

Modélisation d'un réseau énergétique par une co-simulation EnergyPlus / Dymola

Marin Pagès¹, Adrien Brun¹, Audrey Wantier¹, Roland Bavière², Jean-Philippe Saut³, John Redford³, Christophe Baroux⁴

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

²CEA, LITEN, DTBH, INES, F-38000 Grenoble, France

³Eurobios, F-94235 Cachan, France

⁴DPS, F-78170 La Celle Saint-Cloud, France

*adresse.electronique@ibpsa.fr

RESUME. La modélisation du micro-grid de l'Ines s'inscrit dans le cadre du projet FUI ModeliScale. Composé d'instituts de recherche (INRIA, EDF, CEA), d'industriels (DS, ENGIE) et de petites entreprises (Eurobios, DPS, Phimeca), le consortium a pour objectif de lever des verrous technologiques pour la modélisation à grande échelle. Cet article compare plusieurs approches de modélisation et fournit un premier niveau d'analyse qualitatif et quantitatif sur les avantages et inconvénients de chacune. Le gain de temps apporté par une approche séquentielle (pas de couplage entre les bâtiments et le réseau) est quantifié au regard d'une approche couplée. Toutefois les avantages de l'approche couplée sont rappelés. Par ailleurs, deux approches de modélisation bâtiment sont expérimentées : soit la modélisation intègre l'ensemble des bâtiments dans une unique scène, soit chaque bâtiment dispose de son modèle.

MOTS-CLÉS : Co-simulation, EnergyPlus, Dymola, micro-grid, simulation multi-physique

[ABSTRACT. The Ines micro-grid modeling project is set within the FUI ModeliScale project. The consortium, which is composed of research institutes (INRIA, EDF, CEA), industrial partners (DS, ENGIE) and small enterprises (Eurobios, DPS, Phimeca), aims to solve the technological challenges in the modeling of large cyber-physical systems. This article compares several modeling approaches using different criteria and gives the advantages and disadvantages of each. The time saving of a sequential approach (no interaction between buildings and district heating network) is compared to a coupled approach. However, the advantages of the coupled approach are highlighted. Furthermore, two building modeling approaches are tested: buildings are either integrated into a single model or each building has its own model.

KEYWORDS : Co-simulation, EnergyPlus, Dymola, micro-grid, Multiphysics simulation

1. INTRODUCTION

La part de population mondiale vivant dans les aires urbaines pourrait atteindre 68.4% en 2050 contre 55.3% en 2018. La densification des aires urbaines accroît les interactions entre bâtiments dans le domaine des courtes et grandes longueurs d'onde et génèrent des îlots de chaleur (Allegrini, Dorer, et Carmeliet 2012). Les phénomènes d'îlots de chaleur peuvent être amplifiés par l'installation de systèmes tels que les climatiseurs ou de production photovoltaïque. En effet, entre 2008 et 2018 en France, le

LCOE (Levelized Cost Of Energy) des installations PV (Photovoltaïque) est passé de 688 €/MWh à 201 €/MWh (Haeusler et al. 2019) ce qui favorise les installations. En plus de l'impact que l'intégration photovoltaïque peut avoir sur le microclimat urbain, la décentralisation de la production et la multiplication des systèmes hybrides tel que la PAC (pompe à chaleur) a pour effet d'augmenter les interconnexions entre les réseaux électriques, les réseaux de chaleur et le parc immobilier. Ce travail s'inscrit dans ce contexte et vise à mettre en place une modélisation couplée d'un réseau de chaleur, d'un réseau électrique et d'un ensemble de bâtiment. L'article propose une comparaison de différents modes de couplage entre les réseaux et les bâtiments ainsi que différentes méthodes d'intégration des bâtiments entre eux-mêmes. Une telle modélisation permettrait, par la suite, d'étudier des stratégies de contrôle avancé que cela soit au niveau du réseau ou des bâtiments et de simuler l'impact de la rénovation ou de l'intégration de nouveaux bâtiments.

