



**HAL**  
open science

## **Incertitude de simulation à l'échelle du quartier : comparaison de deux modèles et analyse de sensibilité**

Loïc Frayssinet, Thomas Berthou, Bruno Duplessis, Jean-Philippe Tavella,  
Frédéric Kuznik, Jean-Luc Hubert, Jean-Jacques Roux

► **To cite this version:**

Loïc Frayssinet, Thomas Berthou, Bruno Duplessis, Jean-Philippe Tavella, Frédéric Kuznik, et al.. Incertitude de simulation à l'échelle du quartier : comparaison de deux modèles et analyse de sensibilité. Conférence IBPSA France, 2018, Bordeaux, France. hal-01842414

**HAL Id: hal-01842414**

**<https://hal.science/hal-01842414>**

Submitted on 18 Jul 2018

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

## **Incertitude de simulation à l'échelle du quartier : comparaison de deux modèles et analyse de sensibilité**

**Loïc Frayssinet\*<sup>1,5</sup>, Thomas Berthou<sup>2</sup>, Bruno Duplessis<sup>2</sup>, Jean-Philippe Tavella<sup>3</sup>, Frédéric Kuznik<sup>1,5</sup>, Jean-Luc Hubert<sup>4,5</sup>, Jean-Jacques Roux<sup>1,5</sup>**

<sup>1</sup> Univ Lyon CNRS, INSA-Lyon, Université Claude Bernard Lyon 1, CETHIL UMR 5008, F-69621, Villeurbanne, France

<sup>2</sup> MINES ParisTech, PSL Research University, CES – Centre Efficacité énergétique des Systèmes, 60 Bd St Michel, 75006 Paris, France

<sup>3</sup> EDF Lab Paris Saclay – Département MIRE, 91120 Palaiseau, France  
RISEGrid – Institut commun EDF – CentraleSupélec

<sup>4</sup> EDF R&D – Département TREE, Avenue des renardières – Ecuelles, 77250 Moret sur Loing et Orvanne, France

<sup>5</sup> BHEE – Laboratoire commun CETHIL – EDF R&D

\*[loic.frayssinet@insa-lyon.fr](mailto:loic.frayssinet@insa-lyon.fr)

---

*RESUME. La modélisation de la demande énergétique des bâtiments à l'échelle de la ville permet d'évaluer les stratégies de maîtrise des consommations énergétiques. A cette échelle, le manque de données détaillées et le coût numérique nécessitent de faire des hypothèses et de simplifier les modèles, ce qui rend la modélisation incertaine. Cependant l'impact des choix de modélisation sur la courbe de charge n'est pratiquement jamais analysé. De telles analyses sont menées en confrontant deux outils de modélisation et en étudiant spécifiquement l'impact de certaines simplifications courantes. Il est ainsi mis en évidence que la prise en compte des espaces non chauffés est cruciale pour une bonne modélisation des surfaces déperditives et que les simplifications courantes ont relativement peu d'impact sur le besoin annuel mais qu'elles peuvent causer des déformations de la courbe de charge localement importante.*

*MOTS-CLÉS : modélisation énergétique quartier bottom-up, analyse de sensibilité, courbe de charge.*

---

*ABSTRACT. Building energy models at city scale aim to evaluate energy management strategies. At this scale, the lack of detailed data and the computational cost imply to make some assumptions and to simplify the models, leading to uncertain modelling. However, the impact of the modelling choices on the load curve are nearly never analysed. Such analysis are carried on based on tools comparison and on some usual simplifications studies. It is highlighted that it is crucial to model un-heated spaces for a good estimation of the heat loss area, and that the impact of the usual simplifications on the annual energy needs is low but can be locally high for the load curve.*

