

# L'ÉCHELLE DU QUARTIER, UN BON COMPROMIS POUR LA MODÉLISATION DES DÉPERDITIONS ÉNERGÉTIQUES ?

par Nathalie Molines, Eduard Antaluca, Fabien Lamarque

Sorbonne Université, Université de Technologie de Compiègne, Laboratoire Avenues EA 72841  
nathalie.Molines@utc.fr, eduard.antaluca@utc.fr, fabien.lamarque@utc.fr

---

Dans le cadre du protocole de Kyoto, la France s'est engagée à diviser par quatre ses émissions de gaz à effet de serre (MEDDE, 2013). Pour respecter cet engagement, le gouvernement français a fait évoluer son cadre législatif et réglementaire pour assurer la contribution des collectivités locales à la réduction des émissions de gaz à effet de serre (Chanard et al., 2011). Ce transfert de responsabilité de l'action énergétique au niveau local (Theys et Vidalenc, 2011 ; Bertrand et Richard, 2014) doit s'appuyer sur des objectifs quantifiés (Godinot, 2011) et une action globale reposant sur trois niveaux d'intervention publique : exemplarité des biens et services publics, politiques publiques et sensibilisation (Chanard et al., 2011). Cependant, l'action publique au niveau local se heurte à la difficulté de travailler sur l'efficacité énergétique réelle des formes urbaines à l'échelle de la ville - et pas seulement d'un bâtiment ou d'un ensemble (Maïza, 2007 ; Arantes et al., 2016). La modélisation et la cartographie des déperditions énergétiques offrent une aide quantitative tangible pour aider les villes à prendre des décisions. La modélisation thermique d'un environnement bâti s'effectue traditionnellement au niveau urbain, à partir de données d'entrée macro-économiques ou de la typologie des bâtiments (Kavgic et al., 2010), ou au niveau du bâtiment, à partir de données physiques, empiriques ou statistiques (Magyari et al., 2016, Crawley et al., 2001). Ces méthodes d'évaluation comportent encore de nombreuses limites. L'utilisation de la thermographie aérienne en milieu urbain donne un aperçu des pertes de chaleur de l'environnement bâti et constitue un outil utile pour sensibiliser les résidents à l'importance d'isoler leur maison. Cependant, elle souffre d'un certain nombre de biais et de limites et doit être uniquement considérée comme une première étape avant des études précises et coûteuses au niveau du bâtiment (Molines et al., 2017). Entre ces deux niveaux, le niveau du quartier pourrait produire des simulations relativement précises à un coût raisonnable. Il existe différents moyens d'appréhender cette échelle. Ces méthodes sont plus ou moins complexes, longues et coûteuses à mettre en œuvre et, bien sûr, plus ou moins précises. Nous présentons ici les résultats d'une analyse comparative de trois méthodes : une au niveau urbain et deux au niveau des quartiers (avec et sans données thermiques précises). Il s'agit notamment de vérifier si le quartier est un niveau approprié pour l'étude thermique de l'environnement du bâtiment en vue de convaincre les usagers de réaliser des travaux de rénovation énergétique. Au niveau des quartiers, différents niveaux de précision seront prévus pour les simulations, afin d'évaluer la reproductibilité des études réalisées sous des hypothèses plus ou moins simplistes. Les simulations ont été réalisées à partir d'un modèle combinant différents progiciels (SIG, BIM, simulations thermiques) et différents niveaux d'acquisition de données. La fiabilité des résultats fera l'objet d'un examen critique. Les incertitudes seront prises en compte parallèlement à l'utilisation potentielle de la méthode par les collectivités locales (données d'entrée requises, temps de développement du modèle, coût, etc.)

**Mots clés :** mapping of energy losses, neighbourhood scale, energy modelling, thermal building simulation, BIM, GIS, Compiègne

## Introduction

Les villes se sont engagées dans les réductions de leur émission de gaz à effet de serre (EGES) (facteur 4). Ne pouvant agir directement sur le parc bâti elles mettent en place des actions afin d'informer, de sensibiliser et d'orienter les propriétaires et locataires de parcs vétustes quant à l'importance et l'intérêt d'effectuer des travaux d'isolation.

