



HAL
open science

Caractérisation du tissu urbain français pour la modélisation du climat urbain et de son interaction avec la consommation énergétique dans les bâtiments.

Robert Schoetter, Valéry Masson, Alexandre Amossé, Jérémy Bernard, Erwan Bocher, Marion Bonhomme, Alexis Bourgeois, Serge Faraut, Thomas Gardes, Marine Goret, et al.

► To cite this version:

Robert Schoetter, Valéry Masson, Alexandre Amossé, Jérémy Bernard, Erwan Bocher, et al.. Caractérisation du tissu urbain français pour la modélisation du climat urbain et de son interaction avec la consommation énergétique dans les bâtiments.. *La Météorologie*, 2019, 105, pp.48-57. 10.4267/2042/70169 . halshs-02157105

HAL Id: halshs-02157105

<https://shs.hal.science/halshs-02157105>

Submitted on 4 Jun 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.



Distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

Caractérisation du tissu urbain français pour la modélisation du climat urbain et de son interaction avec la consommation énergétique dans les bâtiments

Robert Schoetter¹, Valéry Masson¹, Alexandre Amossé², Jérémy Bernard³, Erwan Bocher³, Marion Bonhomme², Alexis Bourgeois⁴, Serge Faraut², Thomas Gardes⁵, Marine Goret¹, Julia Hidalgo⁶, Jean-Pierre Lévy⁴, Nathalie Long⁵, Margot Pellegrino⁷, Gwendall Petit³, Christine Plumejeaud⁵, Cyril Poitevin⁵, Nathalie Tornay²

1. Centre national de recherches météorologiques, Météo-France/CNRS, Toulouse
2. Laboratoire de recherche en architecture, École nationale supérieure d'architecture, Toulouse
3. Laboratoire des sciences et techniques de l'information, de la communication et de la connaissance, Université Bretagne Sud / CNRS, Vannes
4. Laboratoire techniques, territoires et sociétés, École des Ponts ParisTech / CNRS, Université Paris-Est Marne-la-Vallée, Champs-sur-Marne
5. Laboratoire littoral, environnement et sociétés, Université de La Rochelle / CNRS, La Rochelle
6. Laboratoire interdisciplinaire solidarités, sociétés, territoires, Université de Toulouse Jean Jaurès / CNRS, Toulouse
7. Laboratoire d'urbanisme, Université Paris-Est Marne-la-Vallée, Champs-sur-Marne

robert.schoetter@meteo.fr

Résumé

Cet article présente l'assemblage d'un jeu de données caractérisant les villes françaises en termes de morphologie, matériaux de construction et comportements énergétiques. Il expose une amélioration du modèle de climat urbain TEB pour prendre en compte une variété d'usages et de comportements énergétiques à l'échelle du quartier. Ces développements permettent de modéliser le climat urbain et son interaction avec la consommation énergétique dans les bâtiments et aideront à mieux quantifier l'effet de mesures d'atténuation et d'adaptation face au changement climatique dans les villes françaises.

Les villes influencent le climat local, car elles modifient les bilans d'énergie, d'eau et de quantité de mouvement à l'interface entre la surface de la Terre et l'atmosphère. Les villes sont moins végétalisées que les milieux ruraux, ce qui réduit le flux de chaleur latente dû à l'évapotranspiration. Les matériaux utilisés dans la construction stockent la chaleur le jour et la restituent la nuit. La structure tridimensionnelle des bâtiments cause des ombrages du rayonnement solaire et piège le rayonnement terrestre. Les activités des habitants des villes engendrent un flux de chaleur anthropique. Celui-ci est dû aux rejets de chaleur par le chauffage, la climatisation, l'électroménager, l'eau chaude sanitaire, le trafic, les activités industrielles et le métabolisme

des citoyens eux-mêmes. Le flux anthropique peut constituer une partie importante du bilan d'énergie dans les villes très denses (comme c'est le cas à Tokyo ou Paris *intra muros*) et pendant la saison d'hiver pour les villes de moyennes et de hautes latitudes. Les secteurs du bâtiment, du transport et de l'industrie sont respectivement responsables de 45, 33 et 19 % de la consommation en énergie finale en France¹. Le secteur du bâtiment est donc responsable de la partie la plus grande du flux de chaleur anthropique, surtout dans les centres-villes.

