-C va chercher à déterminer la ou les technologies en mesure d'ajuster la production (e.g. technologie la moins chère pouvant répondre à une hausse de la demande).

2.4. PRISE EN COMPTE DU CARBONE BIOGENIQUE

Deux types de méthodes existent pour la prise en compte du carbone biogénique en ACV :

- Bilan nul : la fixation du carbone durant la croissance végétale et la libération du carbone biogénique en cas d'incinération peuvent être exclues du comptage des émissions de CO₂, en considérant que ce qui a été stocké sera émis plus tard.
- Bilan différencié : plusieurs chercheurs préconisent plutôt un traitement différencié du carbone biogénique selon les différentes phases du cycle de vie (Rabl et al. 2007). Ceci permet de tenir compte de la provenance du bois (forêt gérée durablement ou non) et des différentes options de fin de vie (décharge, valorisation énergétique ou matière...).

On associe dans cette étude le bilan neutre à l'ACV-A et le bilan différencié à l'ACV-C. En effet, le bilan différencié considère les conséquences suite à l'utilisation de bois : si et seulement si la forêt est bien gérée (bois certifié), alors un arbre sera replanté. Ensuite, si le bois est incinéré avec ou sans valorisation énergétique, ou si il est mis en décharge, les conséquences en termes d'impacts seront différentes. En ACV-A on examine un état existant : le bois a effectivement stocké du CO₂ durant sa

croissance. Le bilan neutre permet de tenir compte du risque important de réémission de ce carbone en fin de vie.

2.5. BASES DE DONNEES DISPONIBLES

La dernière version de la base de données ACV ecoinvent (v3) est disponible sous trois approches de modélisation des inventaires : « cut-off », « allocation au point de substitution (APOS) », et « conséquentielle ». La version « cut-off » correspond à une approche de stock, où le producteur est responsable des déchets qu'il produit et ne peut être crédité d'aucun bénéfice sur un éventuel recyclage. Ceci correspond à la modélisation ACV-A. L'approche APOS correspond à une approche où un bénéfice peut être comptabilisé dans le cas où un produit est recyclé. La troisième version « conséquentielle » modélise les effets à long terme d'un changement de la demande. Elle est recommandée par ecoinvent pour les seules études prospectives. Le système APOS est retenu pour l'ACV-C dans le cas présenté ici car l'objectif n'est pas d'effectuer une étude prospective.

3. PRESENTATION DU CAS D'ETUDE

3.1. DESCRIPTION DES MAISONS INCAS

Quatre maisons de taille et de géométrie équivalente ont été construites sur la plateforme expérimentale INCAS, de l'Institut National de l'Energie Solaire (INES), située près de Chambéry. Elles diffèrent seulement par leur mode constructif : béton banché, double mur, ossature bois ou brique. Ces maisons ont fait l'objet de plusieurs travaux de recherche dont les rapports e, fournissent une description précise (CEA, 2010 ; Pannier 2014).



Figure 1 : Aperçu des maisons INCAS

Les maisons INCAS ont une surface habitable de 90 m². Aucun masque proche n'est considéré. Les données météorologiques utilisées pour la simulation thermique sont celles de la réglementation thermique 2012. Chambéry correspond à la zone thermique H2c, représentée par la ville de Mâcon.

Dénomination	Composition des murs	Remarques
I-BB	Béton Banché : enveloppe en béton et isolation par l'extérieur avec du polystyrène extrudé	Inertie lourde
I-OB	Ossature Bois et laine de bois pour l'isolation	Inertie moyenne

Tableau 3 : Composition des maisons Ossature bois (I-OB) et Béton Banché (I-BB)

Les épaisseurs d'isolants ont été calculées afin d'avoir une résistance thermique équivalente dans les deux maisons. Les ponts thermiques considérés sont ceux donnés dans le référentiel de la réglementation thermique 2012. Le système solaire pouvant être installé en option comprend 39,3 m² de panneaux photovoltaïques polycristallins installés en surimposition sur la toiture, orientés sud et inclinés à 26,5°. On fait l'hypothèse que la maison est occupée par une famille comprenant deux

adultes et deux enfants. Afin de se rapprocher de scénarios les plus réalistes possibles, on utilise les travaux réalisés par Vorger (2014) sur le comportement des habitants dans les bâtiments pour modéliser les apports internes (puissance dissipée, chaleur métabolique).

3.2. HYPOTHESES DE MODELISATION ACV

Le transport quotidien des habitants et la gestion des déchets ménagers sont exclus de cette étude qui se concentre sur l'aide à la conception des bâtiments. La durée de vie de la maison est estimée à 80 ans, les équipements ont une durée de vie supposée de 20 ans, les menuiseries de 30 ans et les revêtements de 10 ans. Un surplus chantier de 5 % est considéré pour l'ensemble des matériaux de construction. Un système de chauffage électrique à air est considéré.

En fin de vie du bâtiment, on fait l'hypothèse que 66 % des déchets inertes (béton, céramique, etc.) sont récupérés pour servir en sous-couche routière à la place de granulats naturels. Le reste des déchets inertes est envoyé en décharge (ADEME 2015). Concernant les matériaux type bois, 75 % sont valorisés en fin de vie et 25 % expédiés en décharge. La valorisation considérée est une valorisation énergétique de production de chaleur en remplacement éventuel de gaz naturel. Les autres matériaux combustibles (polystyrène) sont incinérés pour 60 % et envoyé en décharge pour le reste.

4. RESULTATS

4.1. SIMULATION ENERGETIQUE DYNAMIQUE

Les résultats de la simulation énergétique dynamique sont donnés dans le Tableau 3 ci-dessous. Les deux variantes ont des besoins de chauffage très proches, ce qui permet de comparer le choix des systèmes constructifs à performance énergétique équivalente.

	Besoins de chauffage (kWh/an)	Apports Internes (appareils kWh/an)	Apports Internes (métaboliques kWh/an)	Tmax Séjour (°C)	Production PV (kWh/an)
I-BB	1173	3224	1494	30,5	4964
I-OB	1177	3224	1494	30,8	4964

Tableau 4 : Résultats de la simulation énergétique dynamique pour les deux variantes I-BB et I-OB

4.2. ANALYSE DE CONTRIBUTION

L'analyse de contribution s'effectue à partir de la variante de base I-BB (sans production photovoltaïque). Les différentes étapes du cycle de vie sont évaluées en équivalent-habitants année : la valeur absolue de l'indicateur est divisée par une valeur de référence représentant l'ensemble des émissions globales (tous secteurs économiques confondus) sur une année et sur une zone géographique donnée. Les valeurs de normalisation utilisées sont données dans le Tableau 1. Les résultats sont présentés à la Figure 2 ci-dessous.

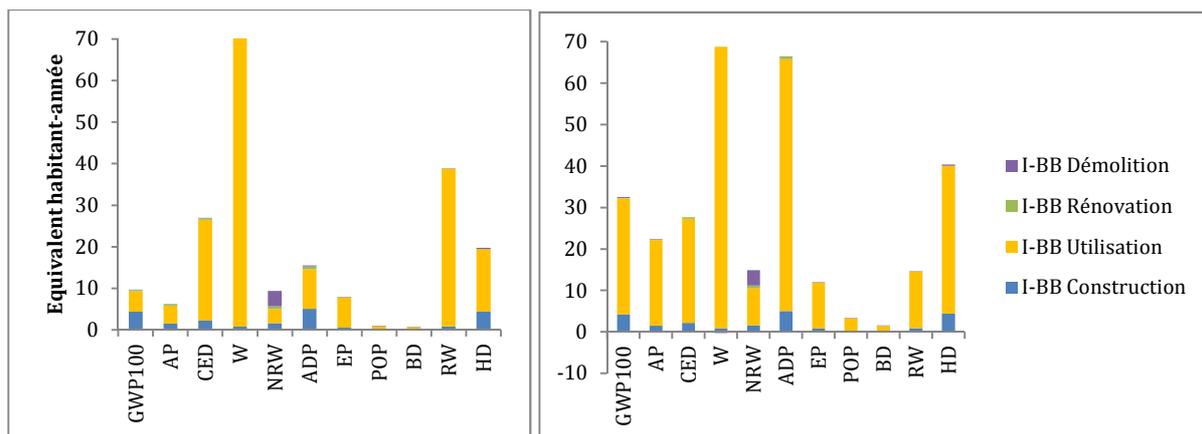


Figure 2 : Analyse de contribution en ACV-A (gauche) et ACV-C (droite) sur la base des impacts de la maison I-BB normalisés

Pour les deux approches, les indicateurs de production d’ozone photochimique (POP) et de dommage à la biodiversité (BD) apparaissent comme non prioritaires et l’eau utilisée (W) et les dommages à la santé (HD) comme prioritaires. L’indicateur d’effet de serre (GWP100) prend une importance beaucoup plus grande dans la méthode ACV-C, les déchets radioactifs (RW) sont très importants en ACV-A et beaucoup moins en ACV-C.