*KEYWORDS: bottom-up district energy model, sensitivity analysis, power curve.*

---

### **1. INTRODUCTION**

Le secteur du bâtiment est identifié, à l'échelle européenne et nationale, comme un secteur clé dans le cadre de la transition énergétique. En effet, il recèle un important potentiel de réduction des consommations énergétiques et des émissions de gaz à effet de serre (rénovation, intégration d'énergies renouvelables, etc.). Ce potentiel est d'autant plus intéressant que, globalement, ce secteur est

responsable d'une part majeure de ces consommations et émissions. L'échelle du quartier revêt un intérêt particulier en offrant la possibilité de mutualiser les systèmes énergétiques (réseaux de chaleur, unités de production, etc.) et de réduire leur capacité globale grâce au foisonnement. Des outils de simulations dédiés, tels que EnviBatE (Gros, Bozonnet, et Inard 2014), DIMOSIM (Riederer et al. 2015) et SMART-E (Berthou et al. 2015), ont été développés afin d'évaluer les stratégies de maîtrise des consommations énergétiques, telle que la gestion dynamique de la courbe de charge (effacement, déplacement, etc.) ou la modification de caractéristiques des bâtiments ou des systèmes énergétiques (rénovation). Toutefois, bien que ces outils ambitionnent de représenter des courbes de charges, pour la plupart, ils ont seulement été validés par rapport à la consommation annuelle (Perez et al. 2015), la plupart du temps en raison de l'absence de données et de mesures adéquates sur site. On est alors en mesure de se questionner sur l'influence des choix de modélisation, sur la courbe de charge simulée, d'autant que les simplifications sont nombreuses pour réduire les temps de calcul d'une part et pour faire face au manque de données d'autre part. Afin d'illustrer les incertitudes globales liées au paramétrage et à la forme des modèles, une première étape d'inter-comparaison de modélisations d'un quartier réel est réalisée « à l'aveugle » à l'aide de deux outils de simulation énergétique de quartier (MoDEM et Smart-E) et par deux laboratoires différents sans concertation préalable concernant le paramétrage. Dans un second temps, une analyse de sensibilité des modèles thermiques est réalisée afin d'isoler les incertitudes liées uniquement aux hypothèses de simplification des modèles thermiques.

## 2. OUTILS UTILISES

L'influence des choix de modélisation est mise en évidence par une inter-comparaison entre deux outils de simulation énergétique de quartiers, Smart-E et MoDEM, et par l'utilisation d'une spécificité de ce dernier, à savoir, la possibilité de faire varier le niveau de modélisation. Ces outils sont présentés ci-dessous.

### 2.1. SMART-E

Smart-E (Berthou et al. 2015) est une plateforme de simulation qui permet de représenter l'ensemble des consommations d'énergie liées aux logements à l'échelle du quartier jusqu'à l'échelle de la région. Elle s'appuie sur des modèles physiques et statistiques *bottom-up* qui peuvent être paramétrés automatiquement à partir des grandes bases de données qui décrivent le territoire français (recensement de la population, données des systèmes d'informations géographiques (SIG), etc.). Les besoins de chauffage sont calculés à partir de modèles RC bi-zones pour chaque logement. Les scénarios d'usages et les gains internes sont issus d'un modèle de comportement qui s'adapte aux spécificités des occupants : activité, âge, statut d'occupation. La géométrie des bâtiments est représentée très simplement par des parallélépipèdes orientés de manière probabiliste, les SIG n'étant utilisés à ce jour que pour le calcul des masques solaires proches liés aux bâtiments environnants.

### 2.2. MoDEM

MoDEM (pour *Modular District Energy Model*) est une suite d'outils développée au sein du laboratoire commun « Bâtiment à Haute Efficacité Énergétique » (BHEE, 2018) afin de quantifier l'impact des choix de modélisation sur les besoins en chauffage et climatisation, pour des périodes d'échantillonnage allant de l'heure à l'année, et de l'échelle du bâtiment à celle du quartier. Il permet de générer automatiquement des modèles énergétiques de quartier *bottom-up* à partir de données géométriques issues de systèmes d'informations géographiques (SIG), suivant différents choix de

modélisation, et de les simuler. Il s'agit de *micro-simulation*, dans le sens où chaque bâtiment du quartier est modélisé de façon explicite avec des modèles de type boîte-blanche.

L'ensemble de la chaîne d'outil est orchestré avec Python. Les modèles de bâtiments sont construits à partir de la bibliothèque Modelica BuildSysPro, développée par EDF R&D (Schumann et al. 2016). A l'échelle du quartier, étant donné le nombre de bâtiments considérés, le nombre de variantes de modélisation testées et afin de réduire les temps de calcul, les simulations des modèles de bâtiments sont distribuées à l'aide de l'outil DACCOSIM (Galtier et al. 2015), basé sur le standard FMI et développé par l'institut RISEGrid (EDF – CentraleSupélec)<sup>1</sup>.