L'Agence régionale de Compiègne (ARC) a commandé en 2015 un relevé thermographique aérien de son agglomération. Cette image a servi de point d'entrée pour une vaste campagne de sensibilisation de la population (salon de la thermographie, site internet...) et pour l'ouverture d'une plateforme habitat rénové dont le rôle est de conseiller et d'orienter les citoyens dans les travaux à effectuer et les aides disponibles.

Cette image a permis également d'analyser à l'échelle de l'agglomération les zones d'interventions prioritaires (Molines et Henriot 2017). Le protocole, aisé à mettre en place, permet en un temps réduit et avec peu de données, de localiser, sur un vaste territoire, les zones sur lesquelles concentrer les actions. Cependant cette méthode comporte un certain nombre de limites (biais engendrés par la thermographie, méconnaissance des spécificités des bâtiments : combles aménagés ou non...). Elle ne peut donc être considérée comme une fin en soi mais représente la première étape d'une série d'investigations. Des analyses complémentaires doivent ensuite être effectuées : modélisation fine des bâtiments, intégration de nouvelles informations dans la base de données, intégration d'un modèle thermique urbain. Elles améliorent la caractérisation du parc bâti et permettent de comparer l'efficacité de différents scénarios de réhabilitation thermique. Cependant ces analyses rallongent grandement le temps d'analyse et nécessitent des informations qui ne sont pas toujours connues.

Nous présenterons dans cet article, après être brièvement revenu sur les grandes caractéristiques de la modélisation des déperditions énergétiques, trois méthodes complémentaires exploitant les potentialités de divers outils informatiques afin de déterminer la pertinence et la faisabilité de simulations thermiques à des échelles géographiques intermédiaires. Il s'agit notamment d'identifier si le quartier constitue une échelle adaptée pour l'étude de la thermique du bâti, en vue de convaincre les utilisateurs d'engager des travaux de rénovations énergétiques. Enfin, à la même échelle, divers niveaux de précisions seront apportés aux simulations afin d'évaluer la répliquabilité des études menées sous plus ou moins d'hypothèses simplificatrices.

## La modélisation des déperditions énergétiques

### Les différentes échelles de la modélisation thermique

La modélisation et la cartographie des déperditions énergétiques offrent un soutien quantitatif concret pour aider les villes à prendre des décisions (Caputo *et al.*, 2013). Elles s'effectuent généralement à deux échelles différentes : l'échelle du bâtiment d'une part, et l'échelle du quartier ou de la ville d'autre part.

La modélisation à l'échelle du bâtiment est un domaine bien développé dans la littérature scientifique et de nombreuses méthodes et outils de calcul sont disponibles : TRNSYS (Beckman *et al.*,

1994), Energyplus (Crawley *et al.*, 2001), Pleiades-Comfie (Peuportier *et al.*, 1990). Elle repose sur des données physiques, empiriques ou statistiques (ou une combinaison des trois) (Wate et Coors, 2015, Magyari *et al.*, 2016).

Au contraire, les simulations d'estimation énergétique au niveau de la ville ou du quartier représentent un domaine de recherche émergent. Ces modélisations s'effectuent généralement à partir de données macro-économiques ou de la typologie des bâtiments (Kavgic *et al.*, 2010). Quelques outils de simulation ont été développés. On citera par exemple Citysim (Robinson *et al.*, 2009).

## Quelles données pour modéliser les déperditions de chaleur ?

Les modèles de déperdition énergétique nécessitent l'acquisition de données géométriques et non géométriques. Les modèles de données les plus couramment utilisés sont les modèles d'information sur la construction (BIM), utilisés pour les simulations de construction individuelle, et les systèmes d'information géographique, généralement basés sur la technologie 3D (SIG). Les SIG, qui permettent d'évaluer des territoires plus vastes, sont devenus un outil essentiel pour améliorer les capacités de modélisation énergétique dynamique (Bahu *et al.*, 2013, Wate et Coors, 2015, Nowacka *et al.*, 2018).