La contribution des différentes étapes du cycle de vie au bilan global varie de façon importante selon la méthode considérée. L’utilisation du bâtiment est largement prépondérante en ACV-C, son poids est plus faible en ACV-A. Les étapes de construction, rénovation et démolition représentent jusqu’à 64 % des déchets produits et 49 % de l’effet de serre en ACV-A contre respectivement 40 % et 14 % en ACV-C.

4.3. CHOIX D’UN PRINCIPE CONSTRUCTIF

Les résultats obtenus pour la maison I-BB et I-OB sont donnés dans le Tableau 5 sur les seules phases de construction, rénovation et démolition. La phase d’utilisation est pratiquement identique (moins de 1 % de différence) en conséquence de la performance énergétique similaire des deux maisons.

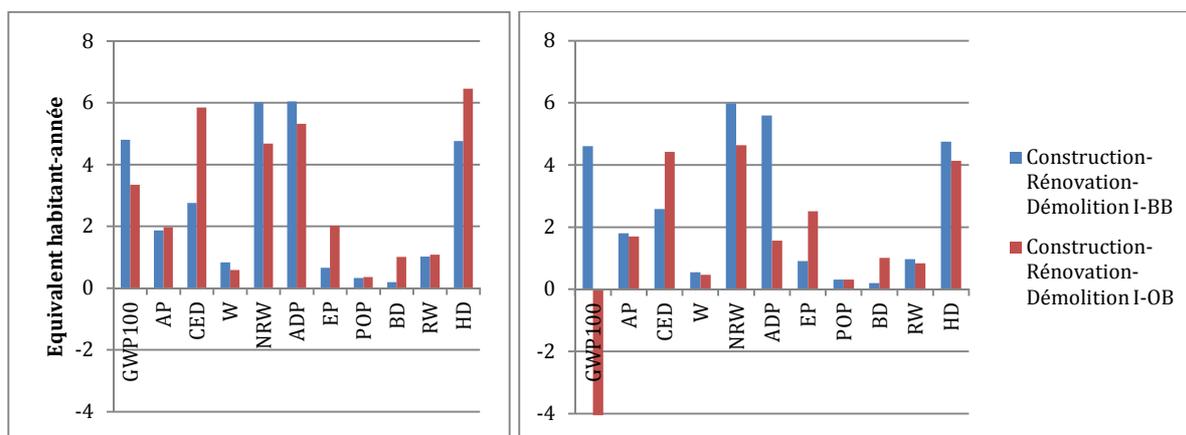


Figure 3: Bilan environnemental des variantes bois et béton exprimé en équivalent habitant-année, en ACV-A(gauche) et ACV-C (droite)

La méthode ACV-C est plus favorable à la variante I-OB que la méthode ACV-A grâce à la comptabilisation des impacts évités par la valorisation énergétique du bois en fin de vie. Les

dommages à la biodiversité sont principalement liés à l'utilisation des sols, la foresterie étant une activité extensive consommant beaucoup d'espace.

4.4. PRODUCTION LOCALE D'ELECTRICITE PHOTOVOLTAÏQUE

L'option de conception évaluée concerne la décision d'installer un système photovoltaïque. On considère les impacts liés à la fabrication et à la rénovation des équipements et les impacts évités par une consommation moindre d'électricité et éventuellement par un export d'électricité vers le réseau. Les résultats selon la méthode utilisée (ACV-A ou ACV-C) sont donnés à la figure 3 ci-dessous.

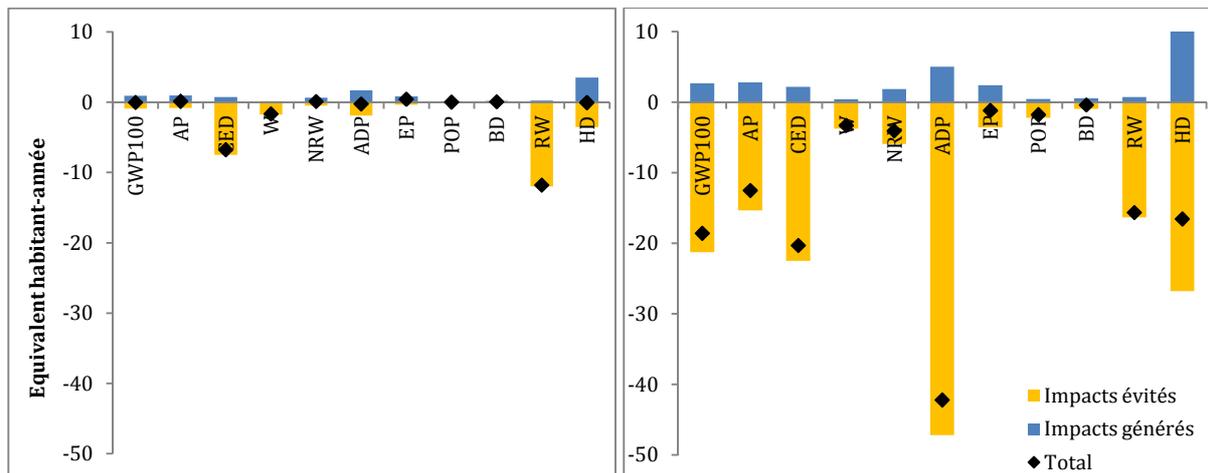


Figure 3 : Impacts générés (>0) ou évités (<0) par l'installation du système photovoltaïque, selon la méthode considérée, ACV-A (gauche) ou ACV-C (droite), exprimé en équivalent habitant-année.

La méthode ACV-C est plus favorable que la méthode ACV-A à la mise en place du système PV et ce pour l'ensemble des indicateurs considérés ; le bilan (losange noir dans la figure 3) est négatif : davantage d'impacts sont évités que générés. En effet, la prise en compte de l'électricité exportée ainsi que les impacts importants de l'électricité consommée (produite par les technologies marginales de production, gaz, charbon et nucléaire) renforcent l'intérêt environnemental de la production renouvelable locale d'énergie.

5. CONCLUSION

Le choix d'une approche attributionnelle ou conséquentielle pour la réalisation de l'étude environnementale d'un projet de bâtiment a une influence importante sur l'aide à la décision apportée. Le classement des meilleures variantes peut être différent selon la méthode utilisée. Le choix doit être fait en fonction des objectifs de l'étude.

L'utilisation de l'ACV en phase amont a pour objectif d'apporter une aide à la décision de façon à réorienter les pratiques de conception vers des pratiques plus respectueuses de l'environnement. Ceci plaide pour l'utilisation d'une approche conséquentielle pour l'aide à la conception. Les répercussions environnementales positives ou négatives d'un projet sont évaluées de façon plus réaliste et exhaustive que dans le cas de l'approche ACV-A qui semble plus adaptée à une approche de certification ou de suivi des évolutions de l'ensemble du parc bâti. L'utilisation de l'ACV conséquentielle permet d'évaluer de façon différenciée des stratégies de conception (bois certifié ou non, « design for

dismantling ») et intègre les interactions entre un bâtiment ou un système et les systèmes énergétiques, notamment dans le cas de l'électricité (production marginale d'électricité).

6. REMERCIEMENTS

Ce travail a été effectué dans le cadre de la chaire Eco-conception des ensembles bâtis et des infrastructures.