1. Chiffres de 2015, <https://www.connaissance-desenergies.org/fiche-pedagogique/mix-energetique-de-la-france>

Abstract

A description of French cities for the modeling of urban climate and its interaction with building energy consumption

This article presents the construction of a dataset describing French cities in terms of morphology, construction materials, and human behaviour related to building energy consumption. It describes an improvement of the urban climate model TEB to take into account the variety of building use and human behaviour at district scale. These developments are useful for modeling the urban climate and its interaction with building energy consumption and can help to better quantify the effect of climate change mitigation and adaptation measures in French cities.

Le phénomène de climat urbain le mieux documenté est l'îlot de chaleur urbain (ICU) qui peut atteindre 5 à 10 K. Il est plus marqué la nuit que le jour et peut accentuer une surmortalité lors de situations caniculaires. L'ICU peut réduire la demande d'énergie en chauffage et augmenter celle en climatisation de 10 à 30 % pour des bâtiments situés dans les agglomérations urbaines. De plus, l'ICU dépend aussi du flux anthropique. Pour des villes comme Tokyo et Paris, il a été mis en évidence que les rejets de chaleur dus à la climatisation peuvent augmenter la température de 0,5 à 2 K. Des stratégies comme la végétalisation des villes, l'utilisation de matériaux de construction à albédo élevé, la rénovation des bâtiments, le changement de pratiques énergétiques sont prometteuses pour contribuer à réduire les consommations énergétiques (contribution à l'atténuation du changement climatique) et le stress thermique lors de situations caniculaires (contribution à l'adaptation aux effets du changement climatique).

Les modèles numériques de simulation de l'atmosphère sont utilisés pour quantifier l'effet de mesures d'atténuation et d'adaptation. La modélisation du climat urbain peut être effectuée à la micro-échelle (résolution d'environ 1 m) ou à la moyenne échelle (résolution entre 100 m et 1 km). En raison de la contrainte imposée par les ressources de calcul limitées, la modélisation à micro-échelle est restreinte à des domaines recouvrant un quartier d'une ville, tandis que la modélisation à moyenne échelle permet de simuler toute une agglomération urbaine et son interaction avec les milieux ruraux avoisinants. Contrairement à la micro-échelle, où la configuration des bâtiments n'est pas simplifiée, l'effet des bâtiments sur l'atmosphère est pris en compte à la moyenne échelle *via* des paramétrisations de ville comme le *Town Energy Balance* (TEB) ou le *Building Effect Parametrisation* (BEP). Une telle paramétrisation représente la modification du rayonnement solaire et infrarouge par la structure tridimensionnelle des bâtiments et résout les bilans d'énergie, d'eau et de quantité de mouvement séparément pour les toits, les murs, les routes et la végétation urbaine en tenant compte des différences de leurs propriétés physiques.

Le tissu urbain doit être caractérisé de manière précise afin de permettre la représentation détaillée des interactions atmosphère-ville faite par les

paramétrisations de ville. La description concerne la morphologie (fraction du sol occupée par des bâtiments, hauteur et forme des bâtiments, surface de murs extérieurs...), les matériaux de construction, les usages et comportements énergétiques (chauffage, électroménager...) et la végétation urbaine (arbres de rue, parcs, jardins privés...):

- les paramètres morphologiques déterminent la quantité totale de surfaces artificielles (toits, murs, routes) qui interagissent avec l'atmosphère et permettent également de déterminer le volume d'atmosphère occupé par les bâtiments. La morphologie influence aussi le bilan radiatif (ombrage du rayonnement solaire et piégeage du rayonnement infrarouge) et l'écoulement (rugosité du milieu urbain);
- les propriétés optiques des matériaux de construction comme la réflectivité du rayonnement solaire (albédo) et l'émissivité du rayonnement terrestre influencent le bilan radiatif urbain, tandis que leur conductivité thermique et capacité calorifique sont pertinents pour le flux de stockage;
- les paramètres liés aux usages et comportements énergétiques influencent surtout la consommation énergétique dans les bâtiments et donc le flux de chaleur anthropique;
- la végétation urbaine modifie les conditions microclimatiques surtout *via* l'évapotranspiration, l'ombrage et la modification du vent.