2. ETAT DE L'ART

Nous proposons ici un inventaire des principales méthodes de modélisation thermique pour un ensemble de bâtiments. Toutes les méthodes décrites ci-dessous reposent sur une description des phénomènes physiques en jeu et nécessitent les informations en conséquence : données géométriques, conditions aux limites, données constructives, scénarios d'usage... Ces informations peuvent en partie être extraites de bases de données telles que la BDTopo ou d'archétypes de bâtiments fournis par le projet EPISCOPE (Rochard et al. 2015). Ces modèles peuvent être utilisés pour étudier l'impact de la rénovation du parc immobilier, les interactions et les phénomènes physiques provoqués par des zones urbaines denses, de mettre en place des scénarios de densification (Ribault et al. 2017), de développer des stratégies de gestion énergétique... L'étude des consommations énergétiques des bâtiments peut se faire à différentes échelles en fonction des contraintes de l'étude (résolution temporelle, finesse des modèles de bâtiments, taille du parc...) (Loïc Frayssinet, Merlier, et al. 2018). Elles sont au nombre de trois :

BEM (Building Energy Model), permet de modéliser les transferts de chaleur dans les parois des bâtiments afin de déterminer le comportement des systèmes énergétiques. L'algorithme réalisant les bilans thermiques aux interfaces des parois est le plus souvent basé sur les fonctions de transfert. La résolution du système d'équation reste rapide malgré la finesse des modèles. Ce type de modélisation est très précis quant à la modélisation de la thermique du bâtiment et est généralement utilisée pour étudier un seul bâtiment dans son environnement. Les outils comme EnergyPlus, TRNSYS, BuildSysPro ou Pleiades/COMFIE sont utilisés pour ces approches. Selon les outils, les interactions entre bâtiments sont plus ou moins bien prises en compte. (Ribault et al. 2016) propose un récapitulatif les capacités des outils de simulation cités ci-dessus (prise en compte des ombrages et rayonnement courte longueur d'onde). Cette approche permet à la fois d'avoir une modélisation fine des dynamiques d'évolution de température, des phénomènes de stockage et restitution de chaleur et permet de prendre en compte certaines interactions entre les bâtiments. Néanmoins, son utilisation demande une grande quantité de données sur les matériaux de construction induisant de potentielles erreurs de saisie et un temps de mise en place conséquent. Par ailleurs les temps de calculs sont d'un à deux ordres de grandeur plus importants qu'une modélisation simplifiée de type RC.

UBEM (Urban Building Energy Model), est un type de modèle visant à prendre en compte de façon précise les interactions entre les bâtiments et l'environnement urbain. Des modèles de CFD peuvent y

être couplés afin d'affiner l'évaluation des échanges convectifs et des coefficients de pression sur les façades des bâtiments. La modélisation des bâtiments est généralement réalisée par des modèles reposant sur une analogie entre les phénomènes thermiques et électriques. Des réseaux de résistances et de capacités permettent de représenter les échanges convectifs, radiatifs et le stockage d'énergie. Selon le degré de connaissance et la granularité souhaitée la description peut être plus ou moins détaillée. Pour les modèles les plus simplifiés, toutes les parois d'un bâtiment sont assimilées à une seule paroi équivalente. On parle alors d'approche de type « boîte grise » qui consiste à associer à une description physique élémentaire, une méthode d'identification des paramètres du modèle. Par exemple, (Aoun, Bavière, Vallée, Arousseau, et al. 2019) et (Aoun, Bavière, Vallée, Brun, et al. 2019) décrivent la mise en place d'un modèle RC afin d'étudier le délestage thermique d'un réseau de chaleur. Ce modèle est intégré dans une optimisation MILP (Mixed-Integer Linear Programming) afin de contrôler la puissance injectée en sous-station tout en minimisant les coûts d'approvisionnement énergétique et le confort dans les bâtiments. Cette technique de modélisation aboutit à une forte réduction des temps de calculs et à une résolution temporelle élevée. Néanmoins, la structure du modèle et l'identification des jeux de paramètres sont très spécifiques et font l'objet d'un travail en soi. L'identification est réalisée à partir d'un modèle BEM ou de données expérimentales détaillées et peut être un processus chronophage. Dans le cas où l'identification est faite à partir d'un modèle de bâtiment détaillé, il semble pertinent de vouloir directement l'intégrer à la maquette de réseau.

