

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

Nathalie MOLINES¹, Eduard ANTALUCA¹, Carine HENRIOT¹, Fabien LAMARQUE¹

¹Université de technologie de Compiègne, AVENUES (Modélisation multi-échelle des systèmes urbains), Centre Pierre Guillaumat - CS 60 319 - 60 203 Compiègne Cedex
nathalie.molines@utc.fr

Abstract - 200 words maximum

Les déperditions thermiques de l'environnement bâti correspondent aux pertes de chaleur subies par un bâtiment. Ces pertes thermiques sont souvent causées par une isolation insuffisante. La limitation de ses déperditions constitue l'un des principaux leviers de la sobriété énergétique identifiés par les politiques publiques pour favoriser la territorialisation de la transition énergétique. 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, ou au niveau du bâtiment, à partir de données physiques, empiriques ou statistiques. Entre ces deux échelles, l'échelle urbaine et l'échelle de l'environnement bâti, l'échelle du quartier pourrait produire des simulations relativement précises à un coût raisonnable, en mobilisant une approche technique intégrée de l'aménagement. Notre contribution présente les résultats d'une analyse comparative de trois méthodes (une au niveau urbain et deux au niveau des quartiers) pour discuter de l'intérêt de privilégier les études thermiques à l'échelle du quartier, en vue de mieux diagnostiquer et ainsi convaincre les usagers de réaliser des travaux de rénovation énergétique.

Keywords: Analyse spatiale, déperditions énergétiques, échelle du quartier, modélisation énergétique, simulation thermique des bâtiments, BIM, SIG, Compiègne

I. INTRODUCTION

Les déperditions thermiques de l'environnement bâti constituent l'un des principaux leviers de la sobriété énergétique identifié par les politiques publiques pour favoriser la territorialisation de la transition énergétique. Premier traité multilatéral depuis le protocole de Kyoto signé en 1997 et son fameux « facteur 4 » (MEDDE 2103), les accords de Paris sur le climat signés à l'issue de la COP21 en 2015, engagent ses signataires, dont la France, à limiter le réchauffement de la température à 1,5°C. 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). Faisant suite aux accords de Paris et afin d'accompagner la mobilisation des collectivités locales, une succession de lois et de plans (loi de transition énergétique pour la croissance verte - 2015, loi climat et énergie - 2019 et la loi climat et résilience - 2021), vise la réduction drastique des émissions de gaz à effet de serre via l'amélioration généralisée du parc immobilier français et la lutte contre la précarité énergétique des ménages. L'objectif est que l'ensemble du parc bâti atteigne un niveau de performance énergétique conforme aux normes "bâtiment basse consommation" (BBC) à l'horizon 2050. Deux principaux leviers sont mobilisés : l'encadrement des consommations énergétiques des constructions neuves et la rénovation énergétique massive du parc ancien avec comme objectif la suppression des « passoires thermiques » (Rudinger, 2022).

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 bloc de bâtiments identiques (Maïza, 2007 ; Arantes et al., 2016). Le quartier est aujourd'hui une échelle de plus en plus privilégiée par les collectivités pour la mise en place de leur politique de transition énergétique car cette échelle ouvre de nouveaux leviers d'action pour la réduction des consommations d'énergie et des émissions de CO₂ : priorisation des interventions, mutualisation des systèmes de chauffage, économies d'échelle ... (Marty-Jourjon, 2021).

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 ; Artiges et al. 2021), 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. Par exemple, l'utilisation de la thermographie aérienne en milieu urbain donne

un aperçu global 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, cette technique 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 échelles, l'échelle urbaine et l'échelle de l'environnement bâti, l'échelle 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.

Dès lors, une évaluation des déperditions énergétiques, au plus proche du réel, offre une aide quantitative tangible pour aider les collectivités locales et les particuliers à prendre des décisions pour mettre en place une sobriété énergétique nécessaire à moyenne échéance et devenue immédiatement cruciale durant l'hiver 2022-2023. Or, seule une approche technique intégrée de l'aménagement, soit une approche pluridisciplinaire, mobilisant à la fois des compétences techniques relevant des sciences humaines et sociales comme la géographie et l'urbanisme et des sciences pour l'ingénieur comme la modélisation et le bâtiment permet de rendre compte d'une cartographie et d'une modélisation au plus proche du réel. Nous faisons ainsi l'hypothèse que l'échelle intermédiaire du quartier constitue une échelle probante pour l'étude thermique et l'aide à la décision territoriale.

Pour cela, nous présentons dans ce document les résultats d'une analyse comparative de méthodes complémentaires exploitant les potentialités de divers outils numériques, rattachés aux sciences de l'ingénieur ou aux sciences humaines, afin de déterminer la pertinence et la faisabilité de simulations thermiques à des échelles géographiques intermédiaires. Trois méthodes seront présentées : une au niveau urbain et deux au niveau des quartiers (avec et sans données thermiques précises). 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. A chaque échelle, divers niveaux de précisions seront apportés aux simulations afin d'évaluer la répliquabilité des études menées sous plus ou moins d'hypothèses simplificatrices. 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.).