L'hétérogénéité des données sur le tissu urbain et leur format inadapté constituent un verrou majeur pour la modélisation du climat urbain. Les jeux de données mondiaux sur les couvertures de surface créés à partir de données satellitaires ne contiennent que des informations très rudimentaires sur les agglomérations urbaines. Par exemple, GlobCover (300 m de résolution) ne contient qu'une classe « surfaces artificielles » et les ESA-CCI (300 m) une classe « urbain ». Le Global Human Settlement Layer (38 m de résolution) distingue les routes et les zones bâties en fonction de leur densité (catégories : très faible, faible, moyen, fort) et pour la catégorie « forte densité » la hauteur des bâtiments (catégories : bas, moyen, haut, très haut). En Europe, les données CORINE Land Cover (100 m de résolution) permettent de discriminer différents types d'urbanisation comme « tissu urbain continu » et « discontinu », « zones industrielles et commerciales », mais n'inclut pas d'information sur les paramètres morphologiques. Les

données Urban Atlas contiennent des informations sur l'occupation du sol pour environ 800 (version 2012) agglomérations urbaines en Europe, ainsi que les hauteurs des bâtiments et les arbres de rue pour un sous-échantillon de ces villes. Néanmoins, les paramétrisations de ville nécessitent plus de paramètres que la seule hauteur des bâtiments.

Face à ce manque de données répondant aux besoins de la modélisation, des initiatives ont été prises par la communauté de la modélisation du climat urbain afin de mieux décrire le tissu urbain :

- aux États-Unis, le portail National Urban Database and Access Portal Tool (NUDAPT ; Ching *et al.*, 2009) rassemble des informations détaillées sur les bâtiments (obtenues par le traitement de données aéroportées lidar), les rejets de chaleur anthropiques (estimés en fonction du climat régional) et la densité de la population ;
- le projet World Urban Database and Access Portal Tools (WUDAPT ; Ching *et al.*, 2018) vise à construire un jeu de données mondial sur le tissu urbain. Les données satellitaires Landsat sont utilisées pour déterminer les zones climatiques locales (*Local Climate Zones*) par une approche de classification supervisée. Ceci permet d'obtenir une description de la morphologie, mais peu d'informations sur les matériaux de construction et les usages ;

– Jackson *et al.* (2010) ont défini 33 régions dans le monde catégorisées selon leur climat, les profils socio-économiques et les pratiques architecturales. La France se situe dans une région « Europe de l'Ouest » couvrant la France, l'Allemagne, les pays du Benelux, la Suisse et l'Autriche. Ce jeu de données ne permet donc pas de distinguer différentes pratiques architecturales à l'échelle de la France ni même de différencier avec l'Allemagne.

Les études de climat urbain menées par le Centre national de recherches météorologiques et ses partenaires depuis une dizaine d'années ont permis d'avancer, *via* des projets de recherche, sur l'évaluation des stratégies d'adaptation des villes au changement climatique, en se focalisant principalement sur deux agglomérations : Toulouse et Paris. Le projet Epicea a permis d'évaluer l'impact de scénarios d'arrosage des chaussées, de la végétation et la mise en œuvre de toits et murs plus clairs sur Paris (Koukou-Arnaud *et al.*, 2014). La mairie de Paris a ensuite lancé des études expérimentales sur l'arrosage des chaussées (Hendel *et al.*, 2016). Du fait de la concomitance des échelles de temps liées au changement climatique et à l'évolution des villes elles-mêmes, les projets Vurca, Muscade et Acclimat (Masson *et al.*, 2014 ; Daniel *et al.*, 2018) ont ensuite analysé les impacts croisés des évolutions climatiques et de

la croissance urbaine. Toutefois, ces projets ont montré la nécessité de disposer de données urbaines fines afin de pouvoir conduire de telles études interdisciplinaires. Ainsi, étendre ces études numériques à d'autres agglomérations françaises nécessite d'avoir accès à une description du tissu urbain homogène sur l'ensemble du territoire. Lors des études précédentes, les paramètres liés aux comportements énergétiques comme la température de consigne de chauffage étaient initialisés en fonction de l'expertise des modélisateurs et sans tenir compte de la variété sociodémographique des habitants des villes. Comme les consommations énergétiques dépendent fortement des paramètres de comportements énergétiques et sont responsables d'une part importante du flux de chaleur anthropique qui influence le climat urbain, il y a un besoin de spécifier les comportements énergétiques *via* une méthode plus fondée scientifiquement.