De leur côté, les données non géométriques peuvent être récupérées de deux façons. Les données peuvent être collectées, en temps réel, à partir de capteurs. C'est la solution optimale, mais elle est coûteuse et ne peut être mise en œuvre sur une grande surface. L'autre solution consiste à développer une typologie des différentes formes urbaines présentes sur le territoire. On parle de construire des archétypes (Sousa Monteiro *et al.*, 2015, Ali *et al.*, 2018). C'est la solution la plus couramment utilisée dans la modélisation énergétique à l'échelle urbaine. Cependant, ces bases de données se concentrent généralement sur les archétypes nationaux et n'intègrent pas les types de bâtiments caractéristiques de chaque région (Ali *et al.*, 2018).

Ces deux échelles possèdent chacune des avantages mais également des limites. Nous émettons alors deux hypothèses :

- premièrement, l'échelle intermédiaire de l'ensemble ou du quartier, qui permet d'être suffisamment précis tout en étant relativement rapide à développer, est un bon compromis
- deuxièmement, la combinaison d'un modèle d'information du bâtiment et d'outils de

systèmes d'information géographique avec un logiciel de simulation thermique peut faciliter la modélisation.

## L'échelle du quartier, un bon compromis pour la modélisation des déperditions énergétiques ?

### Présentation du projet

Cette communication présente les premiers résultats d'une recherche exploratoire effectuée sur le territoire de l'agglomération de Compiègne. L'agglomération régionale de Compiègne (ARC) est une structure de coopération intercommunale située dans le département de l'Oise, dans la région des Hauts de France. C'est un territoire mixte composé de communes urbaines, périurbaines et rurales.

L'empreinte carbone est très mauvaise : 8,1 t. d'équivalent CO<sub>2</sub> par habitant et par an de gaz à effet de serre (la moyenne française étant de 5,5 t en 2010). Le tiers de ces émissions de gaz à effet de serre (EGES) provient des secteurs du logement et du tertiaire. Ces forts taux d'émissions s'expliquent en partie par l'âge des bâtiments, dont la plupart datent d'avant 1975 (date de la première réglementation thermique) et sont très mal isolés.

Conscient de l'effort à faire pour réduire son empreinte carbone, l'ARC a mis en place en 2016, sous l'impulsion de l'ADEME et de la région Picardie, un guichet unique de l'amélioration de l'habitat appelé « Habitat Rénové ». Il s'est également tourné vers nous afin que nous l'accompagnions dans la production de données territoriales et la priorisation des urgences d'intervention en lui fournissant des outils « d'aide à la transition énergétique » (Molines *et al*, 2017, Henriot *et al*, 2019).

### Méthodologie

Dans ce projet, nous avons voulu comparer trois méthodologies numériques pour déterminer les valeurs absolues des besoins de chauffage à l'échelle de l'agglomération et du quartier (fig. 1).

- **La première méthode** modélise le territoire à l'échelle de la ville et utilise une géométrie de l'environnement simplifiée. Une typologie simplifiée des bâtiments établie à partir des données MAJIC (Mise À Jour des Informations Cadastres) de la Direction Générale des Finances Publiques (DGFIP) qui nous ont été fournies par l'ARC. Ces données utilisées par l'autorité publique pour collecter les impôts,

contiennent des informations sur la hauteur des bâtiments, leur âge et les principaux matériaux de construction (murs et toit) et permettent la simulation de la demande et des besoins de chauffage.

A partir des données SIG, un algorithme classe tous les bâtiments en 17 typologies architecturales (en tenant compte des adjacences entre les bâtiments).

Pour chaque typologie, une simulation CitySim est réalisée (les recherches antérieures sur l'architecture à Compiègne servent de base aux simulations).

Les résultats de la simulation sont replacés dans le SIG, ce qui permet de visualiser à l'échelle régionale les secteurs où les actions de modernisation sont les plus nécessaires.

- **La deuxième méthode** correspond à une simulation simplifiée à l'échelle du quartier. Un travail de terrain permet d'obtenir les données nécessaires pour l'établissement d'une typologie plus fine. Une douzaine de quartiers (80 bâtiments) ont été modélisés. La modélisation 3D a été effectuée sur Autocad puis importée dans Citysim pour la simulation thermique (figure 2).

Cette simulation a pris en compte plus de détails qu'à l'échelle de la ville. Ont par exemple été pris en compte l'estimation du nombre d'occupants, le type de vitrage, le taux de vitrage des façades ainsi que la composition des murs.