### 3. COMPARAISON INTER-MODELES

#### 3.1. CAS D'ETUDE

Un quartier d'immeubles collectifs parisien d'environ 900 logements construits dans les années 1930 a été choisi pour l'inter-comparaison. Ce quartier a été sélectionné car son architecture est homogène (année de construction, matériaux utilisés, hauteur sous plafond,...) ce qui permet de réduire l'effort de modélisation, de plus il présente une certaine complexité dans les formes des bâtiments (notamment les vis-à-vis), ce qui permet de questionner la nécessité d'une représentation complexe de la forme des bâtiments lors d'une simulation à l'échelle quartier. La figure 1a présente une vue aérienne du quartier modélisé issue de la base de données BD TOPO de l'Institut National de l'information géographique et forestière (IGN).

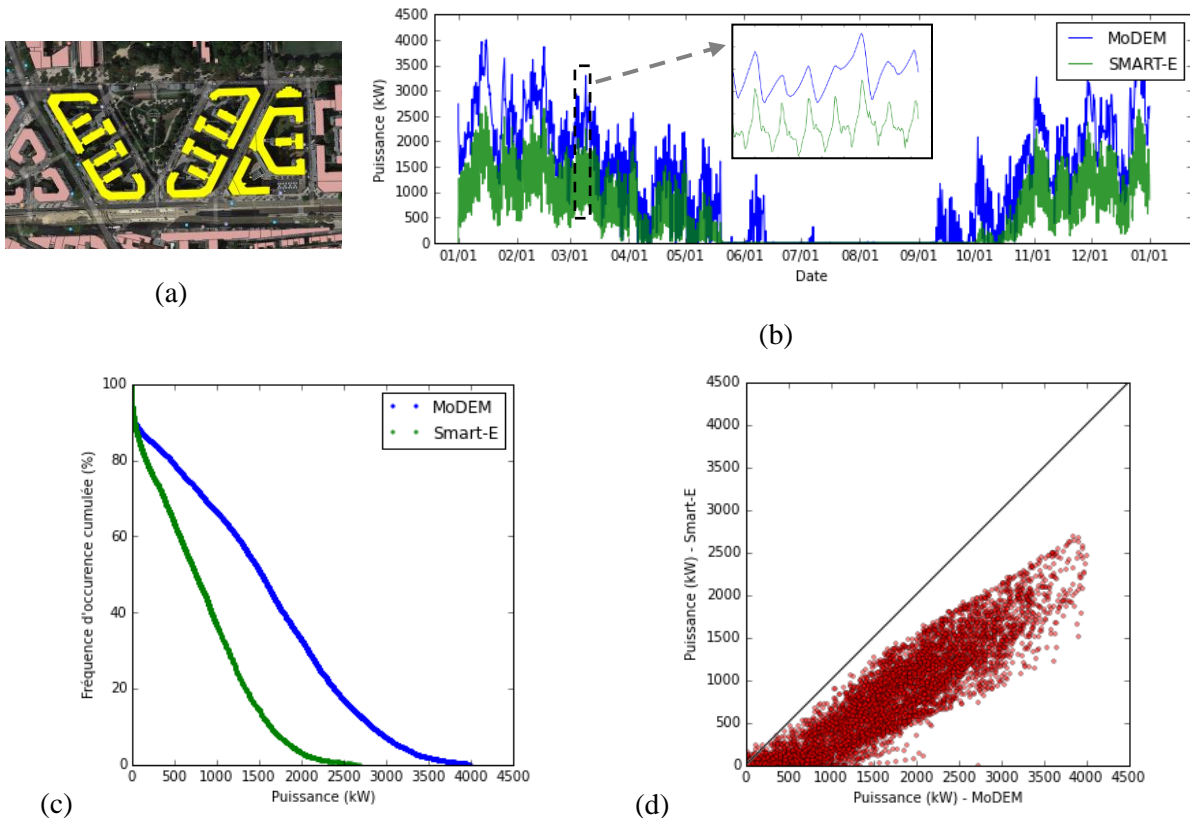


Figure 1 : (a) vue aérienne du quartier modélisé (en jaune) et des masques proches (en rose) et comparaison temporelle (b), en cumulé (c) et point par point (d) des courbes de charge.