CEM (City Energy Model) est utilisé dans le cadre de simulation à l'échelle d'une ville ou d'une région comme outil d'aide à la décision lors de projets de développement urbain. Les modèles de bâtiments sont souvent issus d'exploitation de données SIG (Système d'Information Géographique). Afin de réaliser des simulations à une telle échelle et avec un temps de calcul raisonnable, les modèles de climat urbain sont simplifiés en comparaison de ceux utilisés pour l'UBEM. La résolution spatiale et temporelle est assez faible (de l'ordre de l'heure) et ne permet pas de prendre en compte les dynamiques rapides. Les résultats de ces modèles sont donc plus proches de ceux fournis par une approche « top-down ». Des BEMs sont toutefois utilisés pour des simulations grande échelle comme c'est le cas pour (Tian et al. 2015) où près de 100 000 bâtiments sont modélisés sous EnergyPlus. Pour ce faire, un processus automatique d'extraction de données SIG est mis en place afin de créer des archétypes de bâtiments.

3. CAS D'ETUDE

Pour notre cas d'étude, il nous a semblé plus judicieux de mettre en place un BEM. En effet (Loïc Frayssinet, Berthou, et al. 2018) et (Loïc Frayssinet et al. 2017) montrent que les courtes dynamiques ne sont pas bien prises en compte par les modèles RC contrairement aux BEMs. Les écarts de consommation annuelle d'énergie ne sont pas très importants mais localement les courbes de charges peuvent être fortement impactées. Par ailleurs (Tian et al. 2015) a montré qu'il était possible de simuler un grand nombre de bâtiments avec cette approche. La suite de cet article présente la mise en place d'une co-simulation EnergyPlus/Dymola afin de modéliser les interactions entre un groupe de bâtiments et un réseau de chaleur. Cette approche a été retenue car en plus de permettre une réduction des temps de calcul, elle facilite la réutilisation de modèles existants.

Le parc immobilier complet est constitué de quatre bâtiments tertiaires et de la plateforme INCAS. Les bâtiments expérimentaux de la plateforme INCAS du CEA sont assimilés à des maisons

individuelles. Ces bâtiments à haute performance énergétique sont représentatifs des bâtiments pouvant être construits dans les prochaines années. Ils se distinguent par leur mode constructif : parois en monomur complétées d'un enduit isolant en aérogel (IMA), double mur de parpaings avec une isolation intermédiaire (IDM), parois en ossature bois (IOB) et murs en béton banché isolé par l'extérieur (IBB). La surface habitable de chacune des maisons est de 100m² répartie sur deux étages.



Figure 1 : Modélisation de la plateforme INCAS sous EnergyPlus.

Chaque maison est modélisée sous EnergyPlus par quatre zones thermiques : le vide sanitaire, le rez-de-chaussée (RdC), le premier étage (Rp1) et les combles. Seul le RdC et le Rp1 sont des zones chauffées. Les bâtiments peuvent être modélisés sur la même scène afin de prendre en compte les masques solaires et les interactions entre bâtiments (Figure 1) ou bien dans des fichiers séparés où ces effets ne sont pas considérés. Chaque modèle de maison a les entrées suivantes pour les zones thermiques RdC et Rp1 : la puissance de chauffage (Q), les gains internes causés par la présence d'occupants (Occ), les gains internes causés par l'eau chaude sanitaire (ECS), les gains internes causés par l'utilisation d'appareils électriques (ED). Les sorties des modèles sont les températures des zones thermiques RdC et Rp1 et la température extérieure. Les profils d'occupation, de consommation électrique et d'ECS sont générés par l'outil Load Profile Simulator (LPG).

Le modèle de réseau de chaleur (DH) est basé sur les plans du réseau du site de l'INES. Il est composé de différentes sources de production de chaleur comme un champ de panneaux solaires thermiques, une pompe à chaleur (PAC) ou une chaudière. La chaleur produite est stockée dans un ballon stratifié. Dans notre cas d'étude nous avons fait le choix de maximiser l'utilisation des systèmes les moins polluants. Pour ce faire, les systèmes de production ont été hiérarchisés de la façon suivante : prioriser l'énergie solaire face à toute autre énergie, si besoin mise en fonctionnement de la PAC qui a une consommation exclusivement d'électricité puis en dernier recours mise en fonctionnement de la chaudière à gaz pour faire l'appoint. Le but de cette régulation est de garder dans la partie haute du stockage (là où est situé le départ pour les consommateurs) une température minimale. La distribution se fait via un réseau de tuyauterie prenant en compte les pertes de charge linéiques et singulières. Deux modèles de sous-stations sont utilisés : un pour le chauffage et un pour l'ECS. Tous les composants du modèle de réseau de chaleur sont modélisés sous Dymola et issus de la librairie interne du CEA « District Heating ». De même, les systèmes d'émetteurs des maisons individuelles sont modélisés sous Dymola.

