



**HAL**  
open science

## Climat urbain et besoins en chauffage des bâtiments

Nadège Blond, Manon Kohler, Alain Clappier

► **To cite this version:**

Nadège Blond, Manon Kohler, Alain Clappier. Climat urbain et besoins en chauffage des bâtiments. 2021. hal-03448009

**HAL Id: hal-03448009**

**<https://hal.science/hal-03448009>**

Submitted on 24 Nov 2021

**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.



## Climat urbain et besoins en chauffage des bâtiments

L'énergie consommée en milieu urbain l'est essentiellement dans les secteurs du bâtiment (résidentiel/tertiaire) et des transports (respectivement environ 40% et 30% de la part totale). L'utilisation d'énergie dans les bâtiments concerne principalement la régulation thermique\* : 75 % de l'énergie servent au chauffage et à la climatisation. Cette activité est responsable d'environ 25 % du total des émissions de CO<sub>2</sub> (contre 28 % pour les transports). L'évaluation des besoins en énergie des bâtiments est un enjeu majeur des planifications territoriales et des politiques de transition énergétique pour suivre aussi bien la trajectoire des réductions des consommations/besoins en énergie et des émissions de polluants, que pour aider au dimensionnement de nouvelles infrastructures de productions d'énergies renouvelables.

### Comment évalue-t-on les besoins énergétiques des bâtiments ?

L'évaluation des besoins énergétiques des bâtiments s'appuie le plus souvent sur des méthodes basées sur les bâtiments pris individuellement. Certaines méthodes permettent de calculer ces besoins sur des quartiers composés de plusieurs bâtiments et rues en détaillant le rayonnement solaire reçu par chacun au cours d'une journée et les effets d'ombrage. Le bilan énergétique du bâtiment est alors estimé en prenant en considération la dissipation de l'énergie solaire absorbée par le bâtiment sous l'effet du vent. Ce vent est issu d'une seule mesure faite hors contexte urbain ; tandis que ce dernier donne des caractéristiques particulières aux écoulements d'air.

L'influence des bâtiments sur les écoulements d'air est non négligeable car ces bâtiments tendent à freiner les écoulements d'air contribuant ainsi au réchauffement local de l'atmosphère. Un îlot de chaleur urbain (ICU)\*, c'est-à-dire un réchauffement global de l'agglomération par rapport à son environnement peut même être observé, le plus souvent la nuit et l'été lors de ciels dégagés et de journées faiblement venteuses. Si une ville est située dans

une région froide, l'ICU généré permet de faire diminuer la demande énergétique nécessaire au chauffage des bâtiments l'hiver. A l'inverse, l'ICU d'une ville située dans une région chaude amplifiera le besoin en énergie nécessaire au refroidissement des bâtiments l'été.

Cet article présente des travaux de recherche qui ont pour objectif d'améliorer la modélisation des interactions bâtiments-atmosphère.

### Climat urbain : l'importance de la modélisation

Les besoins en énergie des bâtiments dépendent à la fois des caractéristiques des bâtiments (matériaux de construction, système de chauffage, de ventilation, de climatisation), de leur agencement, des caractéristiques des rues (matériaux de construction, dimension), du rayonnement (insolation) et de l'atmosphère (insolation, température, vitesse du vent, etc.).

Les bilans énergétiques de l'atmosphère (quantité de chaleur entrante et sortante du système) et des bâtiments sont si étroitement liés et ils dépendent d'un nombre tellement important de paramètres que les modèles de simulation numériques s'avèrent indispensables pour estimer les besoins énergétiques des bâtiments actuels et prospectifs. Les modèles permettent également d'étudier l'interaction de l'aménagement urbain sur l'atmosphère, notamment en été où la chaleur additionnelle dégagée par les bâtiments concourt à des conditions de stress thermique. Il existe actuellement trois types de modèles numériques pour simuler les interactions entre la ville et l'atmosphère et les besoins énergétiques des bâtiments : les modèles d'énergie des bâtiments, les modèles micro-échelles et les modèles météorologiques méso-échelles. Chacun de ces modèles présente des avantages et des inconvénients en termes de précision des données d'entrée et des résultats, et en temps de calcul (plus le calcul doit être précis spatialement, plus le temps de calcul est important) :

\* voir glossaire



- Les modèles d'énergie des bâtiments permettent de prévoir les dépenses énergétiques d'un bâtiment individuel. La structure architecturale du bâtiment, les matériaux, et leurs assemblages sont décrits très finement. Le calcul des besoins en énergie du bâtiment sont calculés à partir du rayonnement solaire reçu et d'un profil météorologique (vent température, etc). Cependant les simulations sont imprécises car les effets de l'environnement du bâtiment ne sont pas pris en compte (exemple : effet d'ombrage d'autres bâtiments, effet de la ville entière sur le vent, etc). Or ces effets influent directement sur les caractéristiques dynamiques de l'air et de la chaleur dans la rue.