7. BIBLIOGRAPHIE

- ADEME. 2015. "Déchets : Chiffres Clés - Edition 2015."
http://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/chiffres-cles-dechets-201507_8500.pdf.
- Brander, M., R. Tipper, C. Hutchison, and G. Davis. 2008. *Technical Paper: Consequential and Attributional Approaches to LCA: A Guide to Policy Makers with Specific Reference to Greenhouse Gas LCA of Biofuels*. Econometrica Press.
http://www.globalbioenergy.org/uploads/media/0804_Ecometrica_-_Consequential_and_attributional_approaches_to_LCA.pdf.
- Chevalier, Jacques. 2009. "ACV Utilisation Dans Le Secteur de La Construction."
<http://www.techniques-ingenieur.fr/res/pdf/encyclopedia/42566210-g5880.pdf>.
- Commissariat à l'Énergie Atomique et aux énergies alternatives (CEA). 2010. "Projet ANR Habisol 2008, SIMINTHEC L1-1, Plateforme INCAS, Description Des Bâtiments Test et Des éléments et Systèmes Contenus." Rapport technique DTS/DR/2010/022. CEA Liten.
- Earles, J., and Anthony Halog. 2011. "Consequential Life Cycle Assessment: A Review." *The International Journal of Life Cycle Assessment* 16 (5): 445–53. doi:10.1007/s11367-011-0275-9.
- Halvgaard, R., N.K. Poulsen, H. Madsen, and J.B. Jorgensen. 2012. "Economic Model Predictive Control for Building Climate Control in a Smart Grid." In *Innovative Smart Grid Technologies (ISGT), 2012 IEEE PES*, 1–6. doi:10.1109/ISGT.2012.6175631.
- Pannier, Marie-Lise. 2014. "Analyse de Cycle de Vie Des Maisons Passives de La Plateforme INCAS."
- Peuportier, B., and Blanc Sommereux, I. 1990. "Simulation Tool with Its Expert Interface for the Thermal Design of Multizone Buildings." *International Journal of Solar Energy* 8 (2): 109–20. doi:10.1080/01425919008909714.
- Peuportier, B.L.P. 2001. "Life Cycle Assessment Applied to the Comparative Evaluation of Single Family Houses in the French Context." *Energy and Buildings* 33 (5): 443–50. doi:10.1016/S0378-7788(00)00101-8.
- Peuportier, Stéphane Thiers, and Alain Guiavarch. 2013. "Eco-Design of Buildings Using Thermal Simulation and Life Cycle Assessment." *Journal of Cleaner Production* 39 (0): 73–78. doi:10.1016/j.jclepro.2012.08.041.
- Polster, Bernd, Bruno Peuportier, Isabelle Blanc Sommereux, Pierre Diaz Pedregal, Christophe Gobin, and Eric Durand. 1996. "Evaluation of the Environmental Quality of Buildings towards a More Environmentally Conscious Design." *Solar Energy* 57 (3): 219–30. doi:10.1016/S0038-092X(96)00071-0.
- Rabl, Ari, Anthony Benoist, Dominique Dron, Bruno Peuportier, Joseph V. Spadaro, and Assaad Zoughaib. 2007. "How to Account for CO2 Emissions from Biomass in an LCA." *The International Journal of Life Cycle Assessment* 12 (5): 281–281. doi:10.1065/lca2007.06.347.
- Vorger, Eric. 2014. "Étude de L'influence Du Comportement Des Occupants Sur La Performance énergétique Des Bâtiments." Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris.
- Zabalza Bribián, Ignacio, Alfonso Aranda Usón, and Sabina Scarpellini. 2009. "Life Cycle Assessment in Buildings: State-of-the-Art and Simplified LCA Methodology as a Complement for Building Certification." *Building and Environment* 44 (12): 2510–20. doi:10.1016/j.buildenv.2009.05.001.

De l'évaluation multicritère à l'optimisation paramétrique d'un tissu urbain

Florian Dupont¹, Jean-Marie Cariolet², Francesco Cingolani³, Leslie Correira Laosengthong⁴, Anna Kern⁵, Aymeric de La Bachelerie¹, Katia Laffrechine⁴, Denis Morand⁴, Athmane Ouahab⁴, Margot Pellegrino⁴

¹ Franck Boutté Consultants (fdupont@franck-boutte.com) ; ² Lab'Urba EIVP ; ³ @immaginoteca ; ⁴ Lab'Urba UPEM ; ⁵ SADEV 94

RESUME. Le projet MESH (Morphology, Environment, Sustainability and Human comfort) se positionne à l'interface entre chercheurs, designers et décideurs. Il ambitionne de développer des méthodes d'analyse des projets d'aménagement urbain à partir de l'évaluation d'indicateurs environnementaux. L'objectif est ainsi de créer des outils d'aide à la décision, aussi bien que d'aide à la conception pour répondre aux besoins opérationnels des décideurs (aménageurs, collectivités...) et des concepteurs (architectes, urbanistes).

Le projet vise à définir un système d'indicateurs (groupés par thématique et hiérarchisés) permettant d'évaluer, de comparer et de faire évoluer la performance des formes urbaines en termes de consommations (énergie, ressources) et d'ambiances (thermique, visuelle, acoustique, olfactive...). Pour ce faire, MESH prévoit l'utilisation des outils de conception paramétrique pour la modélisation, l'analyse, et l'optimisation des morphologies urbaines.

Selon une approche multi échelle (du quartier à l'îlot au bâtiment, au logement), la caractérisation environnementale du projet permet le suivi des niveaux de performances, s'adapte et se précise au fur et à mesure de son avancement. La démarche sera testée, en partenariat avec les acteurs locaux, sur le terrain de la ZAC Ivry-Confluences, qui a la particularité de voir cinq urbanistes de renom dessiner plusieurs versions du même plan-masse.

MOTS-CLÉS : aide à la décision et à la conception, modélisation multi-échelle, outils paramétriques, performance environnementale des morphologies urbaines

ABSTRACT. ABSTRACT. The MESH project (Morphology: Environment, Sustainability and Human comfort) is at the interface between researchers, designers and decision makers. It aims to develop analysis tools of urban morphology through environmental indicators. The scope is to create decision and design support tools that meet the operational needs of decision makers (developers, local authorities...) and designers (architects, town-planners...).

The project aims to define a system of indicators (grouped by theme and hierarchized) to evaluate, compare and make evolve the performance of urban forms in terms of consumption (energy, resources) and environmental comfort (thermal, visual, acoustic, ...). To achieve this, MESH intends to use parametric design tools for the modelling, the analysis, and the optimization of urban morphologies.

According to a multi-scale approach (from the district to the plot, building, and then dwelling), the environmental characterization of the project enables to monitor the performance levels, adapting it and making it progressively evolve. The approach will be tested in partnership with local institutions in the Ivry-Confluences ZAC (Urban development zone), where five renowned urban planners are drawing multiple versions of the same masterplan.

KEYWORDS : decision support and design, multi-scale modeling, parametric tools, environmental performance of urban morphologies

1 INTRODUCTION

Les approches de conception paramétrique à l'échelle du bâtiment dans l'objectif d'améliorer la performance environnementale sont relativement connues et maîtrisées ; l'examen de la littérature relative à

ce domaine permet d'affirmer que la connaissance y est bien plus avancée que pour son équivalent à l'échelle urbaine. D'un point de vue quantitatif, la mise en œuvre de cette approche à une échelle urbaine, dans le sens où celle-ci dépasse la simple somme de bâtiments, n'a jamais été concrètement appliquée en France. Or, la conception paramétrique s'avère particulièrement pertinente afin d'évaluer la performance énergétique d'opérations d'aménagement, notamment en permettant de comparer des solutions morphologiques et architecturales diverses. En effet, la « performance » d'une forme urbaine s'évalue, entre autres et du point de vue de sa durabilité, tant sur sa capacité à être sobre en énergie que sur sa capacité à créer du confort. Concevoir des projets performants d'un point de vue énergétique relève de la prise en compte conjointe de l'ensemble des paramètres environnementaux du projet : accès au soleil, accès au ciel, sources de nuisances...

C'est tout l'objectif du projet MESH¹ que de répondre aux questions suivantes : quelle est la part de la morphologie urbaine dans le bilan global environnemental ? Quels sont les leviers disponibles pour améliorer la performance énergétique et la qualité des ambiances à l'échelle urbaine ? Cet article présente le projet, le positionnement scientifique et opérationnel et les premiers résultats de ce travail de recherche.

2 ETAT DE L'ART

Dans le cadre du projet MESH, l'état de l'art se focalise sur les travaux de recherche visant à mettre en relation la forme (morphologie) urbaine, le confort (thermique, acoustique, visuel, etc.) et la performance énergétique. La littérature propose un large éventail d'indicateurs permettant d'évaluer le confort à l'échelle du bâtiment, de l'îlot et du quartier, mais peu de travaux de recherche, tout au moins en France, formalisent et/ou utilisent ces indicateurs dans un même processus de conception, à l'échelle urbaine, pour évaluer la performance énergétique d'opérations d'aménagement, en intégrant les relations d'interactions entre les indicateurs.

Par exemple, Haoues-Jouve et al. (2008) montrent que la perception du microclimat par les habitants et les usagers des espaces – et, pour ce qui nous intéresse dans le cadre de ce projet, des éventuelles situations de confort ou d'inconfort – est très complexe. Du point de vue du confort thermique, même si elle est moins explorée qu'à l'intérieur des espaces bâtis, la perception thermique extérieure a fait l'objet d'un certain nombre d'études ayant principalement comme objectif de traduire en indicateurs le résultat d'expérimentations de terrain réalisées dans différents contextes climatiques. La difficulté reste de définir pour ces indicateurs des seuils de confort/inconfort, car les résultats des principales recherches en la matière montrent qu'ils dépendent des conditions climatiques de grande échelle des sites étudiés aussi bien que des conditions locales (exposition, vent) et de l'interaction avec d'autres sources d'inconfort (acoustique, qualité de l'air, confort visuel, esthétique). Les seuils de confort/inconfort varient également selon les individus (i.e. selon leur profil – sexe, âge, état de santé –, leur activité, leur histoire).