Caractérisation du tissu urbain des villes françaises

Données de base

En France, la disponibilité de jeux de données administratifs centralisés facilite la caractérisation du tissu urbain (figure 1) :

- l'Institut national de l'information géographique et forestière (IGN) met à disposition la BD Topo², une « description vectorielle du territoire et de ses infrastructures » qui inclut l'information sur la forme (emprise au sol, hauteur) de chaque bâtiment à précision métrique et sur des usages industriels et publics (bâtiments administratifs, d'enseignement...) et la BD Parcellaire[®] qui fournit la délimitation des parcelles cadastrales ;
- l'Institut national de la statistique et des études économiques (Insee) compile le recensement de la population³. Il contient des informations démographiques et socio-économiques sur les habitants (âge, sexe, statut familial, catégorie socio-professionnelle) et des informations sur

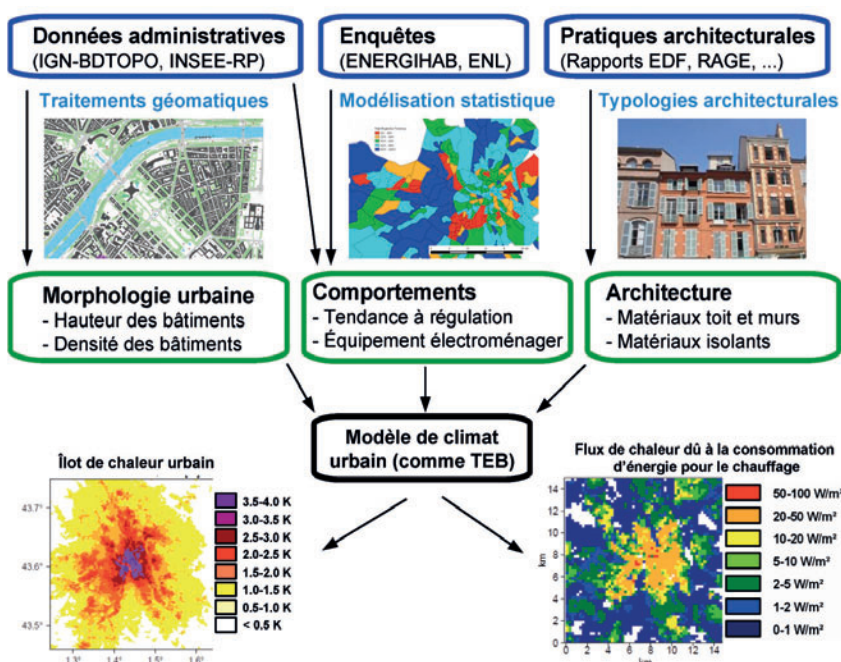


Figure 1. Méthodologie pour la caractérisation du tissu urbain en France afin de modéliser le climat urbain et son interaction avec la consommation énergétique dans les bâtiments.

2. <http://professionnels.ign.fr/bdtopo>

3. <https://www.insee.fr/fr/information/2008354> ; ~ 20 millions d'individus

les caractéristiques et l'équipement des logements (taille du logement, type et combustible du système de chauffage). Pour des raisons de protection des données, le recensement de la population est géolocalisé à l'échelle de l'Iris (c'est-à-dire un secteur comportant au moins 2 000 habitants) dans les agglomérations urbaines et à l'échelle du canton ou de la ville dans les zones rurales ;
 – la densité de la population compilée par l'Insee sur une grille régulière de 200 mètres⁴.

Ces jeux de données centralisés et recouvrant toute la France ne contiennent néanmoins pas toutes les informations nécessaires pour la modélisation du climat urbain, notamment celles sur les pratiques architecturales et les comportements énergétiques. Pour cette raison, des jeux de données supplémentaires sont utilisés :

- le recensement téléphonique Energihab recouvre 1 950 ménages dans la région Île-de-France. Un total de 362 questions ont été posées aux recensés portant sur les caractéristiques et l'utilisation des logements, la sociodémographie des habitants, la possession d'électroménager et les comportements énergétiques ;
- l'enquête nationale logement (ENL) de l'Insee contient des informations sur la dépense des ménages pour l'approvisionnement en énergie, pour

un échantillon représentatif de la population nationale (27 000 ménages en 2013) ;

- des ressources bibliographiques sur les pratiques architecturales dans différentes régions de France comme les publications d'Électricité de France (EDF) et les rapports « Règles de l'art Grenelle Environnement » (Rage).