- **La troisième méthode** correspond à une modélisation fine à l'échelle du quartier. Deux groupes de bâtiments homogènes ont été étudiés (figure 3). Le premier correspond à un lot de 13 maisons semi-mitoyennes construites en 1980. Le deuxième correspond à un groupe d'habitats collectifs en barre des années 70. Des données précises sur les caractéristiques et la consommation réelles de ces bâtiments ont été fournies par l'agglomération. Comme les groupes sont homogènes, nous avons pu généraliser les données aux autres bâtiments. Ces données ont été intégrées dans Citysim afin d'effectuer différentes simulations de rénovation.

Ce modèle tient compte de nombreux paramètres : isolation de toiture, isolation intérieure, isolation extérieure, remplacement de fenêtres isolation de toiture....

### Résultats

Une fois les simulations thermiques réalisées à partir de ces trois modèles de données, nous avons pu comparer les résultats obtenus.

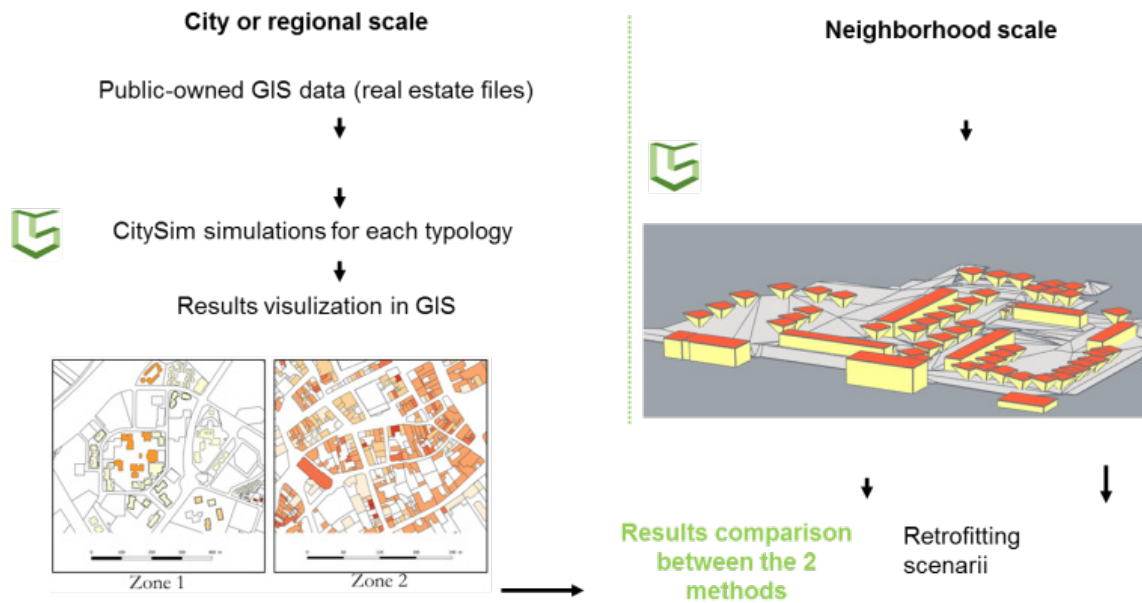


Figure 1 : Trois protocoles - deux échelles

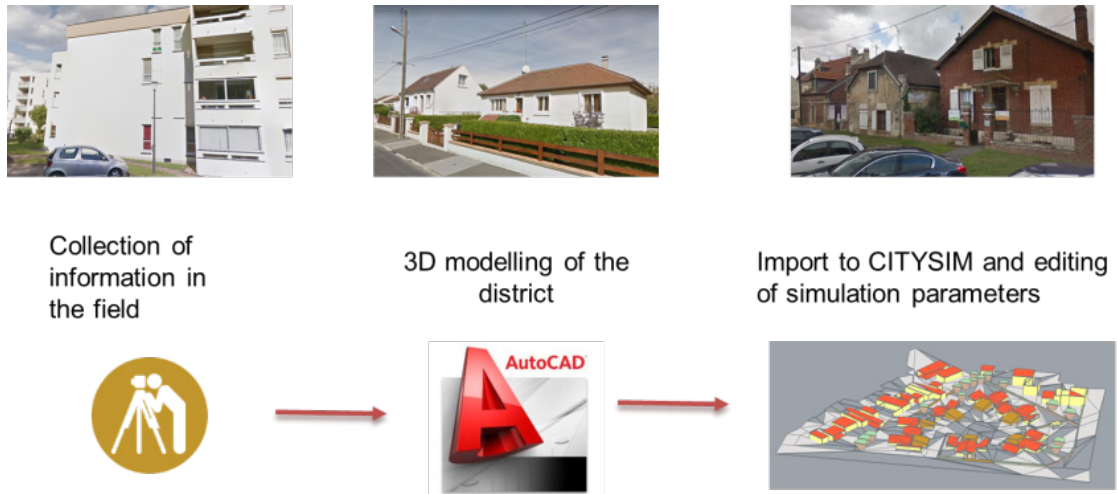