1

MESH (Morphology, Environment, Sustainability and Human comfort) est un projet de recherche sur 3 ans (juin 2015-juin 2018) financé par l'ADEME dans le cadre de l'APR MODEVAL-URBA « Modélisation et évaluation au service des acteurs des villes de demain ». Porté par Franck Boutté Consultants, il se construit autour d'un partenariat qui implique le Lab'Urba, Immaginoteca et la SADEV94 (Ivry Confluences).

Du point de vue du confort acoustique, il apparaît, dans de nombreuses études, que la nouvelle méthode de prédiction des bruits (NMPB) est l'approche officielle pour modéliser la propagation des ondes sonores en milieu urbain. De manière générale, cette approche repose sur des méthodes de calcul en conditions homogènes et un calcul en conditions « favorables ». Elle prend en compte le rayonnement direct entre la source sonore et le récepteur, les trajets réfléchis sur des parois planes verticales (en considérant l'hypothèse de réflexion spéculaire), les trajets diffractés par les arêtes horizontales et verticales. Weber et al. (2014) montrent que les indices paysagers combinés à des paramètres morphologiques (hauteur de bâtiments, densité du bâti, densité des routes) sont utiles pour prédire les nuisances sonores en milieu urbain. De nombreuses études ont montré une corrélation positive entre les nuisances sonores et la densité du bâti. Cependant, un fort maillage du réseau viaire peut aussi entraîner une diminution du trafic, et donc une diminution des nuisances sonores (Ariza-Villaverde et al., 2014). Il existe également une corrélation positive entre les concentrations de polluants atmosphériques dues au trafic et les nuisances sonores dues au trafic (Chowdhury et al., 2015). Si l'on considère le trafic routier comme la principale source de nuisance sonore en milieu urbain, il devient possible d'évaluer la spatialisation des nuisances sonores à partir d'une cartographie de la qualité de l'air.

Les méthodes de cartographie de la qualité de l'air, à l'échelle urbaine, sont souvent basées sur des modèles de dispersion. Néanmoins, ces simulations semblent complexes et longues à mettre en œuvre. Il apparaît que l'utilisation d'indicateurs plus simples permet l'évaluation de l'impact des formes urbaines sur la qualité de l'air. Smith et Cariolet (2012) et Yuan et al. (2014) ont montré que les paramètres de la morphologie urbaine permettent d'exprimer la capacité d'un système urbain à ventiler et à disperser les polluants. En effet, concernant la ventilation, les méthodes de calcul morphométrique telles que la longueur de rugosité, l'accès au ciel ou encore la profondeur des canyons urbains montrent la capacité d'une forme urbaine à diminuer les concentrations. Winter et al. (2013) et Kenworthy (2014) ont montré également que les formes urbaines pouvaient influencer les usages en termes de transport, et donc les émissions liées au trafic routier. Plusieurs indicateurs ont ainsi été créés pour évaluer la capacité des formes urbaines à réduire la dépendance à la voiture, la "marchabilité" ou encore la capacité à favoriser l'utilisation du vélo. Roussel (2014) a souligné que l'élaboration de carte stratégique de type aléas-enjeux permet de cartographier l'exposition horizontale des populations à la pollution de l'air en milieu urbain. Jung et al. (2011) a montré que, sur un plan vertical, les concentrations de polluants diminuaient avec l'altitude en milieu urbain.

Il convient de préciser que, malgré la définition encore floue de la forme urbaine, la morphologie urbaine désigne ici l'approche structurale de la forme urbaine. Lévy (2005) précise que « l'analyse de la dynamique des formes urbaines, leur formation/transformation, leur mode d'évolution, ont été l'objet principal d'études de la morphologie urbaine ou morphogénèse ». L'idée est de considérer la forme dans son acception bioclimatique : c'est le registre qui convient à ce travail, si l'on opère un changement d'échelle du mot « bioclimatique », très utilisé en architecture, au mot « microclimatique », adapté à une échelle urbaine.

Un grand nombre d'études récentes portent sur le rapport entre formes et ambiances urbaines. Concernant l'impact des formes urbaines sur le microclimat, les travaux les plus récents se focalisent soit sur l'étude d'un seul élément (par exemple, les surfaces végétalisées – Caijun, 2011), soit sur l'étude de combinaisons

d'éléments différents (comme la densité, l'usage du sol, l'orientation, entre autres). À partir d'enquêtes et de mesures climatiques *in situ*, Nikolopoulou (2004) détermine un indice de confort thermique susceptible d'être utilisé dans les premiers stades de la conception urbaine. En effet, en phase de conception, il est possible d'envisager des stratégies d'aménagement urbain jouant avec les formes urbaines, l'orientation et la hauteur des bâtiments, le taux de végétalisation, ainsi que le choix des matériaux, et cela, afin d'agir sur les ambiances urbaines et d'améliorer ainsi le confort des habitants et des usagers. Les bénéficiaires de ces démarches sont effectivement à la fois les futurs habitants du quartier et les utilisateurs occasionnels ; l'attractivité du projet se mesurera à sa capacité à répondre aux exigences et aux désirs des deux catégories. En effet, plusieurs études ont montré le lien entre confort thermique et usages et pratiques des espaces publics. Les habitants et les usagers adaptent leur comportement en réponse à une ambiance donnée, ce qui peut avoir un effet de rétroaction sur l'ambiance elle-même (c'est le cas de l'usage de la climatisation, qui rafraîchit l'intérieur des bâtiments en rejetant vers l'extérieur de l'air chaud et contribue à la surchauffe du microclimat urbain). Ces comportements vont surtout déterminer le succès ou l'échec d'une opération urbaine du point de vue de son attractivité : les espaces publics seront-ils fréquentés ? Y aura-t-il un passage de piétons, une fréquentation des cafés, une densité de parcours ? Bien évidemment, les comportements ne dépendent pas que des ambiances et des états de confort et inconfort qui en résultent, mais d'une longue liste de facteurs qui vont du décor urbain, de l'accessibilité aux espaces, à leur design, à l'offre commerciale du site, etc. Toutefois, des études récentes (Knez et al., 2006) montrent une corrélation non négligeable entre l'attractivité d'un espace public (défini en termes de densité de fréquentation, appréciation, etc.) et la qualité de ses ambiances.

3 LE PROJET MESH : OBJECTIFS, MÉTHODES ET PREMIERS RÉSULTATS

Le projet MESH vise d'une part à définir les marges de manœuvre que possèdent les concepteurs et les maîtrises d'ouvrage sur la performance énergétique d'un projet urbain et d'autre part à construire et à valider des méthodes et des outils capables d'accompagner ces mêmes acteurs dans la définition de leurs projets. Il s'agit d'identifier des leviers disponibles, de les coupler à des leviers décisionnels et d'en mesurer la portée pour améliorer la qualité environnementale des projets urbains.

Pour ce faire, le processus complet de la conception urbaine est investi, en mettant en relation tant des connaissances méthodologiques qu'opérationnelles². Les indicateurs et les outils sont questionnés dans les processus opérationnels de conception des projets urbains denses qui caractérisent les opérations d'aménagement d'aujourd'hui autour des dessertes de transports en commun. L'idée est de travailler sur l'articulation entre la réduction des besoins énergétiques (performance énergétique des formes urbaines) et la qualité environnementale de ces projets au sens du confort, des ambiances et de la maîtrise des nuisances et pollutions.

Dans un premier temps, quelques 70 indicateurs ont été sélectionnés dans la bibliographie (non encore définitive). Ils répondent, par exemple, à des besoins d'appréciation (d'évaluation) de la morphologie urbaine

2

Les partenaires du projet MESH permettent cet aller-retour pour cette recherche action : chercheurs, aménageurs, collectivité, agence de conception et ingénierie environnementale.

et du confort thermique (Tableau 1), de la morphologie et du confort acoustique, de la morphologie et du confort visuel. Pour chaque indicateur, la même fiche de description est proposée, elle identifie le nom (ou les noms) de l'indicateur, le décrit clairement, mentionne les paramètres utilisés pour le qualifier ou le quantifier et le cas échéant la (les) méthode(s) de calcul associée(s). La phase de travail en cours consiste à confronter ces indicateurs à la réalité opérationnelle, à la disponibilité des données (paramètres) utiles d'une part, mais également à questionner les différentes échelles d'évaluation (bâtiment, espace public, îlot, quartier, ...) afin d'apprécier la qualité environnementale des projets urbains.

La phase de recherche engagée récemment consiste à construire un système d'indicateurs opérationnels, permettant l'évaluation des projets d'aménagement. Ce système reprend les indicateurs utilisés par la communauté scientifique internationale, pour les associer et les hiérarchiser sur la base d'une analyse structurelle descendante, méthode *a priori* pertinente pour identifier les indicateurs les plus impactants.