4. DIFFERENTES APPROCHES MISES EN ŒUVRES

Dans la suite de ce travail nous proposons de mettre en évidence les avantages et les inconvénients ainsi que les impacts quantitatifs (temps de simulation et indicateur énergétique) de plusieurs approches de modélisation du cas d'étude. Ce dernier étant composé d'un réseau de chaleur et de quatre bâtiments, nous avons considéré et mis en œuvre les variantes suivantes :

- Les quatre bâtiments peuvent être intégrés au sein d'une même modélisation (**scène unique**) ou bien de façon indépendante, un modèle par bâtiment (**scènes multiples**).
- La modélisation de l'ensemble bâtiments et réseau de chaleur est réalisée de façon séquentielle ou couplée.

L'approche **séquentielle** comprend deux étapes : 1 – l'estimation des consommations de chauffage et ECS de chaque bâtiment, 2 – la simulation du réseau de chaleur intégrant les profils de consommation des bâtiments précédemment calculés. Les besoins énergétiques du bâtiment sont calculés en faisant l'hypothèse que la consigne est toujours respectée. On suppose alors que la capacité du réseau thermique est suffisante pour fournir la puissance demandée par les bâtiments dans tous les cas de figure. Les besoins de chauffage ainsi calculés sont ensuite exportés sous forme de fichiers de données puis importés dans Dymola qui est l'environnement utilisé pour la simulation du réseau de chaleur. Avec cette approche, les modèles de DH et de bâtiments n'ont donc aucune interaction.

L'approche **couplée** DH et bâtiments est mise en œuvre sous forme d'une co-simulation entre les modèles de bâtiments EnergyPlus et le modèle de réseau de chaleur Dymola. Pour ce faire, les modèles EnergyPlus sont importés sous Dymola sous forme d'une FMU (Functional Make-up Unit). Ce couplage permet un échange de données bidirectionnel à pas de temps fixe. La fréquence d'échange des données est de 5 minutes. Elle correspond au pas de temps de calcul du/des modèles Energyplus. Ainsi, les puissances injectées dans les bâtiments sont calculées par le modèle de réseau de chaleur en fonction de la température de zone des bâtiments. La puissance de chauffe est régulée en température et en débit. Une loi d'eau permet de déterminer la température en sortie de secondaire de la sous-station et un contrôleur PI régule le débit dans les émetteurs des zones RdC et Rp1. Le contrôleur compare la différence entre la température de consigne de la zone thermique et la température mesurée en sortie de la FMU du bâtiment. Ce couplage est dit « faible » car il n'y a pas d'itération possible à chaque pas de temps. Les échanges d'informations sont donc décalés d'un pas de temps. L'impact sur les résultats de simulation est minime compte tenu des constantes de temps des systèmes simulés (inertie des bâtiments et du réseau de chaleur) et du pas de temps de calcul. Dans le cas d'une co-simulation comme celle-ci, les solveurs sont encapsulés dans les FMUs. Par conséquent, pour la partie bâtiment, le pas de temps est forcément dépendant de celui défini dans EnergyPlus. Dymola propose une large sélection de solveurs à pas de temps fixe (type Euler) ou variable (type Dassl ou Radau). En tant que Master de co-simulation, Dymola autorise le couplage d'un solveur à pas de temps variable et d'un solveur à pas de temps constant. Dans ce cas de figure, les interactions avec les FMUs sont considérées comme des événements récurrents.

5. RESULTATS

Les principaux résultats de cette étude sont récapitulés dans le Tableau 1. Il présente à la fois des indicateurs quantitatifs et qualitatifs. Les simulations ont été réalisées du 1^{er} au 31 janvier.

La première partie du tableau traite des temps CPU. Le temps complet de simulation, noté « CPU Tot », est la somme du temps d'initialisation (CPU Ini) et de simulation (CPU Sim). Ces informations ne sont pas toutes accessibles selon les logiciels utilisés. Un premier essai porte sur les temps CPU des modèles de bâtiments. Notez que EnergyPlus permet le lancement en parallèle de plusieurs modèles en