II. LA MODELISATION DES DEPERDITIONS THERMIQUES

A. Des échelles

La modélisation et la cartographie des déperditions énergétiques offre un soutien quantitatif concret pour aider les villes à prendre des décisions (Caputo et al., 2013). Elle s'effectue 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).

B. Des données

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 individuelles, 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 and 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 un territoire trop étendu. L'autre solution consiste à constituer une typologie des différentes formes urbaines présentes sur le territoire. On parle de construction d'archétypes (Sousa Monteiro et al., 2015, Ali et al., 2018 ; Artiges et al., 2021). 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 du bloc 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.

III. L'ECHELLE DU QUARTIER, UN BON COMPROMIS POUR LA MODELISATION DES DEPERDITIONS THERMIQUES ?

A. Présentation du projet

Cette communication présente les premiers résultats d'une recherche exploratoire effectuée sur le territoire de l'agglomération de Compiègne. L'agglomération de la région 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 comportant une forte proportion de bâtiments anciens.

L'empreinte carbone de l'ARC est très mauvaise : 8,1 t. d'équivalent CO₂ 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 commandé en 2015 un relevé thermographique aérien de son agglomération, puis a mis en place en 2016, sous l'impulsion de l'ADEME et de l'ancienne région Picardie, un guichet unique de l'amélioration de l'habitat appelé « Habitat Rénové ». L'ARC s'est également tourné vers le laboratoire Avenues 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). Cette image thermographique aérienne 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 : modélisation fine des bâtiments, intégration de nouvelles informations dans la base de données, intégration d'un modèle thermique urbain doivent ensuite être effectuées. 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.

B. 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).

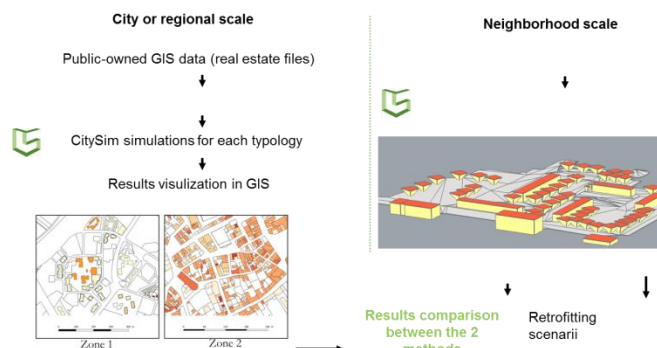


Figure 1. Trois protocoles - deux échelles

- La première méthode modélise le territoire à l'échelle de la ville et utilise une géométrie et environnement simplifiés. Une typologie simplifiée des bâtiments a été établie à partir des données MAJIC (Mise À Jour des Informations Cadastreales) 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). Ces données permettent la simulation simplifiée 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 (des recherches sur l'architecture à Compiègne, effectuées antérieurement, servent de base aux simulations). Les résultats de la simulation

sont exportés dans le SIG, ce qui permet de visualiser, à l'échelle de l'agglomération, 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 fournie. 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 (Fig. 2).

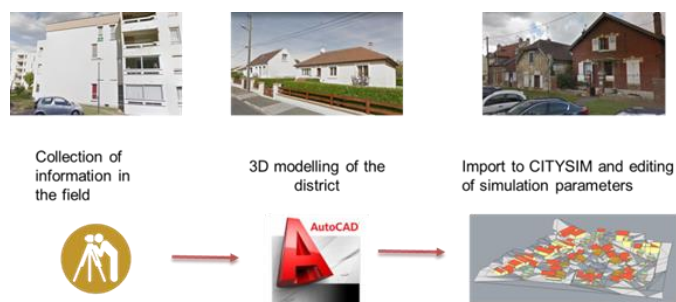


Figure 2. Protocole 2 pour l'analyse simplifiée à l'échelle du quartier

Cette simulation intègre 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 (Fig. 3).



Figure 3. Lots étudiés dans la 3ème simulation

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 1970. 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 la toiture, isolation intérieure, isolation extérieure, remplacement des huisseries....

C. Résultats

Une fois les simulations thermiques réalisées à partir de ces 3 modèles de données, nous avons pu comparer les résultats obtenus. 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 MAJIC de la Direction Générale des Finances Publiques (DGFIP) 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 (on ne peut pas prendre en compte des travaux de rénovation effectués sur un seul bâtiment).
- 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 de la ville 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 trouve sa place entre celle réalisée à l'échelle de l'agglomération et, éventuellement, une autre étude poussée à l'échelle du bâtiment.