Tableau 1: Extrait du tableau de synthèse des indicateurs (B: bâtiment, EP : espaces publics, S : site)

N.	Indicateur/ Paramètre	Description	Echelle(s)*	Paramètre(s)/Méthode de calcul	Source(s)	Leviers d'action identifiés par Franck Boutté Consultants
33	Densité végétale	Elle fait référence à la distribution horizontale de tous les aménagements urbains verts (parcs végétaux, jardins, arbres, ... etc.) et leur rapport avec la surface totale du périmètre de calcul. La répartition des surfaces végétales dans le tissu urbain a des répercussions locales sur le bilan des températures et sur celui des humidités relatives de l'air (FOUAD A.O., 2007).	S	Les paramètres à prendre en compte sont : - l'ensemble des aménagements végétaux, - la surface totale du projet considéré. La densité végétale peut ainsi être calculée comme suit : $D_v = A_v/A_g$ Où D_v correspond à la densité végétale, A_v à la surface totale de l'aménagement vert, et A_g à la surface totale du périmètre de calcul (FOUAD A.O., 2007).	Fouad, A. O. (2007). Morphologie urbaine et confort thermique dans les espaces publics: étude comparative entre trois tissus urbains de la ville de Québec (PhD dissertation, Université Laval).	Programmation Morphologie Espaces publics

Cette approche consiste à mettre en évidence, grâce à une matrice des causalités, les influences ou les dépendances mutuelles (interactions) qui s'exercent entre les indicateurs. Ce travail doit permettre de visualiser le tissu de liens complexes qui existe entre les différents indicateurs de performance environnementale et les paramètres qui entrent dans leur calcul.

L'approche structurelle peut être décomposée en trois étapes (Figure 1), dont la première est cruciale pour la construction du système d'indicateurs : le choix des indicateurs par leur degré d'impact. Il s'agit ici, après avoir confronté les indicateurs de la bibliographie pertinents avec les pratiques opérationnelles, de les sélectionner en fonction de leurs pouvoirs d'impact dans le système. La deuxième étape de l'approche structurelle vise à clairement identifier les paramètres maîtrisables ou non-maîtrisables (à faible pouvoir de maîtrise). Cette analyse permet de définir les paramètres « endogènes » et ceux qui sont « exogènes » à notre « système d'indicateurs ». L'objectif de cette étape d'analyse est de définir deux grilles de paramètres :

- les paramètres exogènes qui correspondent à des données non intrinsèques au projet urbain lui-même, comme par exemple les données météorologiques.

- les paramètres endogènes, les paramètres maîtrisables sont considérés comme des leviers d'actions disponibles, ce sont les variables d'ajustement du système : leviers de programmation urbaine, architecturaux etc.

La dernière étape de l'analyse structurale est relative à l'identification et à la description des interactions dynamiques entre les indicateurs permettant d'identifier de manière tangible les causalités interactionnelles entre indicateurs. Il s'agit de déterminer les paramètres communs afin, d'une part, de simplifier la lecture du système d'indicateurs pour une évaluation environnementale à l'échelle du projet urbain et d'éviter la redondance lors d'une éventuelle implémentation numérique.

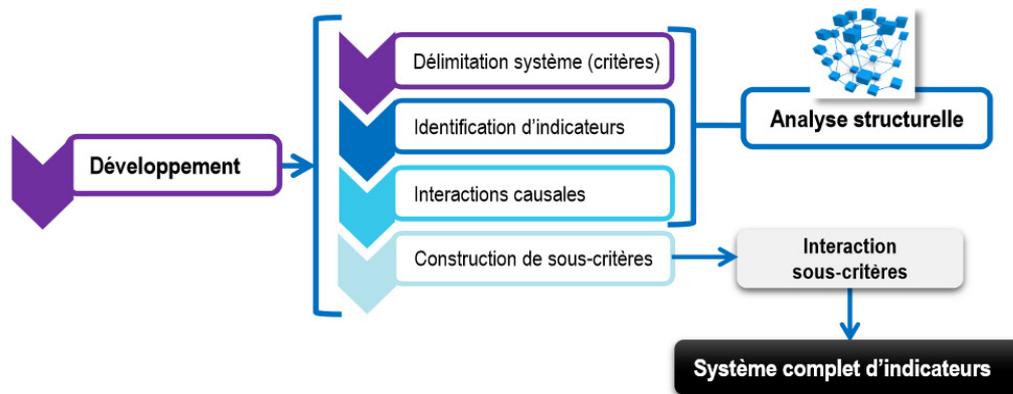


Figure 1 : Les différentes étapes de la construction du système d'indicateurs pour une évaluation environnementale à l'échelle du projet urbain

Une fois ce travail sur les indicateurs et leur systématisation complété, il sera porté à l'attention des acteurs institutionnels impliqués dans l'aménagement urbain. Cette étape permettra de cadrer de manière opérationnelle les outils et résultats associés. L'ambition du projet MESH est de se positionner tant comme outil d'aide à la décision que comme outil d'aide à la conception pour répondre aux besoins des décideurs et des concepteurs. Pour y parvenir, notre démarche adresse des problématiques concrètes tant au niveau de la conception que des processus opérationnels. Cette tâche consistera alors à vérifier la solidité et la pertinence de notre système d'indicateurs à partir de l'analyse de projets urbains réels (les acteurs du projet d'Ivry Confluences sont partenaires du projet MESH) et de l'échange avec les aménageurs et les concepteurs. Cette étape permettra de valider la définition du processus opérationnel qui, associée aux conclusions de l'état de l'art, permettra de définir une série d'indicateurs transversaux et opérationnels, qui seront intégrés aux outils de modélisation et simulation.

En effet, en parallèle de l'étape d'élaboration du système d'indicateurs pour une évaluation environnementale à l'échelle du projet urbain des outils de conception et d'évaluation de morphologies urbaines et bâtis (îlots) seront développés. En effet, une large palette d'outils déjà existants permet d'aborder l'ensemble des aspects environnementaux à l'échelle du bâtiment (DesignBuilder ENERGY+, ECOTECT, entre plusieurs autres). Toutefois, l'utilisation d'outils permettant de qualifier la performance environnementale d'un projet urbain est très peu fréquente dans le milieu opérationnel, malgré certains outils bâtiments (Archiwizard, Climatelite) qui pourraient être utilisés pour qualifier des projets à grandes échelles.

Mais ceux-ci n'ayant pas été conçus à cet effet, les temps de calculs sont souvent importants et le type de données non adapté. Dans le milieu de la recherche, de nombreux outils permettant de qualifier les formes urbaines sont en cours de développement (SERVEAU, UMI, CitySim, entre autres). Ils ont principalement une approche de performance énergétique et abordent très peu les questions de conception bioclimatique et d'ambiance dans les projets urbains. De plus, ils permettent de qualifier la performance énergétique des bâtiments mais ne proposent pas de processus d'optimisation des projets.

Cet aspect est, par contre, le point fort des outils de conception paramétrique. De plus en plus utilisés à l'échelle du bâtiment, ils permettent par exemple de créer des formes spécifiques au regard de contraintes structurelles. Grâce au plug-in Grasshopper du logiciel de modélisation 3D Rhinoceros, nous visons un passage d'échelle et notamment le développement d'un outil paramétrique de conception et d'évaluation de morphologies urbaines et bâtis (îlots). Le principe de fonctionnement d'un modèle paramétrique est le suivant : une géométrie dynamique est générée en fonction d'un certain nombre de paramètres, la modification des valeurs de ceux-ci se répercute sur l'ensemble de la géométrie dynamique. Grasshopper offre la possibilité de faire interagir directement et rapidement les modèles 3D conçus par les urbanistes avec des outils d'analyse paramétrique créés spécifiquement aux regards d'indicateurs définis.

Les outils d'analyse paramétrique développés devront caractériser les morphologies urbaines sur la base d'indicateurs de consommations et d'ambiances et optimiser les morphologies au regard des problèmes rencontrés (mauvaise irradiation des espaces publics majeurs, nuisances sonores...).

4 CONCLUSION

Au cours de ces premiers mois du projet MESH qui s'étalera sur trois ans, l'état de l'art a été dressé, prenant la forme d'une synthèse des indicateurs qui caractérisent à la fois la morphologie urbaine et la qualité des ambiances, ici appréhendée sous l'angle du confort au sens large. Un système d'indicateurs opérationnels a été créé à partir d'une large revue de littérature. L'approche structurelle permettra d'en expliciter les interactions.