utilisant l'exécutable « *RunEpParrallele.bat* » ou « *multiple* ». En revanche, la simulation d'un modèle n'est affectée qu'à un cœur. Pour cette raison une modélisation indépendante des bâtiments est plus avantageuse du point de vue du temps de calcul. Dans le cas où les bâtiments sont exportés sous forme de FMU, on constate que le temps « CPU Ini » est plus important pour une scène unique et que son « CPU Sim » est plus faible. Au final, les temps « CPU Tot » sont légèrement plus courts pour une scène unique. On en déduit que plus le nombre de FMU sera important dans un modèle et plus les temps « CPU Sim » augmenteront. L'ajout de systèmes de chauffage et du réseau thermique augmente considérablement les temps de calculs. Dans le cas de l'approche séquentielle, les temps « CPU Tot » sont très proches. Le mode d'intégration des bâtiments n'a pas beaucoup d'impact. A contrario, lors d'une approche couplée, la différence d'intégration des bâtiments conduit à une différence de temps « CPU Tot » d'une heure. Dans ce cadre de simulation il est donc plus avantageux d'avoir des bâtiments sur une seule scène. Néanmoins, une approche séquentielle amène à des réductions de temps de calcul entre deux et trois heures en comparaison de l'approche couplée.

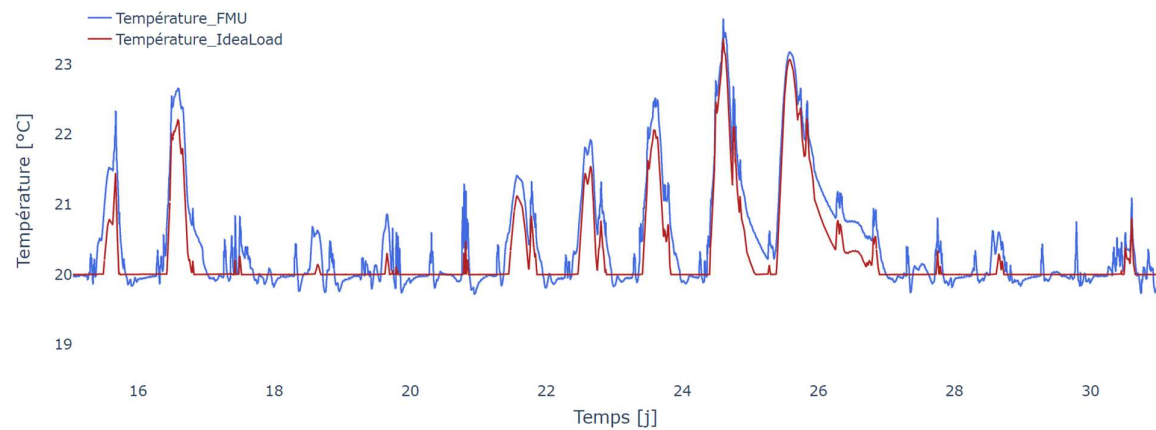


Figure 2 : Comparaison de la réponse en température des bâtiments selon une approche séquentielle ou couplée.

Le deuxième indicateur quantitatif présenté est le besoin de chauffage. Afin de minimiser l'influence de l'initialisation du modèle sur les résultats, les consommations de chauffage sont intégrées sur les 15 derniers jours de la simulation. Le tableau présente donc les demandes de chaud pour chaque bâtiment. En premier lieu, on constate des besoins globalement plus importants lorsque les modèles de bâtiments sont découplés du réseau thermique. En effet, EnergyPlus calcule la puissance pour chacune des zones de façon itérative afin de parfaitement respecter les consignes de température. Cette régulation parfaite conduit donc à une différence de besoins par rapport à la régulation PI qui est utilisée dans l'approche couplée (Figure 2). Les écarts de besoins énergétiques entre les deux approches peuvent être significatifs et aller jusqu'à 19% dans le cas de la maison IBB. On observe également des différences de besoins de chauffage selon que les bâtiments sont simulés individuellement ou collectivement sur une même scène. Malgré la distance entre les bâtiments et leur faible hauteur, les masques solaires sont à l'origine d'écarts de consommation non négligeables. En effet les deux bâtiments IMA et IOB, situés au nord, présentent respectivement une consommation additionnelle de 4% et 10%.