Figure 2 : Protocole 2 pour l'analyse simplifiée à l'échelle du quartier

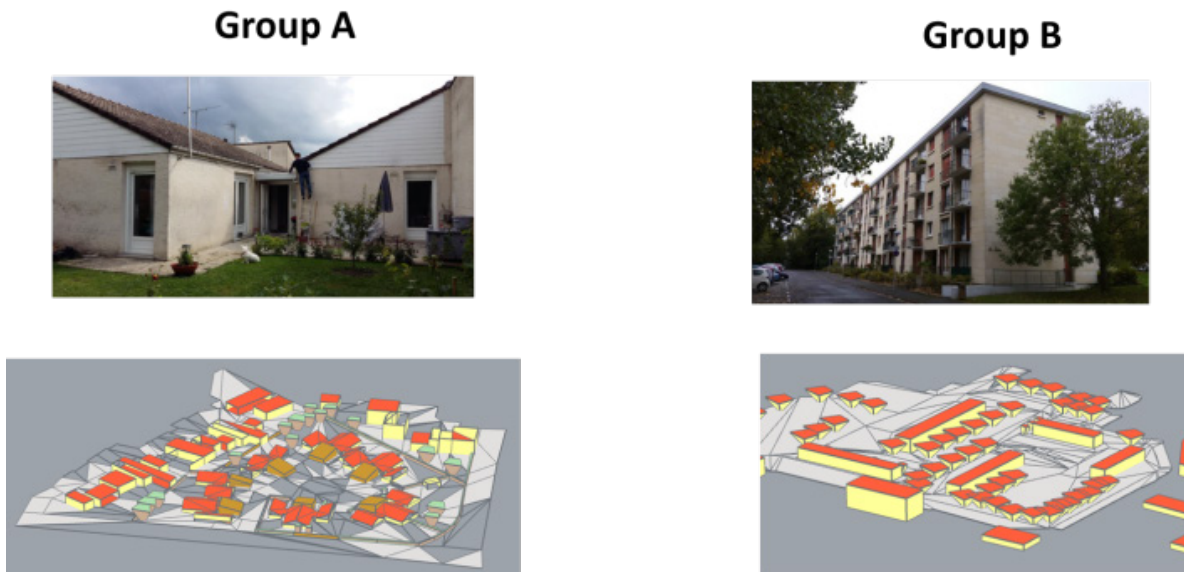


Figure 3 : Lots étudiés dans la 3eme simulation

La méthode à l'échelle de l'agglomération s'est attachée à fournir des valeurs absolues de déperditions thermiques pour tous les bâtiments de l'ARC. Cette évaluation à grande échelle est réalisée grâce à une typologie simplifiée et un classement automatisé des différentes formes urbaines présentes sur le territoire. Ce protocole présente plusieurs limites. Les trois principales sont les suivantes :

- inadaptation des données publiques comme données d'entrée de simulation (les données SIG sont souvent basées sur des parcelles et non sur des bâtiments).
- simplification de la typologie qui implique que tous les bâtiments classés dans une même catégorie soient considérés comme équivalents d'un point de vue thermique.
- non prise en compte de l'environnement des bâtiments (sauf quand il s'agit de maisons mitoyennes).

Malgré ces limites bien identifiées, cette méthode produit des résultats à grande échelle dans un temps très court.