Ce système d'indicateurs servira de base pour la modélisation multi-échelle par conception paramétrique, adoptée dans le cadre de MESH. Cela permettra d'aboutir dans un premier temps à une quantification relative des gains de performance (énergétique, thermique, acoustique, ...etc.), pour éventuellement tendre vers une quantification de ces performances intrinsèques d'une forme urbaine.

A l'échelle de l'îlot, une première expérience de caractérisation et d'optimisation monocritère des formes urbaines a été menée pour le projet de la ZAC Ivry Confluences. Sur la base d'une proposition de départ, un algorithme évolutionnaire a permis d'aboutir à la génération de plusieurs variantes de même densité dont le gain de performance au regard d'indicateurs de compacité, de solarisation, d'exposition au ciel, de vis-à-vis est compris entre 3,4% et 30%.

Il s'agira également, de faire face à l'une des limites possibles de l'approche par modélisation paramétrique, c'est à dire une atomisation excessive des analyses pouvant briser le continuum du processus

de conception d'un projet urbain, qui est, par sa propre nature, non linéaire, complexe et partagé entre les différents acteurs.

En perspective, il s'agira donc de développer une méthode de conception paramétrique à l'échelle du projet urbain, sur la base d'un processus d'optimisation collaboratif intégrant à la fois la forme urbaine et les attentes des différents acteurs.

5 BIBLIOGRAPHIE

Ariza-Villaverde, A.B., Jiménez-Hornero, F.J. & Gutiérrez De Ravé, E., 2014. Influence of urban morphology on total noise pollution: multifractal description. *The Science of the total environment*, 472, pp.1–8.

Chowdhury, A.K., Debsarkar, A. & Chakrabarty, S., 2015. Novel Methods for Assessing Urban Air Quality: Combined Air and Noise Pollution Approach. *Journal of Atmospheric Pollution*, p.1–8.

Fund-Maurin et al., 2015. Principles for modeling structural covers over road and rail infrastructures in urban areas. In *3rd Annual International Conference on Architecture and Civil Engineering*. Singapore.

Haoues-Jouve et al., 2008. Formes urbaines, modes d'habiter et climat urbain dans le périurbain toulousain. *Projet exploratoire de recherche interdisciplinaire*.

Kenworthy, J., 2014. Total Daily Mobility Patterns and Their Policy Implications for Forty-Three Global Cities in 1995 and 2005. *World Transport Policy and Practice*, 20 (1), pp.41–55.

Knez, I. & Thorsson, S., 2006. Influences of culture and environmental attitude on thermal, emotional and perceptual evaluations of a public square. *International journal of biometeorology*.

Lévy, A., 2005. Formes urbaines et significations: revisiter la morphologie urbaine. *Espaces et sociétés*.

Nikolopoulou M., 2004. *Designing Open Spaces in the Urban Environment: a Bioclimatic Approach*.

Roussel, I., 2014. La qualité de l'air et ses enjeux. <http://irevues.inist.fr/pollution-atmospherique>.

Smith C., C.J.-M., 2012. ICUC8 – 8th International Conference on Urban Climates. In *Characterising mesoscale wind flow patterns in Manchester, UK*. UCD, Dublin Ireland.

Weber, N., Haase, D. & Franck, U., 2014. Assessing modelled outdoor traffic-induced noise and air pollution around urban structures using the concept of landscape metrics. *Landscape and Urban Planning*, 125, pp.105–116.

Winters, M. et al., 2013. Mapping bikeability: a spatial tool to support sustainable travel. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 40(5), pp.865–883.

Yuan, C., Ng, E. & Norford, L.K., 2014. Improving air quality in high-density cities by understanding the relationship between air pollutant dispersion and urban morphologies. *Building and Environment*, 71, pp.245–258.

Structuration des données pour la Co-Simulation Multi-Physique dans l'évaluation multi-métier des bâtiments

Galdric Sibiude*¹, Jean-Baptiste Videau¹, Benoît Delinchant², Abbass Raad², Samuel Carré¹, Simon Bailhache¹, Emmanuel Bozonnet³, Boris Brangeon³, Rémi Wrona⁴, Benjamin Haas¹

¹ Université Paris-Est, Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB), Saint-Martin-d'Hères, France

² G2ELab - Laboratoire de Génie ELectrique de Grenoble, Grenoble Université Alpes

³ Université de la Rochelle, Laboratoire des Sciences de l'Ingénieur pour l'Environnement (LASIE)

⁴ TRIBU ENERGIE

*galdric.sibiude@cstb.fr

RESUME. Le projet ANR COSIMPHI (CO-Simulation Multi-Physique Interactive - ANR-13-VBDU-0002) s'intéresse à la question de la modélisation multi-physique par la co-simulation pour concevoir des bâtiments en traitant simultanément les ambiances acoustique, visuelle et thermique ainsi que l'efficacité énergétique, environnementale et économique. Cette approche intégrée des différents métiers doit permettre de mettre en cohérence les outils en les rendant interopérables pour limiter les itérations actuellement nécessaires (utilisation séquentielle d'outils indépendants) lors de la modélisation d'un bâtiment. Ceci permet donc de concevoir et décider dans le cadre d'un métier tout en ne perdant pas de vue l'impact sur la performance globale du bâtiment. Les développements réalisés dans le projet aboutiront à un démonstrateur d'outil de co-simulation considérant les interactions entre métiers et lié à un système d'optimisation et d'aide à la décision. Ces travaux s'articulent autour de trois axes : Structuration de la donnée ; Co-simulation ; Aide à la décision et optimisation multicritères.

MOTS-CLÉS : co-simulation, multi-physique, conception de bâtiments.

ABSTRACT. The COSIMPHI project (Multi-Physic Co-simulation - funded by ANR - ANR-13-VBDU-0002) addresses the question of multi-physics modeling for building design, considering simultaneously acoustic, thermal and visual comfort as well as energy efficiency, environmental and economic performance. This integrated approach of various professional domains may lead to coherence between tools by making them interoperable. Interoperability will reduce essential iterations (sequential use of several tools) for building modeling. This perspective will help designing and deciding within the scope of one area of expertise without neglecting building global performance. The project development will lead to a co-simulation prototype considering interactions between domains and linked to an optimization and decision support system. This work revolves around three axes: data structuration; co-simulation; decision support and multicriteria optimization.

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

1. INTRODUCTION

La conception d'un bâtiment fait appel à de nombreuses compétences. En phase conception, on va s'intéresser entre autres aux confort des futurs occupants (acoustique, éclairage, thermique), aux performances (énergétiques, environnementales) du bâtiment et à son coût. Or, les outils de calculs proposés actuellement pour calculer des indicateurs relatifs à ces six thématiques ne traitent souvent que d'un seul métier. Les très faibles interactions des outils entre eux contraignent le(s) concepteur(s) à échanger les informations de manière itérative, ce qui est coûteux et ne garantit pas une cohérence scientifique.

Le projet ANR COSIMPHI (CO-Simulation Multi-Physique Interactive - ANR-13-VBDU-0002) s'intéresse à la question de la modélisation multi-physique par la co-simulation pour concevoir des bâtiments en traitant simultanément les ambiances acoustique, visuelle et thermique ainsi que l'efficacité énergétique, environnementale et économique. Cette approche intégrée des différents métiers doit permettre de mettre en cohérence les outils en les rendant interopérables pour limiter les itérations actuellement nécessaires (utilisation séquentielle d'outils indépendants) lors de la modélisation d'un bâtiment. Ceci permet donc de concevoir et décider dans le cadre d'un métier tout en ne perdant pas de vue l'impact sur la performance globale du bâtiment. Les développements réalisés dans le projet vont aboutir à un démonstrateur d'outil de co-simulation prenant en compte les interactions entre métiers et lié à un système d'optimisation et d'aide à la décision. Ces travaux s'articulent autour de trois axes :

- Structuration de la donnée ;
- Co-simulation ;
- Aide à la décision et optimisation multicritères.

Dans cet article nous présentons les résultats et avancées des deux premiers axes. La mise en cohérence des hypothèses des différents outils et l'inventaire des données spécifiques nous a permis d'aboutir à un jeu de données commun. La structuration de cette information pour la rendre opérationnelle constitue une avancée primordiale pour positionner ce jeu de données d'entrée commun comme un pivot vers les différents métiers et vers les bases de données associées.

Les développements réalisés ici sur la co-simulation ont pour but de réaliser un calcul multi-métier cohérent entre outils. Ce calcul doit prendre en compte les interactions entre métiers, pour obtenir un résultat qui permette de mettre en évidence les impacts croisés des prises de décision. Pour ce faire, un orchestrateur entre les différents outils projet (COMETH, PHANIE, ACOUBAT et ELODIE, outils du CSTB, ainsi qu'un calculateur des coûts de construction développé par le LASIE) a été développé. Il est nourri par le jeu de données commun.