<sup>1</sup> Disponible à l'adresse suivante : <https://sourcesup.renater.fr/daccosim>

### 3.2. RESULTATS DE LA SIMULATION A L'AVEUGLE

La sortie des modèles analysée est le besoin total de chauffage de l'ensemble des bâtiments à l'échelle du quartier (les systèmes énergétiques ne sont pas modélisés). En termes de besoin annuel sur la période de chauffage, un écart important est observé entre les deux outils de modélisation : le besoin calculé par MoDEM (8220 MWh) est presque 2 fois plus important que celui calculé par SMART-E (4414 MWh). Concernant les courbes de charge (figure 2b), leurs variations temporelles sont globalement cohérentes, mais on retrouve approximativement le même écart sur les appels de puissance calculés heure par heure. L'écart entre les deux approches n'est pas constant, des variations plus rapides sont présentes dans Smart-E, ce qui entraîne une certaine dispersion dans la comparaison point par point (figure 2c).

Les écarts étant relativement importants, la partie suivante cherche à en déterminer les raisons, en confrontant les choix de modélisation faits dans chacun des outils.

## 4. INFLUENCE DES CHOIX DE MODELISATION SUR LA COURBE DE CHARGE

### 4.1. INCERTITUDES LIEES AUX OUTILS DE SIMULATION

Le paramétrage des outils est détaillé dans le tableau 1. Précisons que le fichier météo utilisé dans les deux simulations est identique (Paris Montsouris, METEONORM).

On observe d'importantes disparités concernant les surfaces prises en compte, les surfaces déperditives dans MoDEM sont 1,4 fois plus grandes que celles utilisées dans Smart-E. Ces écarts s'expliquent principalement par la prise en compte des formes complexes issues directement du SIG dans MoDEM alors que Smart-E utilise une représentation simplifiée des formes urbaines selon une approche statistique. De plus, les espaces non-chauffés ne sont pas pris en compte dans MoDEM contrairement à SMART-E, ce qui réduit de fait les surfaces déperditives de ce dernier. Il serait possible d'ajouter des zones non-chauffées dans le modèle MoDEM, de façon forfaitaire étant donné que ces données ne sont pas présentes dans le SIG, mais le positionnement de ces zones aurait une forte influence sur la puissance comme l'indique l'étude de l'influence du zonage réalisée par Frayssinet et al. (2017). La modélisation des espaces non-chauffés est donc essentielle pour fiabiliser les résultats, aussi bien pour les besoins annuels qu'instantanés.

Les propriétés thermiques estimées par les deux outils sont relativement proches. En combinant ces écarts avec ceux sur les surfaces, on obtient donc un ratio semblable (1,4) entre les coefficients de déperdition thermique des parois. Enfin, en ajoutant le renouvellement d'air, les déperditions statiques liées au modèle MoDEM sont surestimées d'un facteur 1,5 par rapport à Smart-E. L'écart restant s'explique certainement par les apports internes (flux solaires transmis compris) 2 fois plus importants dans Smart-E (hypothèses différentes et non prise en compte des ombres d'un bâtiment sur lui-même). Notons par ailleurs que ramenées à la surface habitée, les estimations de consommations annuelles sont plutôt proches. L'écart entre les deux outils s'explique donc bien plus par la modélisation des espaces non-chauffés que par les différences de paramétrage (ceux-ci étant par ailleurs relativement proches).

### 4.2. INCERTITUDES LIEES AUX MODELES THERMIQUES

Les modèles thermiques de bâtiment utilisés à l'échelle du quartier reposent souvent sur certaines simplifications, bien souvent implicites, concernant, entre autres, la modélisation de la conduction et de l'inertie (modèles RC notamment), ainsi que la méthode de prise en compte des sollicitations météorologiques extérieures.