- Les modèles micro-échelles sont aussi capables de représenter avec précision un quartier composé de quelques rues et bâtiments et ainsi de répondre à la nécessité de prendre en compte l'environnement du bâtiment dans le calcul du bilan énergétique de celui-ci. Néanmoins, pour la plupart d'entre eux, ces modèles concernent surtout le calcul de la radiation thermique et sont souvent couplés avec des estimations imprécises de la météorologie locale (observations météorologiques lointaines du quartier d'étude). Peu de modèles intègrent en plus la circulation atmosphérique micro-échelles et ceux qui existent ne sont pas encore pleinement validés. Tous couvrent des domaines de quelques centaines de mètres car leur utilisation sur des domaines plus larges nécessiterait des temps de calcul trop importants. Cette restriction les rend incapables de simuler l'effet de l'ICU sur les dépenses énergétiques des bâtiments et les circulations atmosphériques associées.

- Les modèles météorologiques méso-échelles peuvent, eux, prendre en compte des villes entières ainsi que leurs alentours sur des domaines de quelques centaines de kilomètres carrés. Ils parviennent ainsi à simuler l'ICU et les circulations

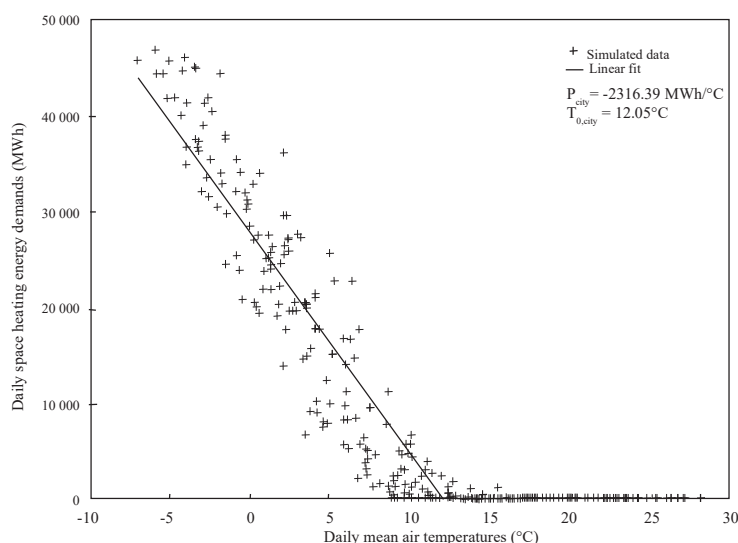
atmosphériques générées entre la ville et ses alentours. En revanche, la résolution de leur maillage (quelques centaines de mètres ou quelques kilomètres) ne leur permet pas de représenter avec précision les bâtiments de la ville et la végétation présente. Dans le meilleur des cas, les bâtiments sont modélisés comme un ensemble répétitif d'obstacles réguliers dont les effets seront paramétrés à l'intérieur d'une maille.

La recherche de compromis entre la précision du rendu et le temps de calcul fait l'objet des recherches développées dans la ZAEU.