Morphologie urbaine

Bocher *et al.* (2018) ont développé une chaîne d'analyses spatiales pour calculer à partir des données vectorielles sur la géométrie des bâtiments (BD Topo[®]) des indicateurs caractérisant la morphologie urbaine à l'échelle du quartier (figure 2). Une production de ces indicateurs sur une grille régulière (par exemple 100 m × 100 m) signifierait de faire des moyennes sur des zones qui pourraient avoir des morphologies très différentes (par exemple un bloc d'immeubles dense à côté d'un parc). Pour cette raison, les indicateurs sont calculés par unité spatiale de référence (USR). Les USR sont délimitées par les linéaires de routes, le réseau hydrographique et d'autres éléments qui segmentent l'espace. Les principaux indicateurs morphologiques sont les densités surfaciques des bâtiments et routes, la moyenne et

l'écart type de la hauteur des bâtiments, la densité surfacique des murs extérieurs, le facteur de vue du ciel (Bernard *et al.*, 2018 ; figure 3) et des indicateurs caractérisant la contiguïté et la compacité des bâtiments. À partir des indicateurs morphologiques, une classification statistique a permis de déterminer le type de bâtiment qui est pertinent pour en déduire les matériaux de construction. La figure 4 montre comme exemple le type de bâtiment majoritaire à l'échelle du quartier, la densité surfacique des bâtiments et de murs extérieurs pour Paris, Lyon et Toulouse. Le type de bâtiment met bien en évidence les immeubles continus à îlot fermé (Icif) dans les centres-villes ou les grandes zones industrielles (bâtiments d'activité) au sud et au nord-ouest de Lyon et Toulouse respectivement. La densité de bâtiments et de murs extérieurs est pertinente pour le climat urbain, car elle quantifie quelle surface de toits et de murs est en contact avec l'atmosphère respectivement. Ces deux indicateurs morphologiques⁵ sont les plus élevés dans les centres-villes.

4. <https://www.data.gouv.fr/fr/datasets/donnees-carroyees-a-200-m-sur-la-population/>
 5. Une partie des indicateurs morphologiques peut être visualisée et téléchargée sur le portail de cartographie en ligne mapuce.orbisgis.org