Hypothèse de modélisation (valeurs moyennes à l'échelle du quartier)	MoDEM	Smart-E
Modélisation des échanges thermiques entre zones	Bâtiments mono-zones, échanges entre parois mitoyennes	2 zones par logement, pas d'échange thermique entre logements
Orientation des parois	Orientation réelle	Distribution probabiliste
Température de consigne (°C)	19	19,6 (+ un réduit de nuit)
Surface habitable (m <sup>2</sup> )	77 514 déduite de la volumétrie	47 432 (hors espaces communs) déduite du nombre de logements
Surface non chauffée (%)	0	7
Surface déperditive verticale (m <sup>2</sup> )	50 657	36 960
Surface vitrée (%)	18	19
Surface de toit (m <sup>2</sup> )	10 734	9 647
U des vitres (W/(m <sup>2</sup> .K))	2,8	3,1
U des murs verticaux (W/(m <sup>2</sup> .K))	1,7	1,82
U des toits (W/(m <sup>2</sup> .K))	3,2	1,6
Coeff. de déperdition global (W/K)	145 376	102 872
Taux de renouvellement d'air (vol/h)	0,5	0,45
Volume chauffé (m <sup>3</sup> )	208 326	131 945
Gains internes (kWh/(m <sup>2</sup> .an)*)	36,8	71,8
Gains solaires (kWh/(m <sup>2</sup> .an)*)	14,4	32,4
Besoin de chauffage annuel (MWh/an)	8 220	4 414
Besoins unitaires de chauffage (kWh/(m <sup>2</sup> .an)*)	106	93

\* par rapport à la surface habitable

*Tableau 1 : Comparaison du paramétrage des outils de simulation.*

Les effets sur la courbe de charges de certains choix de modélisation ont été analysés grâce à l'outil MoDEM en confrontant les résultats obtenus en faisant varier une à une les hypothèses de modélisation autour du modèle de référence utilisé précédemment (tableau 2). Les espaces non chauffés n'ont pas été ajoutés, car on s'intéresse à l'impact relatif des simplifications du modèle d'enveloppe sur les besoins.

L'analyse de l'impact d'une variation de modélisation sur la courbe de charge a été analysée à l'aide des indicateurs suivant : la différence moyenne (*Mean*), la déviation moyenne (*R. Mean*), l'écart-type (*Std.*) et les différences extrémales entre les deux courbes de charge (*Min. & Max.*). Un dernier indicateur (*Δfcum*) quantifie l'écart entre les niveaux de puissance pour lesquels 20% des occurrences de

puissances sont supérieures (en se basant sur les courbes cumulées de puissance, cf. figure 1c). Les différences sont calculées de la façon suivante : modèle modifié – modèle de référence.

	Hypothèses analysées	Référence	Modification
<i>Cond</i>	Résolution du maillage des parois pour le problème conductif <sup>2</sup>	Résolution détaillée	Résolution grossière
<i>IntInertia</i>	Prise en compte d'inertie interne	Inertie forfaitaire	Pas d'inertie
<i>TrDistrib</i>	Distribution des apports solaires transmis par les vitrages	Absorbés par le plancher	Absorbés par toutes les parois internes au prorata de leur surface
<i>TConvi</i>	Modélisation de la température interne pour les échanges sensibles globaux	Température d'air	Température opérative
<i>Conv</i>	Modélisation des échanges convectifs externes	Coefficient d'échange convectif constant	Dépendant du vent
<i>Rad</i>	Modélisation des échanges radiatifs externes	Modèle linéarisé	Modèle en température à la puissance 4 (loi de Stephan-Boltzmann).

Tableau 2 : Modification des hypothèses de modélisation.

Ces indicateurs permettent d'avoir un large spectre d'analyse, à la fois temporel, depuis l'effet sur les besoins annuels (*Mean*) jusqu'à l'effet instantané (*Min.* & *Max.*), et relatif à différents objectifs de simulations (identification des cibles à rénover, dimensionnement des systèmes énergétiques, gestion dynamique de la courbe de charge, etc.). Pour faciliter les comparaisons et avoir un ordre de grandeur, des valeurs relatives des indicateurs ont été retenues : la référence correspond à la puissance moyenne (calculée uniquement sur la période de chauffage).