## Calculer les besoins en énergie en tenant compte du climat urbain

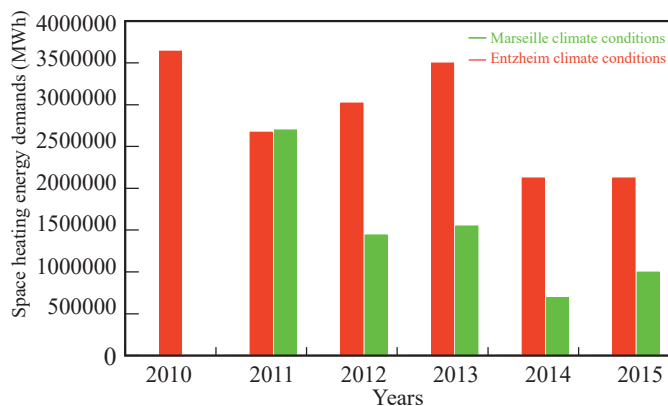
Au Laboratoire Image, ville, environnement (LIVE), des chercheurs développent des modèles météorologiques méso-échelles qui permettent non seulement de calculer l'effet des bâtiments sur la dynamique atmosphérique, mais aussi l'effet de cette dynamique sur le bilan énergétique des bâtiments. Menée en collaboration avec l'Eurométropole de Strasbourg et ATMO Grand Est, la thèse de Manon Kohler (2015) a permis une application du modèle météorologique méso-échelle WRF-BEP-BEM (tableau 1) pour calculer les besoins énergétiques journaliers des bâtiments de l'Eurométropole de Strasbourg en tenant compte de l'îlot de chaleur urbain. Il a été noté que ces besoins varient de manière quasi-linéaire avec la température journalière moyenne de la ville et que des simulations sur quelques mois seulement suffisent pour en donner une évaluation pour toute une année par une méthode adaptée de celle du degré-jour (fig. 1).

Les besoins énergétiques calculés par cette méthode, dite méthode du degré-jour, sont d'environ 20 % plus faibles que ceux estimés par ATMO Grand Est (Source d'information ASPA - 12121203 - TD).



**Figure 1 :** Besoins énergétiques journaliers en chauffage simulés (signes +) en MWh (ou demande en chauffage journalière DCJ) en fonction des températures moyennes journalières de l'air de l'Eurométropole de Strasbourg en °C ( $T_{\text{moy}}$ ). La ligne pleine représente le modèle linéaire utilisé :  $DCJ \text{ (MWh)} = \text{MAX}(P_{\text{city}} \cdot (T_{\text{moy}} - T_{0,\text{city}}), 0)$ .  $P_{\text{city}}$  correspond à la demande en chauffage des bâtiments pour chaque refroidissement d'1°C de l'air.  $T_{0,\text{city}}$  représente la température de référence à laquelle les besoins en chauffage sont nuls. © Kohler et al. 2016





**Figure 2** : Besoins énergétiques annuels en chauffage simulés en considérant soit les conditions climatiques actuelles de l’Eurométropole de Strasbourg (en rouge), soit les conditions de la ville de Marseille (en vert, attendues en 2100 à Strasbourg) © Kohler et al. 2016

deux méthodes étaient principalement dues à la donnée de température extérieure, utilisée dans le calcul, à partir de laquelle le bâtiment est en équilibre thermique avec son environnement. Déduite des propriétés thermiques des bâtiments et des interactions de celui-ci avec l’îlot de chaleur, la méthode du degré-jour permet de définir des périodes de chauffage plus réalistes que celles définies a priori dans les calculs d’ATMO Grand Est. Ce travail a permis de souligner l’importance de la prise en compte de l’îlot de chaleur dans le calcul des besoins énergétiques des bâtiments. La méthodologie a aussi permis de montrer que si les conditions climatiques devaient se rapprocher de celles de la ville de Marseille en 2100 (ou avant), les besoins d’énergie pour le chauffage pourraient être divisés par 2 (fig. 2).

Sur la base d’une analyse de l’occupation du sol, des scénarios de développement urbain construits à l’aide du modèle SLEUTH permettent de simuler la croissance urbaine en termes de quantité de surface construite. Deux autres outils ont aidé à l’élaboration de scénarios quasi-réalistes de développement urbain compact (à l’intérieur du tissu urbain existant), en tache d’huile ou écologiques : le logiciel Graphab, un logiciel d’analyse des trames écologiques et MorphoLim, un outil permettant de délimiter l’aire des agglomérations morphologiques (tableau 1). Les résultats n’ont pas été assez concluants car la résolution spatiale du modèle climatique de 1 km<sup>2</sup> était trop faible par rapport aux légers changements d’occupation du sol qui pourraient s’opérer sur la période 2013-2030 (8 hectares/an urbanisés au détriment d’espaces en friches ou naturels). Ils ont néanmoins permis de démontrer les limites et l’efficacité des approches couplant modèles de développement urbain-modèles atmosphériques méso-échelles et d’énergie de bâtiment propices à la continuité de ces travaux vers des outils plus adaptés à l’urgence opérationnelle de l’aménagement.