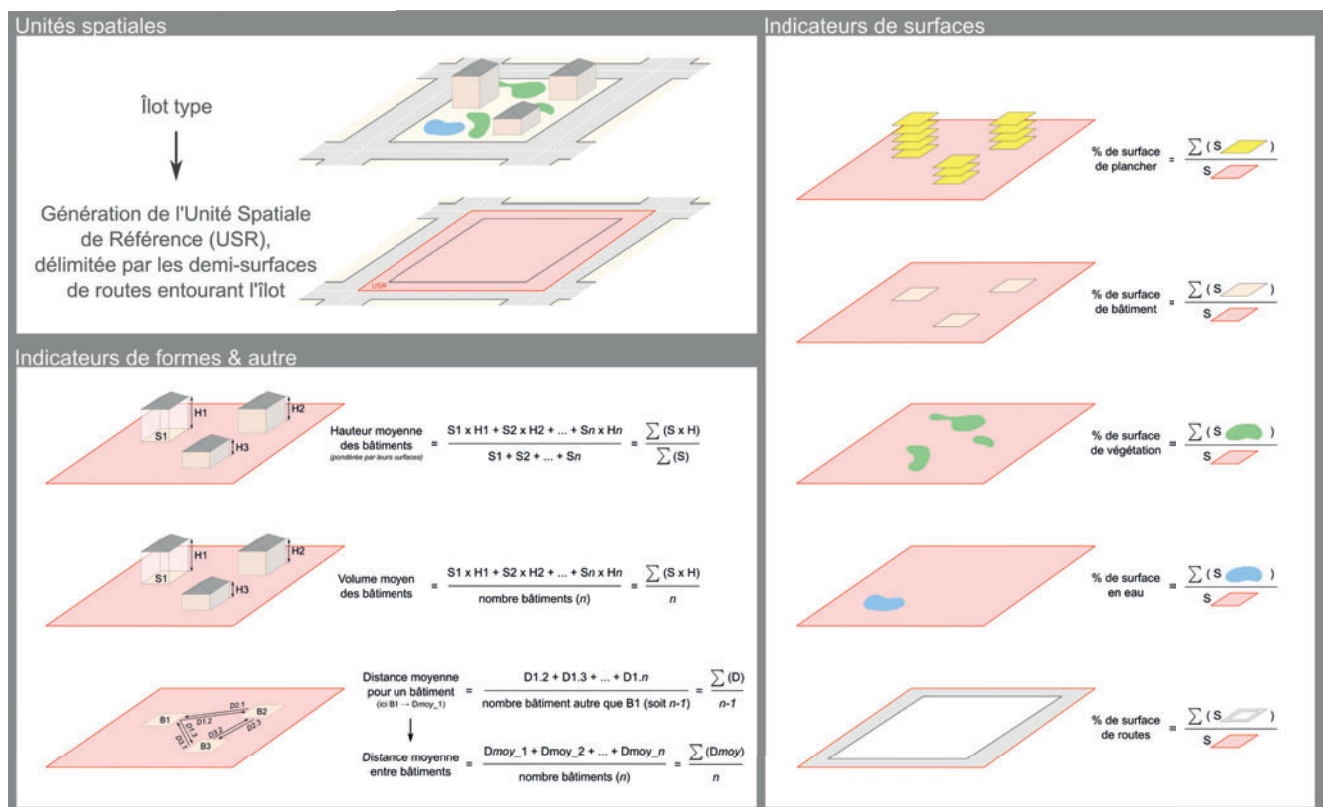


Figure 2. Calcul des indicateurs de morphologie urbaine à l'échelle du quartier à partir des caractéristiques géométriques des bâtiments.



Figure 3. Photos du type *fisheye* issues de la campagne de mesure effectuée dans le projet ANR-Eurequa pour estimer le facteur de vue du ciel depuis le sol sur un site avec un facteur de vue du ciel relativement bas (à gauche) dû à la présence de bâtiments relativement hauts ainsi que d'un arbre et sur un site avec un facteur de vue du ciel haut (à droite).