Elle conduit ainsi à une approximation significative, mais s'avère utile pour guider les politiques publiques. Les résultats produits peuvent être utilisés, en complément de la thermographie aérienne, et avec discernement et précaution pour identifier les zones prioritaires pour des rénovations énergétiques en préalable de démarches plus poussées à des échelles inférieures.

Ces études à l'échelle urbaine sont également exploitables pour des actions de sensibilisation.

En second lieu, l'échelle du quartier s'est avérée pertinente pour la simulation des déperditions énergétiques, sous réserve de certaines conditions. L'étude simplifiée portant sur douze quartiers a mis en évidence la difficulté et le temps nécessaire à la collecte de données pour un grand nombre de bâtiments. La configuration qui semble la plus pertinente pour lancer des simulations est celle d'un quartier au bâti homogène, sur lequel des audits énergétiques ont déjà été réalisés.

En effet, une connaissance préalable du parc bâti (en particulier de la composition des parois) réduit considérablement l'incertitude de la simulation. La modélisation 3D des enveloppes et du quartier prend un certain temps, mais permet ensuite de réaliser un grand nombre de simulations correspondant à divers scénarios. De par son échelle, l'étude touche un bon nombre de ménages, et propose des résultats individualisés assez fiables tenant compte

de l'environnement du bâti. Dans le cadre du projet, les résultats obtenus sont en relative cohérence avec ceux des diagnostics préalablement exercés, dont les hypothèses étaient différentes. Ce type d'étude rapide peut prendre place après celle réalisée à l'échelle de l'agglomération, et éventuellement avant une autre étude poussée à l'échelle du bâtiment.

## Conclusion

A l'heure où la rénovation énergétique du parc résidentiel est une priorité écologique et financière nationale, la combinaison des outils numériques constitue une démarche pertinente pour convaincre les propriétaires d'engager des travaux. La question des données est essentielle et parfois bloquante à grande échelle, et il n'existe pas encore de jeux de données spécifiques adaptés à la situation. Cependant, les évolutions en cours dans les méthodes de construction et de gestion – en particulier le développement du BIM – offrent des perspectives enthousiasmantes pour ce type d'études. Un couplage BIM-CitySIM permettrait notamment de préciser les résultats, comme l'EPFL a pu le faire avec le logiciel EnergyPlus.

L'emploi de jeux de données à grande échelle nécessitera une combinaison des SIG et des logiciels de simulation à l'échelle urbaine.

En conclusion, on peut dire que l'association SIG-BIM-CITYSIM est efficace. La modélisation à l'échelle des quartiers prend beaucoup plus de temps que la modélisation à l'échelle des agglomérations.

Cependant, cette échelle concerne bon nombre de ménages, et offre des résultats individualisés assez fiables compte tenu de l'environnement bâti, sur lesquels les gestionnaires peuvent facilement s'appuyer pour sensibiliser les habitants, les bailleurs et les artisans.

De notre côté, nous envisageons de mobiliser ces outils dans un projet de recherche interdisciplinaire combinant les sciences spatiales, sociales et de l'ingénieur, afin de co-construire une territorialisation inclusive de la transition énergétique, dans un contexte de justice énergétique (Henriot *et al.*, 2019).

## Remerciements

Les auteurs souhaitent remercier les étudiants en génie des systèmes urbains de l'université de technologie de Compiègne ayant collaboré à ce travail et en particulier Julien DESPAX et Thibaud BILLOTEAU. Il remercie également l'ARC pour leur confiance et pour la mise à disposition des données.

## Bibliographie

Ali U., Haris Shamsi M., Hoare C., Odonnel J., 2018, *GIS-Based Residential Building Energy Modeling at District Scale*, 4th Building Simulation and Optimization Conference, Cambridge, UK: 11-12 September 2018

Arantes L., Marry S., Baverel O. et Quenard D. 2016. « Efficacité énergétique et formes urbaines : élaboration d'un outil d'optimisation morpho-énergétique », *Cybergeo : European Journal of Geography*, document en ligne, consulté le 30-05-2017 : <http://cybergeo.revues.org/27584>

Bahu, J.M.; Koch, A.; Kremers, E.; Murshed, S.M., 2013, "Towards a 3D spatial urban energy modelling approach". *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial*, II-2/W1, 33–41.