La faisabilité de la démarche sera illustrée par un premier exemple de résultats sur un local d'enseignement. Ces résultats et développements méthodologiques ouvrent des perspectives sur l'optimisation multicritères et la mise en place de nouveaux outils d'aide à la décision dans le cadre d'une approche de conception intégrée pour le bâtiment.

2. CONTEXTE ACTUEL ET VEROUS A LEVER

Cette partie présente succinctement l'état initial de la pratique afin de souligner les verrous que le projet COSIMPHI cherche à soulever.

2.1. PRATIQUE ACTUELLE

Dans l'état actuel, 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 variés en lien avec ces outils 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. VEROUS A LEVER

Le projet COSIMPHI propose, sur la base du constat précédemment établi, de s'intéresser par la co-simulation et l'optimisation et aide à la décision multicritères aux verrous suivants :

- Centraliser les expertises pour améliorer la cohérence des différentes visions métiers ;
- Favoriser la conception intégrée pour tendre vers des solutions intéressantes selon un prisme multicritères.

3. METHODOLOGIE

3.1. PRINCIPE GENERAL

Le choix a été fait de structurer le travail autour de cas exemples, et de ne pas prétendre pouvoir résoudre le problème en toute généralité. En effet, la généralisation est en grande partie un sujet d'ingénierie logicielle plutôt que de recherche. A partir du jeu de données commun, chaque outil charge le même cas d'étude, dans son propre format. La co-simulation peut alors s'effectuer. Une fois les résultats de calcul obtenus pour tout ou partie des outils, les éléments sur lesquels nous souhaitons porter l'optimisation seront mis à disposition via le jeu de données commun. Nécessairement, l'éventail des possibles est restreint, mais il rend le problème soluble.

Ce bâtiment type est un local d'enseignement, décrit plus précisément dans les livrables du projet. Des hypothèses complémentaires pourront être posées par chaque métier si besoin.

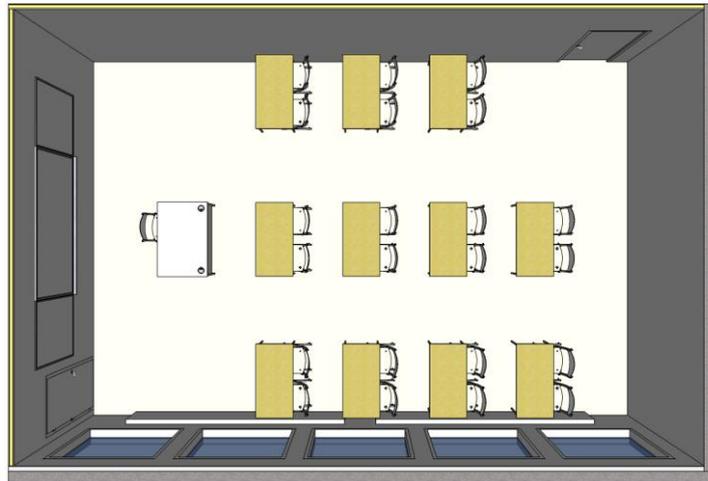


Figure 1 : le local type

Par définition, le fait de travailler sur un bâtiment type a l'avantage de pouvoir conduire à des résultats rapides mais ce travail ne peut, par définition, être considéré comme universel. Il convient donc dans cette étape du projet de poser les hypothèses simplificatrices choisies et de bien comprendre les limites de l'exercice.

3.2. STRUCTURATION DE LA DONNEE

COSIMPHI n'a pas pour objectif de créer un nouveau format de données parmi le paysage existant (formats d'échange DXF, IFC, GBXML, NBDM en France,...). Ces formats visent l'interopérabilité et ont tous une origine différente qui influence les structures de données. Sur ce sujet, COSIMPHI aborde la difficulté de représenter les différents métiers du projet dans un jeu de données cohérent, et propose une structuration. Cette structuration permettra d'accompagner le travail dans la conception de jeux de données neutres, ainsi que dans la conception des futurs e-catalogues produits.

Chaque métier représente des réalités identiques de manière différente. Tant que les éléments décrits sont différents, il n'y a pas de verrous majeurs. Mais lorsque les éléments sont identiques, le problème devient complexe. Prenons la géométrie. Les outils d'éclairage ne peuvent fonctionner qu'avec une représentation de la géométrie sous forme très détaillée (assemblages de polygones élémentaires), alors que la thermique ou l'acoustique nécessite plutôt une approche en réseaux (telle paroi liée à tel espace avec telle orientation). Cette différence n'est pas rédhibitoire si le point de départ du calcul est une maquette numérique, mais il n'existe pas, à l'heure actuelle, de solution de couplage entre la maquette numérique vers l'ensemble des métiers traités.

3.2.1. Données d'entrée

L'approche adoptée pour définir un jeu de données d'entrée utile à la co-simulation est de réaliser un recensement des données d'entrée nécessaires à chaque vue métier pour construire un jeu de données commun. Ces données sont structurées dans une nomenclature de description d'un projet de bâtiment commun aux cinq outils :

Catégories	Objets
Représentation de l'espace	Géométrie globale
	Maillage-zoning
	Représentation des jonctions
Environnement extérieur	Climat

	Environnement proche (masques, nuisances sonores, etc.)
Occupant	Scénario d'occupation
Bâti	Façade opaque multicouches
	Refends et cloisons intérieures
	Plancher bas multicouches (incluant les fondations)
	Plancher haut multicouches
	Baie vitrée
	Protection mobile et fixe
	Porte
Equipements	Chauffage
	Eclairage
	Ventilation
	Eau Chaude Sanitaire
	Production photovoltaïque

Tableau 1 : nomenclature de description d'un projet de bâtiment

Les paramètres de chaque objet du Tableau 1 sont regroupés en trois catégories :

- les paramètres géométriques qui regroupent les surfaces, les volumes, les longueurs,... Ils peuvent être récupérés à partir d'une description 3D du bâtiment, par exemple à partir de la maquette numérique ;
- les paramètres intrinsèques qui correspondent aux caractéristiques propres du composant (par exemple, la résistance thermique d'un isolant, la performance environnementale d'un matériau, les caractéristiques lumineuses d'un luminaire, les propriétés acoustiques d'un matériau,...). Ces paramètres peuvent être fournis par une base de données produit et sont indépendants de l'environnement dans lequel le composant est implanté ;
- les paramètres de mise en œuvre correspondent à l'intégration du composant dans le projet étudié (perméabilité à l'air, orientation et inclinaisons des parois, etc.).

Chaque catégorie de paramètres présente des caractéristiques qui lui sont propres et qui seront importantes dans la suite du projet lorsqu'on abordera les problématiques de cohérence des jeux de données d'entrée commun des outils, d'alimentation des jeux de données d'entrée à partir du BIM, de cohérence des modèles,...

La mise en commun de l'ensemble de ces données d'entrée aboutit au jeu de données commun multi-métier dans lequel chaque paramètre est utilisé par l'un des métiers *a minima*. Ce jeu de données commun est ensuite structuré dans un format JSON qui pourra être lu par les différents outils. Ce format JSON est défini de sorte à ce qu'il tienne compte au mieux des normes et nomenclatures pertinentes à l'international.

3.2.2. Base de données

Pour les besoins du projet, il est nécessaire de mettre en place une base de données cohérente regroupant les paramètres propres à chaque métier. Pour ce faire, le travail s'est orienté vers les solutions constructives et choix techniques les plus représentatifs du marché français pour le cas d'étude du local scolaire considéré.

Ces éléments de définition d'une base de données commune pour les différents métiers doivent avant tout souligner un manque actuel d'harmonisation de données existantes mais non centralisées. Les besoins d'une telle base seront mis en exergue par la formalisation du jeu de données commun et l'apparition de possibilité de couplage d'outils pour une conception intégrée des bâtiments.

3.3. CO-SIMULATION

Le travail sur la co-simulation a pour but d'effectivement réussir un calcul multi-métier (énergie-confort d'été, environnement, éclairage, acoustique, coût). Ce calcul multi-métier doit prendre en compte les interactions entre outils, pour obtenir un résultat cohérent qui permette de mettre en évidence les impacts croisés des prises de décision et limiter les itérations séquentielles indispensables jusqu'alors pour les considérer.