## Mieux représenter les interactions bâtiments-atmosphère

La thèse de Dasaraden Mauree (2014) a permis le développement du modèle de canopée urbaine\* CIM (Canopy Interface Model, Mauree et al., 2017) (tableau 1). Ce travail à portée plus théorique que la thèse de Manon Kohler a été proposé de manière à permettre d’augmenter la résolution verticale des modèles méso-échelles sans pour autant augmenter leur temps de calcul afin de coupler ces derniers directement à des modèles atmosphériques et de bâtiments plus résolus à l’échelle du quartier (Reiminger et al., 2020). Une nouvelle version du modèle WRF-BEP-BEM, intégrant CIM (Mauree et al., 2018) permet donc maintenant de produire des profils météorologiques plus détaillés (i.e. plus résolus) dans la canopée urbaine (dans les premiers mètres de l’atmosphère jusqu’à deux fois la hauteur des bâtiments), et d’améliorer ainsi la représentation des interactions bâtiments-atmosphère.

## Conclusion

La méthode du degré-jour développée dans le cadre de la thèse de Manon Kohler (2015) permet de calculer assez rapidement les besoins énergétiques en chauffage d’une ville en tenant compte de l’îlot de chaleur urbain et plus spécifiquement des interactions entre les bâtiments et l’atmosphère. L’application de la méthode sur le territoire de l’Eurométropole de Strasbourg a permis de montrer que les méthodes traditionnelles surestiment les besoins en énergie pour le chauffage des bâtiments. Selon les prévisions de changement climatique, ces besoins en énergie pour le chauffage devraient être divisés par un facteur 2 en 2100. L’étude est en cours d’extension pour étudier les besoins énergétiques du secteur résidentiel en été (projet PRIMEQUAL ADEME AMBRES).

## Remerciements

Nous remercions les services de l’EMS, d’ATMO Grand Est et Météo France pour leur contribution dans la réalisation de ces études ainsi que la ZAEU pour le financement de deux projets sur le sujet.

## Glossaire

**Canopée urbaine** : partie basse de l’atmosphère fortement influencée par les bâtiments s’étendant de la surface de la rue au faite des toits.

**Îlot de chaleur urbain (ICU)** : réchauffement global d’une agglomération par rapport à son environnement lié à l’imperméabilisation des sols et ses activités économiques.

**Régulation thermique** : ensemble des mécanismes qui permet à un système de se maintenir à une température souhaitée.

Modèles et méthodes	Présentation
<b>Modèle WRF-BEP-BEM</b>	Le modèle WRF est un modèle météorologique open-source ( <a href="https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/">https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/</a> ) qui permet de simuler la météorologie sur une région. Il est développé au NCAR (Boulder, USA), auquel la communauté internationale de recherche contribue. Le module BEP inclus dans WRF permet de calculer l'effet de bâtiment sur l'atmosphère. Le modèle BEM permet de calculer le bilan énergétique d'un bâtiment. BEP et BEM ont été construits par A. Martilli (CIEMAT, Espagne) et Alain Clappier (LIVE, Strasbourg) à l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL).
<b>Modèle de canopée urbaine CIM</b>	Modèle développé au LIVE (Mauree et al, 2018) qui permet de calculer l'effet d'un quartier de bâtiment sur les profils verticaux du vent, température, etc.
<b>Méthode Degré-jour</b>	Le degré-jour est la différence entre la température extérieure et une température de référence à partir de laquelle le bâtiment est en équilibre thermique (besoin en énergie nul). Les consommations d'énergie thermique pour maintenir un bâtiment confortable sont souvent calculées en considérant leur dépendance linéaire au degré-jour sur une période de temps.
<b>Modèle SLEUTH</b>	Le modèle SLEUTH ( <a href="http://www.ncgia.ucsb.edu/projects/gig/Dnload/download.htm">http://www.ncgia.ucsb.edu/projects/gig/Dnload/download.htm</a> ) est un automate cellulaire dédié à la simulation dynamique de l'expansion urbaine selon quatre formes d'expansion (1) en continuité de l'urbain existant, (2) par création de nouveaux centres ou foyers urbains, (3) par diffusion et (4) le long des axes routiers (« en gant »).
<b>Modèle Graphab</b>	Le logiciel Graphab ( <a href="https://sourcesup.renater.fr/www/graphab/fr/home.html">https://sourcesup.renater.fr/www/graphab/fr/home.html</a> ) permet d'analyser la trame d'un paysage via l'occupation du sol ; et d'identifier les réseaux écologiques d'une espèce animale à partir de la théorie des graphes. Il permet notamment de déterminer quels habitats ou zones forestières sont à préserver pour maintenir une trame fonctionnelle.
<b>Modèle MorphoLim</b>	Le logiciel MorphoLim ( <a href="http://spatial-modelling.info/MorphoLim-Identifying-city">http://spatial-modelling.info/MorphoLim-Identifying-city</a> ) est dédié à l'identification de la limite morphologique des agglomérations urbaines. La méthodologie développée présente l'intérêt de ne pas définir a priori un seuil maximal de distance entre les éléments bâtis considérés : ce seuil émerge de l'analyse et est propre à chaque zone d'étude considérée. La méthodologie fait appel aux concepts et outils de la géométrie fractale.