Beckman, W. A., Broman, L., Fiksel, A., *et al.*, 1994, TRNSYS "The most complete solar energy system modeling and simulation software". *Renewable Energy*, 5(1-4), 486-488.

Bertrand F., Richard E, 2014. « L'action des collectivités territoriales face au « problème climat » en France : une caractérisation par les politiques environnementales », *Natures Sciences Sociétés*, vol. 22, n°3 : 195-203.

Caputo, P., Costa G. et Ferrari, S. 2013, "A supporting method for defining energy strategies in the building sector at urban scale". *Energy Policy*, 55, 261–270.

Chanard C. Sède-Marceau M.-H. de, Robert M., 2011. « Politique énergétique et facteur 4 : instruments et outils de régulation à disposition des collectivités », *Développement durable et territoires*, vol. 2, n° 1, document en ligne, consulté le 30-05-2017 : <http://developpementdurable.revues.org/8776>

Crawley, D. B., Lawrie, L. K., Winkelmann, F. C., *et al.*, 2001. "EnergyPlus: Creating a new-generation building energy simulation program", *Energy and Buildings*, 33(4), 2001, p. 319-331

Godinot S., 2011. « Les plans climat énergie territoriaux : voies d'appropriation du facteur 4 par les collectivités et les acteurs locaux ? » *Développement durable et territoires* [En ligne], Vol. 2, n° 1 | Mars 2011. <https://developpementdurable.revues.org/8874>. DOI :10.4000/developpementdurable.8874

Henriot C., Artis A., Molines N., *et al.* 2019, « The Energy Justice Tool Suite: an interdisciplinary and comprehensive method for energy transition territorialisation », panel « Smart cities and regions informing the energy transition », congrès AESOP, Venise, 9-13 juillet 2019.

Kavgic, M., Mavrogianni A., Mumovic, D., *et al.* 2010. « A review of bottom-up building stock models for energy consumption in the residential sector". *Building and Environment*, 45(7), 1683–1697.

Magyari, A., Vizi Kata V., 2016. « City-scale energy modelling- comparative review of city-scale energy modelling approaches", Budapest University of Technology and Economics, Faculty of Architecture, Department of Urban Planning and Design. Budapest, 2016 40p.

Maïzia M., 2007. « L'énergétique urbaine et la morphologie des villes », *Les annales de la recherche urbaine*, n°103 : 79-85.

MEDDE, 2013. Le facteur 4 en France: la division par 4 des émissions de gaz à effet de serre à l'horizon 2050, Rapport final, 230 p., document en ligne, consulté le 30-05-2017 : [http://www.cgedd.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/008378-01\\_rapport-final\\_cle0aca84.pdf](http://www.cgedd.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/008378-01_rapport-final_cle0aca84.pdf)

Molines N, Henriot C, 2017 "Aerial thermography as a diagnostic tool for Residential Building Stock Energy Assessment, within a local energy policy perspectives", 3rd Energy for Sustainability International Conference - *Designing Cities & Communities for the Future*, 8-10 février 2017, Funchal, Madère. 6p.

Nowacka A., Remondino F., 2018, "Geospatial data for energy efficiency and low carbon cities - Overview, experiences and new perspectives", *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume 42.

- Peuportier, B., Blanc-Sommereux, I., 1990, "Simulation Tool with Its Expert Interface for the Thermal Design of Multizone Buildings", *Solar Energy*, 8(2), 109–120.
- Robinson D., Haldi F., Kämpf J., *et al.*, 2009, "CitySim: Comprehensive micro-simulation of resource flows for sustainable urban planning", Eleventh International IBPSA Conference, Glasgow, Scotland, 2009
- Sousa Monteiro, C., Cerezo C., Pina A. et Ferrao P., 2015, "A method for the generation of multi-detail building archetype definitions: Application to the city of Lisbon", *Proceedings of International Conference CISBAT*, pp. 901–906.
- Theys J. et Vidalenc E., 2011. « Le territoire, un levier complémentaire pour l'atteinte du facteur 4 », *Développement durable et territoires*, Vol. 2, n° 1, document en ligne, consulté le 30-05-2017 : <http://developpementdurable.revues.org/8748>
- Wate, P., Coors, V., 2015, "3D data models for urban energy simulation". *Energy Procedia*, Vol. 78, 3372-3377.