On observe (figure 2) que les effets des hypothèses de modélisation sur la demande annuelle sont faibles (inférieures à 10%, excepté pour *TConvi* environ égal à 20%), alors qu'ils peuvent être très importants à certains instants (jusqu'à 60%), notamment pour la modélisation du coefficient convectif interne et externe, ainsi que pour l'inertie interne. On met ainsi en évidence que bien que les simplifications couramment utilisées se justifient pour le calcul des besoins annuels, leur impact n'est généralement pas négligeable sur les appels de puissance. Notamment, les simplifications de la conduction dans l'enveloppe, souvent utilisées à l'échelle du quartier, peuvent causer des écarts ponctuels de 25%.

#### 4.3. INCERTITUDES LIEES AUX INTERACTIONS

A l'échelle du quartier, plusieurs interactions entre les bâtiments sont à prendre en considération. Les couplages indirects liés au micro-climat ne sont pas pris en compte ici. La même méthodologie que précédemment est utilisée (figure 3) pour les modifications détaillées dans le tableau 3.

<sup>2</sup> La méthode utilisée est détaillée dans (Frayssinet et al. 2017).

Intéactions analysées		Référence	Modification
<i>Solar</i>	Flux solaires	Masquage et inter-réflexions	Directement issus du fichier météo
<i>RadCoupling</i>	Echanges radiatifs entre bâtiments	Modélisé	Non modélisé : température radiative de l'environnement urbain égale à la température d'air extérieur
<i>Adiab</i>	Murs mitoyens	Continuité thermique	Adiabatiques

Tableau 3 : Modification de la modélisations des interactions.

On observe qu'ignorer les masques solaires et les réflexions conduit à une diminution notable des besoins annuels (10%) et instantanés (jusqu'à 40%), due à une surestimation des apports solaires, sans que cela n'influe notablement sur la courbe de charge cumulée.

L'approximation de la température de surface des bâtiments voisins ne cause qu'une légère surestimation de la courbe de charge (< 5%, dû à des déperditions radiatives légèrement plus importantes, étant données que l'air est généralement plus froid que les parois). Le découplage des bâtiments mitoyens ne conduit à aucune différence notable (notamment parce que les températures de consigne sont identiques dans les bâtiments et donc que les écarts surviennent uniquement hors période de chauffe, sur des parois mitoyennes relativement peu nombreuses).

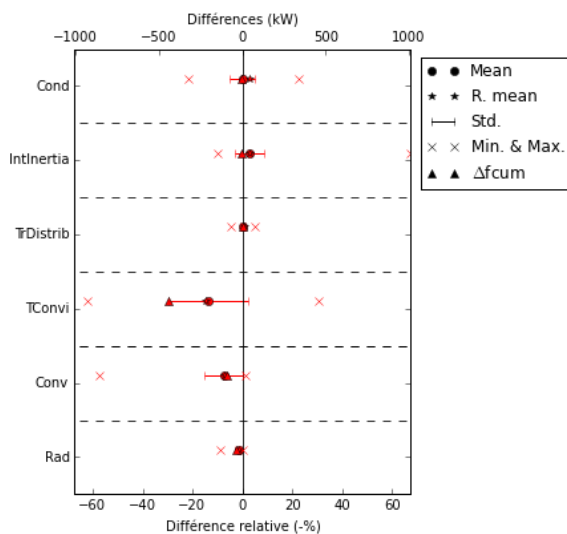


Figure 2 : Effets des hypothèses de modélisation.

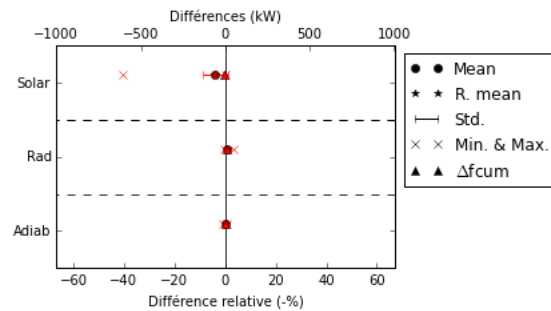


Figure 3 : Effets des interactions.

## 5. BILAN ET DISCUSSION

Les conclusions résultantes de cette étude sont évidemment relatives au cas d'étude retenu, et ne peuvent être généralisées. Dans notre cas, on observe que les couplages thermiques entre les modèles de bâtiments sont faibles, et donc que les simulations de ces derniers semblent pouvoir être réalisées de façon indépendante (le calcul des flux solaires étant un prétraitement), ce qui faciliterait leur



parallélisation et permettrait de diminuer fortement le temps de calcul ou d'augmenter le niveau de détail des modèles. La parallélisation se justifie donc pleinement à l'échelle du quartier.