Dans une optique de passage à l'échelle, nous avons cherché à créer un quartier en nous basant sur les modèles EnergyPlus des maisons individuelles. Dans le cas où les bâtiments sont sur différentes scènes, leur multiplication est facilement réalisable. Pour un modèle découplé, le bâtiment est représenté par une courbe de charge. Afin de prendre en compte les différents scénarios d'occupation, il faut

générer pour chaque bâtiment un jeu de données. Pour un modèle couplé, chaque FMU représente un bâtiment. Tous les FMU doivent avoir des ressources qui leur sont propres ce qui nécessite de les importer un par un sur Dymola. Ces deux façons d’augmenter le nombre de bâtiments sont simples mais fastidieuses. Le passage à l’échelle pour des bâtiments intégrés à une même scène est plus complexe. En effet, nous avons essayé de multiplier les bâtiments via les outils Sketchup et Rhino/Grasshopper. Dans les deux cas, l’importation des modèles amène à des pertes de données (systèmes du bâtiment, redéfinition des zones thermiques, perte de certain scénarios...) ou à l’ajout par défaut de certains composants. La reconstruction des fichiers est à la fois chronophage et accidentogène.

Pour terminer, une approche couplée permet de mettre en place des stratégies de gestion avancée des réseaux. Ainsi, il est possible d’utiliser l’inertie du bâtiment afin de réaliser du délestage thermique.

		Modélisation séquentielle		Modélisation couplée	
		Scènes multiples	Scène unique	Scènes multiples	Scène unique
Modèle de bâtiment évolution libre	CPU Tot	17s	33s	33s	36s
	CPU Sim	/	/	21s	13s
	CPU Ini	/	/	12s	23s
Modèle de DH+bâtiment	CPU Tot	9h 43min 10s	9h 46min 13s	12h 36min 2s	11h 34min 32s
	CPU Sim	9h 43min 7s	9h 46min 10s	12h 35min 42s	11h 34min 9s
	CPU Ini	3s	3s	14s	23s
Consommation de chauffage sur 15 jours	IBB (kWh)	124	123	100	100
	IDM (kWh)	142	142	122	123
	IMA (kWh)	203	212	187	193
	IOB (kWh)	124	138	112	126
Interaction entre les bâtiments	Aucune	Masque solaire Réflexions extérieures	Aucune	Masque solaire Réflexions extérieures	
Délestage thermique	Non	Non	Oui	Oui	
Multiplication des bâtiments à partir d'un IDF	Simple	Difficile	Simple	Difficile	

Tableau 1 : Récapitulatif des résultats de simulation.

6. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Nous avons vu différentes méthodes de modélisation et d’intégration des bâtiments dans un réseau micro-grid. La co-simulation permet de mettre en place une régulation plus réaliste impactant les consommations des bâtiments et donc le dimensionnement du réseau de chaleur. Néanmoins cette approche couplée est synonyme de temps de calcul plus important. Une possibilité serait de réaliser une co-simulation sur un master dédié à ce type de simulation. Un logiciel comme DACCOSIM NG permettrait de découper le modèle de réseau de chaleur en FMUs et de les faire communiquer entre eux de façon optimale. Une parallélisation des calculs serait alors possible afin de réduire les temps de calcul. Dans notre cas d’étude, la densité de bâtiment reste faible pour le moment. Néanmoins, l’agrégation de modèles de bâtiments sur une même scène a un impact sur les consommations des bâtiments. Le développement d’une méthodologie afin de dupliquer la plateforme INCAS permettrait de densifier le parc immobilier et de mettre en évidence l’importance de la prise en compte de ces interactions.