3.3.1. Caractérisation des outils

La première étape des travaux sur la co-simulation consiste à caractériser les outils indépendamment selon la grille suivante :

Catégories	Caractéristiques
Systémique	Finesse spatiale du modèle
	Echelle temporelle
	Domaine de validité du pas de temps
	Linéarité
	Visibilité des équations ou algorithmes
Séquencement de calculs	
Possibilités de couplage	Pilotage par un outil externe
	Couplage dynamique

Tableau 2 : grille d'analyse des outils métier existants

Le Tableau 2 présente la grille d'analyse utilisée. Certains outils peuvent ne pas être concernés par des caractéristiques présentées. Le point fort de ce travail réside sur la compréhension des moteurs de calcul propres à chaque métier et en l'identification des possibilités de couplage existantes. Cela permet d'aboutir aux informations sur les comportements mathématiques et informatiques des divers outils en vue de les faire communiquer. Pour la mise en œuvre de la co-simulation, une caractéristique fondamentale des outils correspond à leur nature temporelle. Les outils peuvent être dynamiques, quasi-statiques, ou indépendants du temps. Par exemple, le moteur de calcul COMETH (simulation énergétique dynamique) réalise une simulation dynamique (avec variables d'état) au pas de temps d'une heure. Le moteur de calcul PHANIE (éclairage) réalise une simulation quasi-statique (sans variable d'état) et nous en faisons une utilisation au pas de temps 15 minutes. Le moteur de calcul ELODIE (impacts environnementaux), n'a pas de couplage temporel avec les autres solveurs, et intervient en post-traitement, comme pour le calcul des coûts.

3.3.2. Utilisation d'un orchestrateur

La solution technique adoptée pour la co-simulation repose sur le développement d'un orchestrateur. Celui-ci pourra, sur la base des éléments identifiés dans la première étape de ces travaux, automatiser et « orchestrer » l'appel des outils selon une séquence cohérente. Pour cela, les briques logicielles de chaque métier sont livrées sous forme de Webservice.

Deux types d'algorithme d'orchestration ont été étudiés pour un couplage dynamique (Abbaas et al. 2015) :

- Le chaînage classique (Ping Pong). (figure 2, gauche)
- La méthode de relaxation des formes d'onde (figure 2, droite)

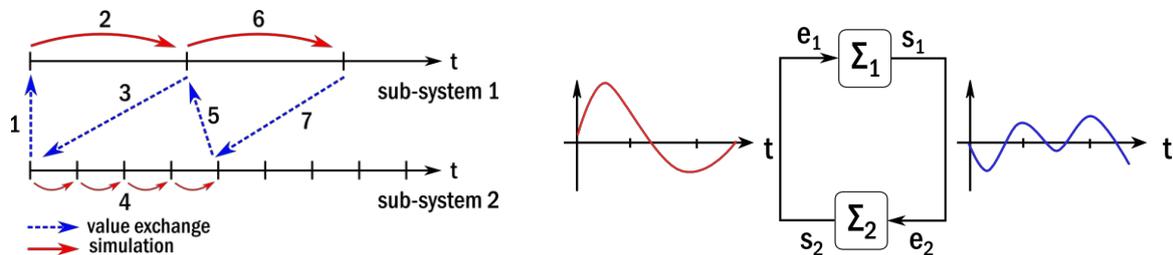


Figure 2 : (gauche) couplage faible par chaînage (Ping Pong)
(droite) couplage par relaxation des formes d'onde (WRM : Waveform Relaxation Method)

La première solution réalise un faible couplage entre deux sous-systèmes. L'entrée d'un modèle à un instant donné est la sortie d'un autre modèle à l'instant précédent. Elle s'avère particulièrement aisée à mettre en place mais nécessite une interaction de chaque outil à tous les pas de temps. Elle est donc particulièrement adaptée pour le couplage de solveurs avec les mêmes pas de temps, ce qui n'est pas le cas des outils considérés. La seconde solution permet un couplage simplement sans modification des codes de calcul puisqu'elle s'appuie sur la solution temporelle de chaque outil. Chaque système est résolu dans le temps tout au long du domaine temporel considéré, et sa solution (l'ensemble du signal) est utilisée comme une entrée pour d'autres systèmes, jusqu'à convergence. Les résultats obtenus sont très intéressants, en particulier, cette stratégie limite grandement le nombre d'interactions entre les outils ce qui a pour conséquence de réduire grandement les temps de calcul global dans un environnement de couplage par web services. Par contre, nous avons constaté une convergence très lente lorsqu'un mécanisme de régulation fait partie des outils couplés.

3.3.3. Mise en œuvre sur le cas test

Afin de tester notre méthodologie de co-simulation, nous allons réaliser une stratégie de régulation globale basée sur l'ouverture et l'occultation des fenêtres (figure 3). L'ouverture impactant sur le confort thermique et acoustique, tandis que l'occultation agira sur le confort visuel (éclairage) et le confort thermique (apport solaires).

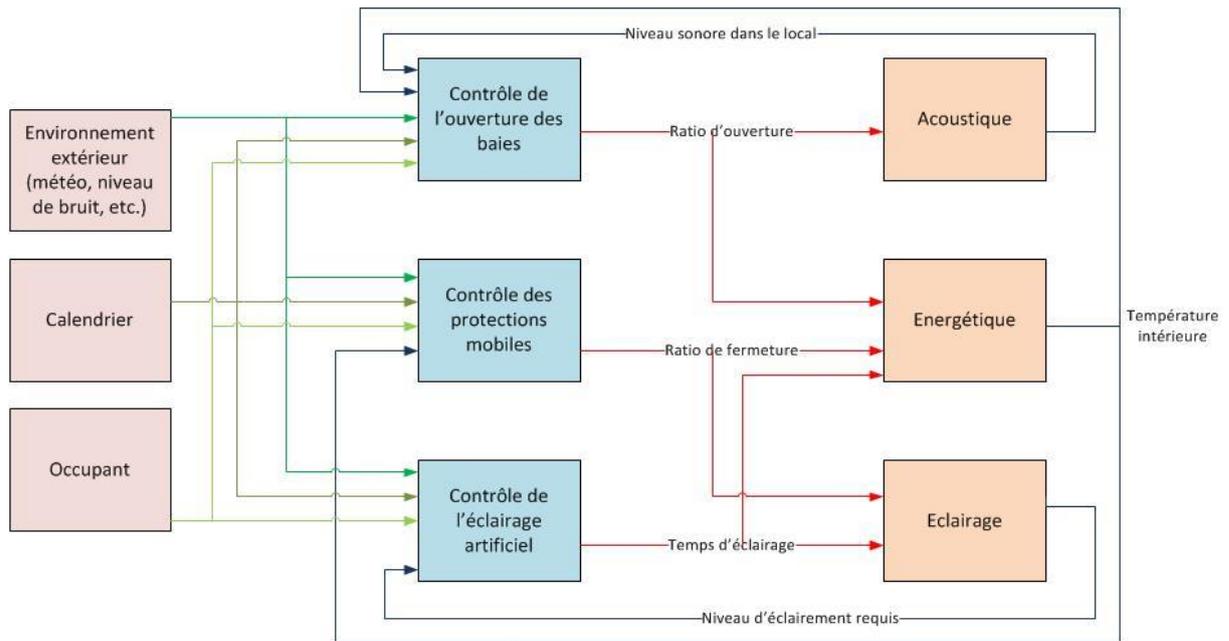


Figure 3 : couplage des confort thermique, acoustique, visuel (rouge : entrées ; bleu : modules communs ; orange : moteurs métiers / les connexions entre entrées et moteurs métiers ne sont pas représentées)

4. CONCLUSION

Cet article se focalise sur la présentation du principe de la démarche adoptée pour aboutir à une solution de co-simulation. Les premiers résultats obtenus via cette co-simulation sont en cours d'élaboration. Des résultats préliminaires concernant uniquement l'énergie et le coût ont été obtenus (Brangeon et al. 2015, Chardon et al. 2015), et plus généralement le projet s'attache aussi au traitement des données de sortie, au lien avec l'outil d'aide à la décision et l'optimisation multicritères.

La première version du jeu de données commun cherche à prouver la faisabilité et l'intérêt d'une telle approche pour le couplage multi-métier au travers d'un cas d'étude et en considérant certaines hypothèses simplificatrices. Les prochains travaux devront consister en l'élargissement et la généralisation de la démarche pour traiter une diversité de bâtiments.

Parmi les nombreuses perspectives d'amélioration de l'approche, l'opérationnalité de la chaîne logicielle avec une maquette numérique de bâtiment au format IFC est envisagée pour centraliser l'information et générer le jeu de données commun.

5. BIBLIOGRAPHIE

- Brangeon, Boris et al. 2015. « Présentation d'un outil d'aide à la conception utilisant les IFC et les bases de données coûts ». *Congrès du Bâtiment Durable*, La Rochelle.
- Chardon, Serge et al. 2015. « A multi objective design tool for the french detached house market: Cost and energy performance optimization ». *14th International Conference of the International Building Performance Simulation Association*, Hyderabad - India.
- Raad, Abbas et al. 2015. « Energy building co-simulation based on the WRM algorithm for efficient simulation over FMU components of Web Service ». *14th International Conference of the International Building Performance Simulation Association*, Hyderabad - India.