Ensuite, il a été mis en évidence que les hypothèses de modélisation classiquement utilisées pour les modèles de bâtiment sont bien valables lorsque l'on s'intéresse aux besoins annuels, mais peuvent causer des déviations importantes localement sur la courbe de charge. Pour réduire ces dernières, et fiabiliser les modèles vis-à-vis de la courbe de charge, il est nécessaire d'obtenir des informations sur la structure intérieure du bâtiment (découpage, position des murs intérieurs, etc.), afin de pouvoir affiner les modèles (inertie interne, distribution du flux solaire transmis, échanges radiatifs internes, etc.). La comparaison inter-modèles a illustré ce point en montrant que l'estimation des besoins annuels peut facilement converger, moyennant la prise en compte d'une géométrie semblable. Ceci est moins évident pour le calcul de la courbe de charge qui est plus sensible aux simplifications.

La méthode de modélisation des surfaces extérieures du bâtiment est donc cruciale, mais elle n'est pas évidente a priori : la connaissance de l'enveloppe extérieure ne suffit pas et doit aussi être complétée par des informations concernant le découpage interne (espaces non chauffés notamment) afin d'obtenir des résultats fiables. Cette problématique amène aussi à la question suivante : peut-on s'affranchir de la géométrie réelle détaillée au profit d'une géométrie moyenne représentative en profitant de l'échelle agrégée du quartier ? La surface globale importe pour les déperditions, tandis que l'orientation influe sur les phénomènes liés aux apports solaires. Dans quelles mesures ces derniers peuvent-ils être globalisés ? Ces questions feront l'objet de prochains travaux.

## 6. BIBLIOGRAPHIE

- Berthou, Thomas, Bruno Duplessis, Philippe Rivière, Pascal Stabat, Damien Casetta, et Dominique Marchio. 2015. « Smart-E: A Tool for Energy Demand Simulation and Optimization at the City Scale ». In *14th International Conference of IBPSA*. Hyderabad, India.
- BHEE, [http://cethyl.insa-lyon.fr/uploads/Docs\\_PDF/plaquettecethyl-LaboCommun.pdf](http://cethyl.insa-lyon.fr/uploads/Docs_PDF/plaquettecethyl-LaboCommun.pdf), consulté en 2018.
- Frayssinet, Loïc, Frédéric Kuznik, Jean-Luc Hubert, Maya Milliez, et Jean-Jacques Roux. 2017. « Adaptation of building envelope models for energy simulation at district scale ». *Energy Procedia* 122: 307–312.
- Galtier, Virginie, Stephane Vialle, Cherifa Dad, Jean-Philippe Tavella, Jean-Philippe Lam-Yee-Mui, et Gilles Plessis. 2015. « FMI-based distributed multi-simulation with DACCOSIM ». In *Proceedings of the Symposium on Theory of Modeling & Simulation: DEVS Integrative M&S Symposium*, 39–46. Society for Computer Simulation International.
- Gros, Adrien, Emmanuel Bozonnet, et Christian Inard. 2014. « Cool Materials Impact at District Scale—Coupling Building Energy and Microclimate Models ». *Sustainable Cities and Society* 13 (octobre): 254–66. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2014.02.002>.
- Perez, Nicolas, Peter Riederer, Christian Inard, et Vincent Partenay. 2015. « Thermal Building Modeling Adapted to District Energy Simulation ». In *14th International Conference of IBPSA*. Hyderabad, India.
- Riederer, Peter, Vincent Partenay, Nicolas Perez, Christophe Nocito, Romain Trigance, et Thierry Guiot. 2015. « Development of A simulation Platform For The Evaluation Of District Energy System Performance ». In *14th International Conference of IBPSA*, 2499–2506. Hyderabad, India.
- Schumann, Mathieu, Benoit Charrier, Gilles Plessis, et Bénédicte Wall-Ribot. 2016. « BuildSysPro : une bibliothèque Modelica open-source pour l'énergétique des bâtiments et des quartiers ». In *Conférence IBPSA France*. Marne-la-Vallée.