7. BIBLIOGRAPHIE

- Allegrini, Jonas, Viktor Dorer, et Jan Carmeliet. 2012. « Influence of the urban microclimate in street canyons on the energy demand for space cooling and heating of buildings ». *Energy and Buildings* 55: 823-32. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.10.013>.
- Aoun, Nadine, Roland Bavière, Mathieu Vallée, Antoine Arousseau, et Guillaume Sandou. 2019. « Modelling and flexible predictive control of buildings space-heating demand in district heating systems ». *Energy* 188: 116042. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116042>.
- Aoun, Nadine, Roland Bavière, Mathieu Vallée, Adrien Brun, et Guillaume Sandou. 2019. « Dynamic Simulation of Residential Buildings Supporting the Development of Flexible Control in District Heating Systems ». 129-38. <https://doi.org/10.3384/ecp19157129>.
- Berthou, Thomas, Pascal Stabat, Raphael Salvazet, et Dominique Marchio. 2014. « Development and validation of a gray box model to predict thermal behavior of occupied office buildings ». *Energy and Buildings* 74 (mai): 91-100. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.01.038>.
- Delmastro, Chiara, Fredrik Martinsson, Guglielmina Mutani, et Stefano P. Corgnati. 2017. « Modeling Building Energy Demand Profiles and District Heating Networks for Low Carbon Urban Areas ». *Procedia Engineering* 198: 386-97. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.07.094>.
- EnergyPlus, Energy Simulation Software. s. d. « Engineering Reference ». U.S Departement of Energy.
- Frayssinet, Loïc, Thomas Berthou, Bruno Duplessis, Jean-Philippe Tavella, Frédéric Kuznik, Jean-Luc Hubert, et Jean-Jacques Roux. 2018. « Incertitude de simulation à l'échelle du quartier : comparaison de deux modèles et analyse de sensibilité ». *Conférence IBPSA France, 2018, Bordeaux, France*. (hal-01842414).
- 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: 307-12. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.07.327>.
- Frayssinet, Loïc, Lucie Merlier, Frédéric Kuznik, Jean-Luc Hubert, Maya Milliez, et Jean-Jacques Roux. 2018. « Modeling the heating and cooling energy demand of urban buildings at city scale ». *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 81 (janvier): 2318-27. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.06.040>.
- Gómez, José Évora, José Juan Hernández Cabrera, Jean-Philippe Tavella, Stéphane Vialle, Enrique Kremers, et Loïc Frayssinet. 2019. « Daccosim NG: Co-Simulation Made Simpler and Faster ». <https://hal-centralesupelec.archives-ouvertes.fr/hal-02121346>.
- Haeusler, Laurence, Gérard Gié, Débora Moreira, Thierry Badouard, Morgane Crenes, et Brice Arnaud. 2019. « Coûts énergies renouvelables et de récupération en France ».
- Huber, Jörg, et Christoph Nytsch-Geusen. 2011. « Development of modeling and simulation strategies for large-scale urban districts ». In *Proceedings of building simulation, 2011*:1753–1760.
- MEDDE. 2017. « Énergie dans les bâtiments ». Ministère de la Transition écologique. 2017. <https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/energie-dans-batiments>.
- Moghadam, Sara Torabi, Guglielmina Mutani, et Patrizia Lombardi. 2016. « GIS-Based Energy Consumption Model at the Urban Scale for the Building Stock ». Undefined. 2016. /paper/GIS-Based-Energy-Consumption-Model-at-the-Urban-for-Moghadam-Mutani/b87146e32b2a1833bdbff77325651f6d69b54959.
- Nageler, P., A. Koch, F. Mauthner, I. Leusbrock, T. Mach, C. Hochenauer, et R. Heimrath. 2018. « Comparison of dynamic urban building energy models (UBEM): Sigmoid energy signature and physical modelling approach ». *Energy and Buildings* 179: 333-43. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.09.034>.
- Perez, Nicolas, Peter Riederer, Christian Inard, et Vincent Partenay. 2015. « Thermal building modelling adapted to district energy simulation ». <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.3714.2163/1>.

- Ribault, Clément, Mathias Bouquerel, Adrien Brun, Mathieu Schumannb, Gilles Rusaouën, et Etienne Wurtz. 2017. « Assessing tools relevance for energy simulation at the urban scale: towards decision-support tools for urban design and densification ». *Energy Procedia*, CISBAT 2017 International Conference Future Buildings & Districts – Energy Efficiency from Nano to Urban Scale, 122 (septembre): 871-76. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.07.452>.
- Ribault, Clément, Adrien Brun, Gilles Rusaouën, et Etienne Wurtz. 2016. « Simulation et Optimisation Énergétiques à l'échelle Quartier ». ResearchGate. 2016. https://www.researchgate.net/publication/303551378_Simulation_et_optimisation_energetiques_a_l'echelle_quartier.
- Rochard, Ulrich, Santhiah Shanthirablan, Camille Berjon, et Maëlle Château le bras. 2015. « Typologie du parc existant et solution exemplaires pour la rénovation énergétique en France ». https://episcopie.eu/fileadmin/tabula/public/docs/brochure/FR_TABULA_TypologyBrochure_Pouget.pdf.
- Swan, Lukas G., et V. Ismet Ugursal. 2009. « Modeling of end-use energy consumption in the residential sector: A review of modeling techniques ». *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13 (8): 1819-35. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2008.09.033>.
- Tian, W., A. Rysanek, R. Choudhary, et Y. Heo. 2015. « High resolution energy simulations at city scale ». 239-46.
- United Nations, Department of Economic and Social Affairs, et Population Division. 2019. *World Urbanization Prospects: The 2018 Revision*.