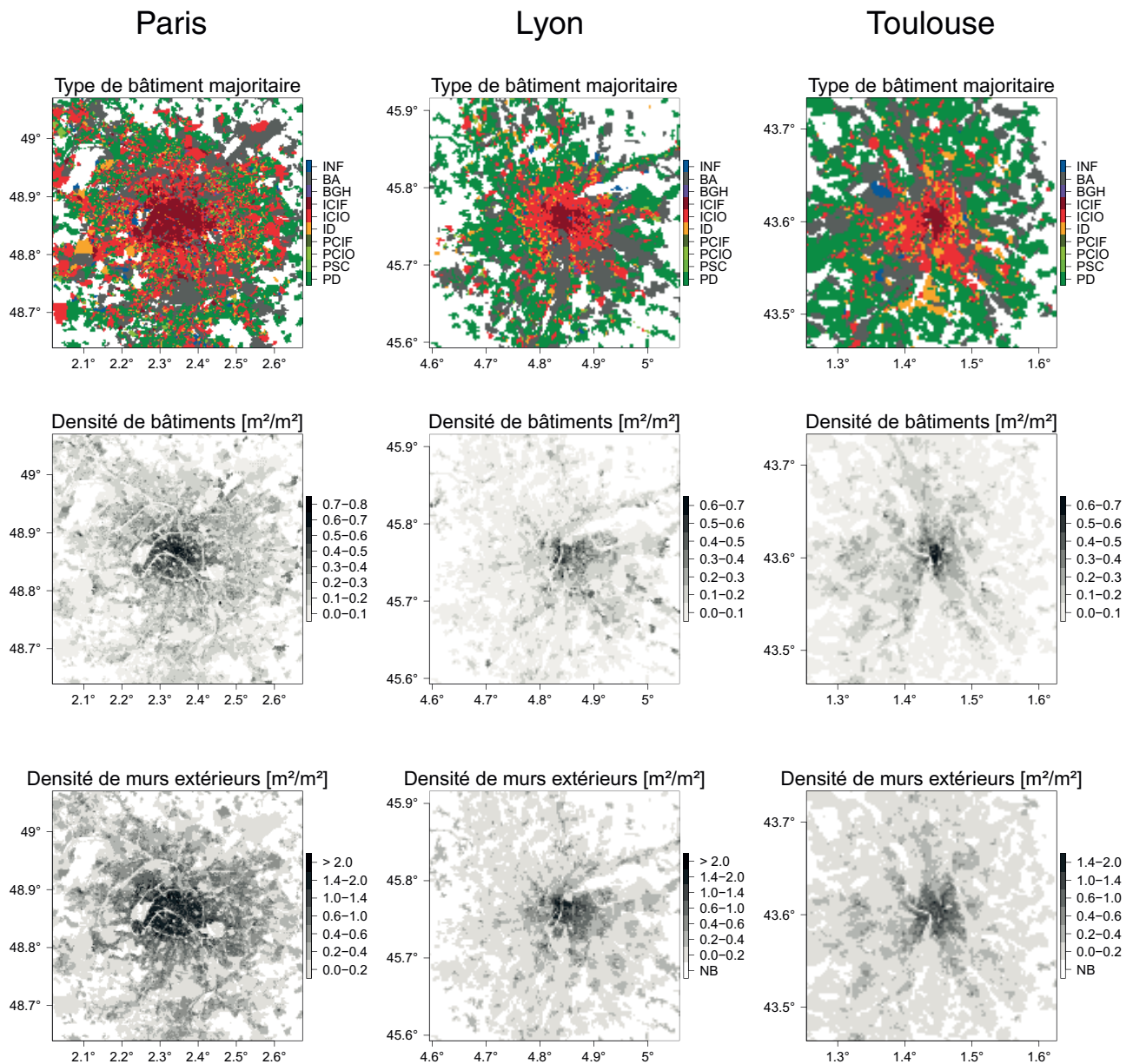


Figure 4. Type de bâtiment majoritaire et indicateurs morphologiques pour les villes de Paris, Lyon et Toulouse. Les types de bâtiments sont : PD (pavillon discontinu), PSC (pavillon semi-continu), PCIO (pavillon continu sur îlot ouvert), PCIF (pavillon continu sur îlot fermé), ID (immeuble discontinu), ICIO (immeuble continu sur îlot ouvert), ICIF (immeuble continu sur îlot fermé), BGH (bâtiment de grande hauteur), BA (bâtiment d'activité), INF (informel, locaux).

Matériaux de construction

Tornay *et al.* (2017) définissent des archétypes architecturaux à partir de ressources bibliographiques (EDF, rapports RAGE...) décrivant les pratiques architecturales en France. Ils supposent que les pratiques architecturales dépendent du type de bâtiment (pavillonnaire, immeuble, bâtiment d'activité...), de son usage (résidentiel, bureaux, industriel...), de sa période de construction (évolution de pratiques architecturales et de la réglementation thermique) et de la région (utilisation de matériaux de construction locaux). Pour les constructions d'avant la seconde guerre mondiale, il existe une forte disparité régionale des matériaux de construction (figure 5), tandis que les pratiques architecturales deviennent plus homogènes pour les constructions plus récentes. Un archétype architectural est défini pour chaque combinaison plausible de type-usage-période-région et contient :

- une description détaillée du mur : matériau porteur (brique, pierre, béton...), éventuels matériaux isolants (laine de verre, polystyrène...), revêtements extérieurs et intérieurs ;
- une description détaillée du toit : matériau porteur (ossature bois, dalle béton...), recouvrement extérieur (tuile, ardoise, zinc...), éventuels matériaux isolants et de revêtement intérieur ;
- le matériau du plancher bas et des planchers intermédiaires ;
- la fraction vitrée des façades et le type de vitrage ;

- la présence et le type de volets ;
- la présence d'une ventilation mécanique ;
- l'étanchéité à l'air.

Pour chaque matériau de construction sont définies ses propriétés thermiques (masse volumique sèche, conductivité thermique utile, capacité thermique massique) et optiques (albédo et émissivité).

