



HAL
open science

Modélisation à l'échelle de la ville de la demande énergétique de chauffage et de refroidissement des bâtiments

Loïc Frayssinet, Frédéric Kuznik, Jean-Luc Hubert, Maya Milliez, Jean-Jacques Roux

► **To cite this version:**

Loïc Frayssinet, Frédéric Kuznik, Jean-Luc Hubert, Maya Milliez, Jean-Jacques Roux. Modélisation à l'échelle de la ville de la demande énergétique de chauffage et de refroidissement des bâtiments. Conférence IBPSA France, 2016, Marne la Vallée, France. ⟨hal-01842251⟩

HAL Id: hal-01842251

<https://hal.science/hal-01842251v1>

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.



HAL Authorization

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.

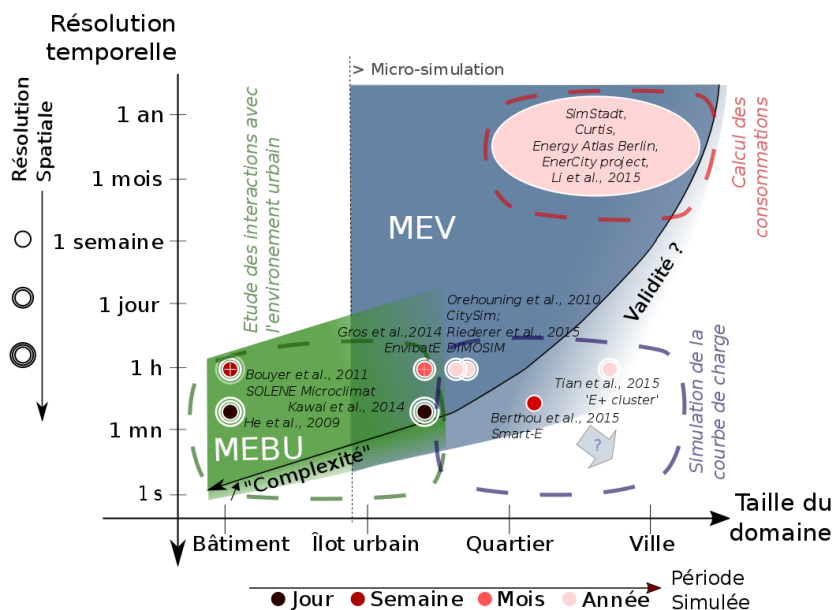


FIGURE 1. Domaines d'utilisation des différentes modélisations des bâtiments en milieu urbain.

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.

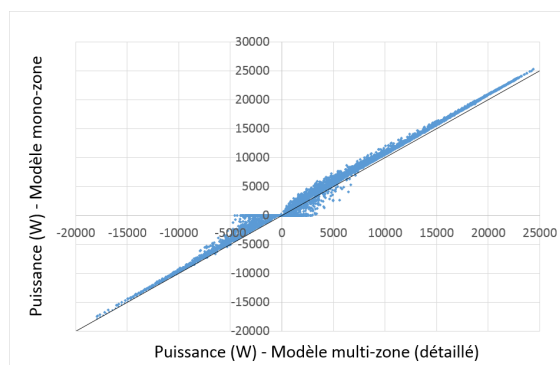


FIGURE 2. Comparaison des modèles

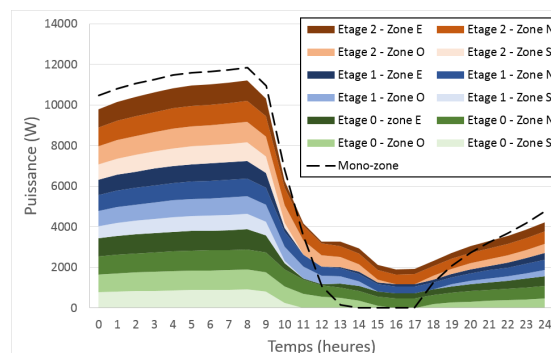


FIGURE 3. Détail des consommations

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.