Tableau 1 : Modèles et méthodes.

### Pour aller plus loin

Koehler M. (2015) Apport de la modélisation météorologique à l'évaluation des besoins énergétiques des bâtiments, **Thèse en Sciences de la Terre et de l'Environnement**, Université de Strasbourg, [https://publication-theses.unistra.fr/public/theses\\_doctorat/2015/Koehler\\_Manon\\_2015\\_ED413.pdf](https://publication-theses.unistra.fr/public/theses_doctorat/2015/Koehler_Manon_2015_ED413.pdf).

Kohler, M., N. Blond, A. Clappier (2016) A city scale degree-day method to assess building space heating energy demands in Strasbourg Eurometropolis (France), **Applied Energy**, Volume 184, 15 December 2016, Pages 40-54, ISSN 0306-2619, <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.09.075>.

Kohler M., C. Tannier, N. Blond, R. Aguejdad, A. Clappier (2016) Impacts of several urban-sprawl countermeasures on building (space heating) energy demands and urban heat island intensities. A case study, **Urban Climate**, Janvier 2016, <http://dx.doi.org/10.1016/j.uclim.2016.12.006>.

Mauree D. (2014) Development of a multi-scale meteorological system to improve urban climate modeling, **Thèse en Sciences de la Terre et de l'Environnement**, Université de Strasbourg, [https://publication-theses.unistra.fr/public/theses\\_doctorat/2014/Mauree\\_Dasaraden\\_2014\\_ED413.pdf](https://publication-theses.unistra.fr/public/theses_doctorat/2014/Mauree_Dasaraden_2014_ED413.pdf).

Mauree D., N. Blond, M. Kohler, A. Clappier (2017) On the coherence in the boundary layer: development of a Canopy Interface Model, **Front. Earth Sci.**, 05 January 2017, 4, 109, <https://doi.org/10.3389/feart.2016.00109>.

Mauree D., N. Blond, A. Clappier (2018) Multi-scale modeling of the urban meteorology: Integration of a new canopy model in the WRF model, **Urban Climate**, 26, 60-75. [10.1016/j.uclim.2018.08.002](https://doi.org/10.1016/j.uclim.2018.08.002);

Reiminger N. (2020), Modélisation 3D de la pollution atmosphérique à l'échelle urbaine, **Thèse de doctorat en mécanique des fluides**, Université de Strasbourg, <http://www.theses.fr/s186227>.

### Auteurs et contacts

**Nadège Blond**, Chercheur CNRS, Laboratoire Image Ville Environnement ([nadège.blond@live-cnrs.unistra.fr](mailto:nadège.blond@live-cnrs.unistra.fr)).

**Manon Kohler**, Attachée temporaire d'enseignement et de recherche, Faculté de géographie et d'aménagement de Strasbourg ([1kohlerm@gmail.com](mailto:1kohlerm@gmail.com)).

**Alain Clappier**, Professeur de l'Université de Strasbourg, Laboratoire Image Ville Environnement ([alain.clappier@live-cnrs.unistra.fr](mailto:alain.clappier@live-cnrs.unistra.fr)).

### Accès aux données

Les données relatives au suivi scientifique sont disponibles auprès des auteurs.

Les demandes doivent leur être adressées.



#### Conception graphique :

Zone Atelier Environnementale Urbaine, ZAEU,  
Maison Interuniversitaire des Sciences de l'Homme  
- Alsace (MISHA)

5, allée du Général Rouvillois  
CS 50008 67083 Strasbourg cedex

Mise en page : Lisa Renard ; Graphisme : Adrien  
Opeicle, JY's., @AMirdass