IV. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

A l'heure où la rénovation énergétique du parc résidentiel est une priorité écologique et financière nationale et locale, la combinaison d'outils numériques relevant de compétences métiers différentes (analyse spatiale, modélisation et simulation thermique) constitue, selon nous, une démarche pertinente pour convaincre les propriétaires d'engager des travaux de rénovation énergétique. 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 un 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 urbain de l'université de technologie de Compiègne ayant collaboré à ce travail et en particulier Thibaud BILLOTEAU et Julien DESPAX. Il remercie également l'ARC pour leur confiance et pour la mise à disposition des données nécessaires à cette étude ainsi que Jérôme KÄMPF (Idiap Research Institute - EPFL) pour la mise à disposition de CITYSIM.

REFERENCES

- [1] ALI U., HARIS SHAMSI M., HOARE C., O'DONNELL J., (2018), GIS-Based Residential Building Energy Modeling at District Scale, 4th Building Simulation and Optimization Conference, Cambridge, UK: 11-12 September 2018
- [2] 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>
- [3] Artiges, N., Rouchier, S. & Delinchant, B. (2021), Utilisation de certificats énergétiques et d'archétypes pour la génération de modèles thermiques de bâtiments. In IBPSA. : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03369663/document>
- [4] BAHU, J.M., KOCH, A., KREMERS, E., MURSHED, S.M., (2013), Towards a 3D spatial urban energy modelling approach. ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci., II-2/W1, 33–41.
- [5] BECKMAN, W. A., BROMAN, L., FIKSEL, A., KLEIN S. A., LINDBERG, E., SCHULER, M. and THORNTON, J. (1994), TRNSYS The most complete solar energy system modeling and simulation software. Renewable Energy, 5(1-4), 486-488.
- [6] 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.
- [7] CAPUTO, P., COSTA, G. FERRARI, S. (2013), A supporting method for defining energy strategies in the building sector at urban scale. Energy Policy, 55, 261–270.
- [8] CHANARD C. DE SEDE-MARCEAU MH, 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>
- [9] CRAWLEY, D. B., LAWRIE, L. K., WINKELMANN, F. C., BUHL, W. F., HUANG, Y. J., PEDERSEN, C. O., GLAZER, J. (2001). EnergyPlus: Creating a new-generation building energy simulation program, Energy and Buildings, 33(4), 2001, p. 319-331
- [10] 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
- [11] HENRIOT C., ARTIS A., MOLINES N., SEIGNEURET N., ANTALUCA E., LAMARQUE F. ET E. MARTIN (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.
- [12] KAVGIC, M., MAVROGIANNI A., MUMOVIC, D., SUMMERFIELD, A., STEVANOVIC, Z., & DJUROVIC-PETROVIC, M. (2010). A review of bottom-up building stock models for energy consumption in the residential sector. *Building and Environment*, 45(7), 1683–1697.
 - [13] MAGYARI, Abel; VIZI KATA Veronica, (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.
 - [14] MAÏZIA, Mindjid, (2007). L'énergétique urbaine et la morphologie des villes, *Les annales de la recherche urbaine*, n°103 : 79-85.
 - [15] Marty-Jourjon, V. (2021). Modélisation pour le suivi et l'amélioration des performances énergétiques des quartiers (Doctoral dissertation, Université Paris sciences et lettres). <https://www.theses.fr/2021UPSLM061.pdf>
 - [16] 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
 - [17] 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.
 - [18] MOLINES N, HENRIOT C, (2019). La thermographie aérienne comme outil de diagnostic de la performance énergétique du parc résidentiel de l'agglomération de Compiègne, des déperditions de chaleur. *Knowledge city, Smart city: vers une ville écosoutenable*, 71-84.
 - [19] NATIONS UNIES, (2015), « Accord de Paris », Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques, 5 p.
 - [20] 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,
 - [21] PEUPORTIER, B., BLANC-SOMMERREUX, I. (1990), Simulation Tool with Its Expert Interface for the Thermal Design of Multizone Buildings. *Solar Energy*, 8(2), 109–120.
 - [22] ROBINSON, D., HALDI, F., KÄMPF, J., LEROUX, P., PEREZ, D., RASHEED, A. and WILKE, U., (2009), CitySim: Comprehensive micro-simulation of resource flows for sustainable urban planning, Eleventh International IBPSA Conference, Glasgow, Scotland, 2009
 - [23] RÜDINGER A., (2022) , Propositions pour une politique de rénovation énergétique ambitieuse », *Annales des Mines - Réalités industrielles*, 2022/2 (Mai 2022), p. 22-26. DOI : 10.3917/rindu1.222.0022. URL : <https://www.cairn.info/revue-realites-industrielles-2022-2-page-22.htm>
 - [24] SOUSA MONTEIRO, C., CEREZO C., PINA A. and FERRAO P., (2015), A method for the generation of multi-detail building archetype definitions: Application to the city of lisbon. In: *Proceedings of International Conference CISBAT*, pp. 901–906.
 - [25] THEYS Jacques et Éric VIDALENC, (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>
 - [26] WATE, P., COORS, V., (2015), 3D data models for urban energy simulation. *Energy Procedia*, Vol. 78, 3372-3377.