Comportements énergétiques

Les consommations énergétiques des bâtiments dépendent non seulement de leur construction et des conditions climatiques, mais aussi de leur utilisation et des comportements énergétiques des habitants. Depuis l'enquête Energihab, Bourgeois *et al.* (2017) définissent trois indicateurs binaires (« haut » et « bas ») de comportements énergétiques à l'échelle du ménage. Ils ont développé des modèles de régression logistique pour prévoir ces indicateurs depuis les variables sociodémographiques incluses dans le recensement de la population disponible sur toute la France. Les indicateurs sont les suivants :

- le comportement de régulation énergétique (CRE) décrit si les habitants sont plus ou moins susceptibles de réguler les équipements liés aux consommations énergétiques. Les ménages avec un CRE « haut » ont par exemple tendance à ne pas chauffer la nuit ou dans les pièces non utilisées. Il est plus probable que le CRE d'un

ménage soit « haut » si le système de chauffage est individuel, le combustible du chauffage est de l'électricité et si l'âge de la personne de référence du ménage est plus bas ;

- le taux d'équipement (EQ) par surface habitable du logement en électroménager susceptible de consommer beaucoup d'électricité. Il est plus probable que l'EQ d'un ménage soit « haut » si la surface habitable du logement diminue, si la personne de référence du ménage déclare vivre en couple et si le nombre de personnes du ménage est plus élevé ;
- l'intensité d'usage (IU) de l'électroménager. Il est plus probable que l'IU d'un ménage soit « haut » si l'âge de la personne de référence du ménage diminue, si la personne de référence du ménage déclare vivre en couple et si le nombre de personnes du ménage est plus élevé.

Les modèles logistiques sont appliqués pour chaque ménage inclus dans le recensement de la population. À partir des résultats, la fraction de ménages à « hauts » CRE, EQ et IU est calculée à l'échelle des Iris au sein des grandes agglomérations et à l'échelle des cantons ou villes en milieu rural. La figure 6 montre des cartes pour le centre de Paris des principales variables explicatives des indicateurs de comportements énergétiques, ainsi que la fraction de ménages à « hauts » CRE, EQ et IU qui résulte des modèles de régression logistique. Les disparités spatiales du CRE sont surtout expliquées par les caractéristiques du type de chauffage,

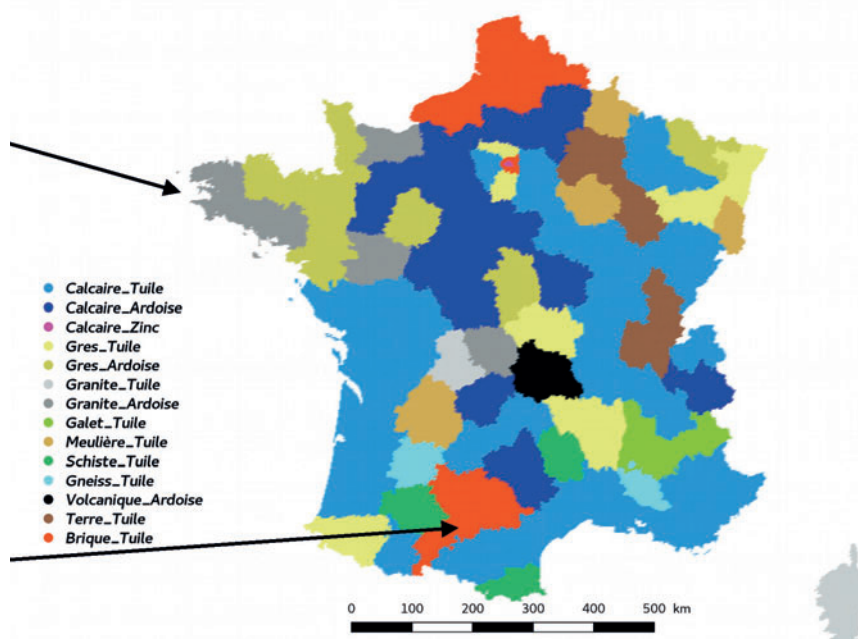
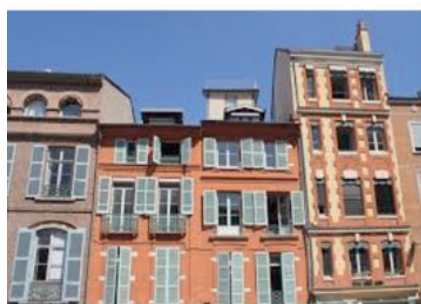


Figure 5. Matériaux de construction dominants (mur porteur – recouvrement du toit) pour les constructions d'avant 1948.

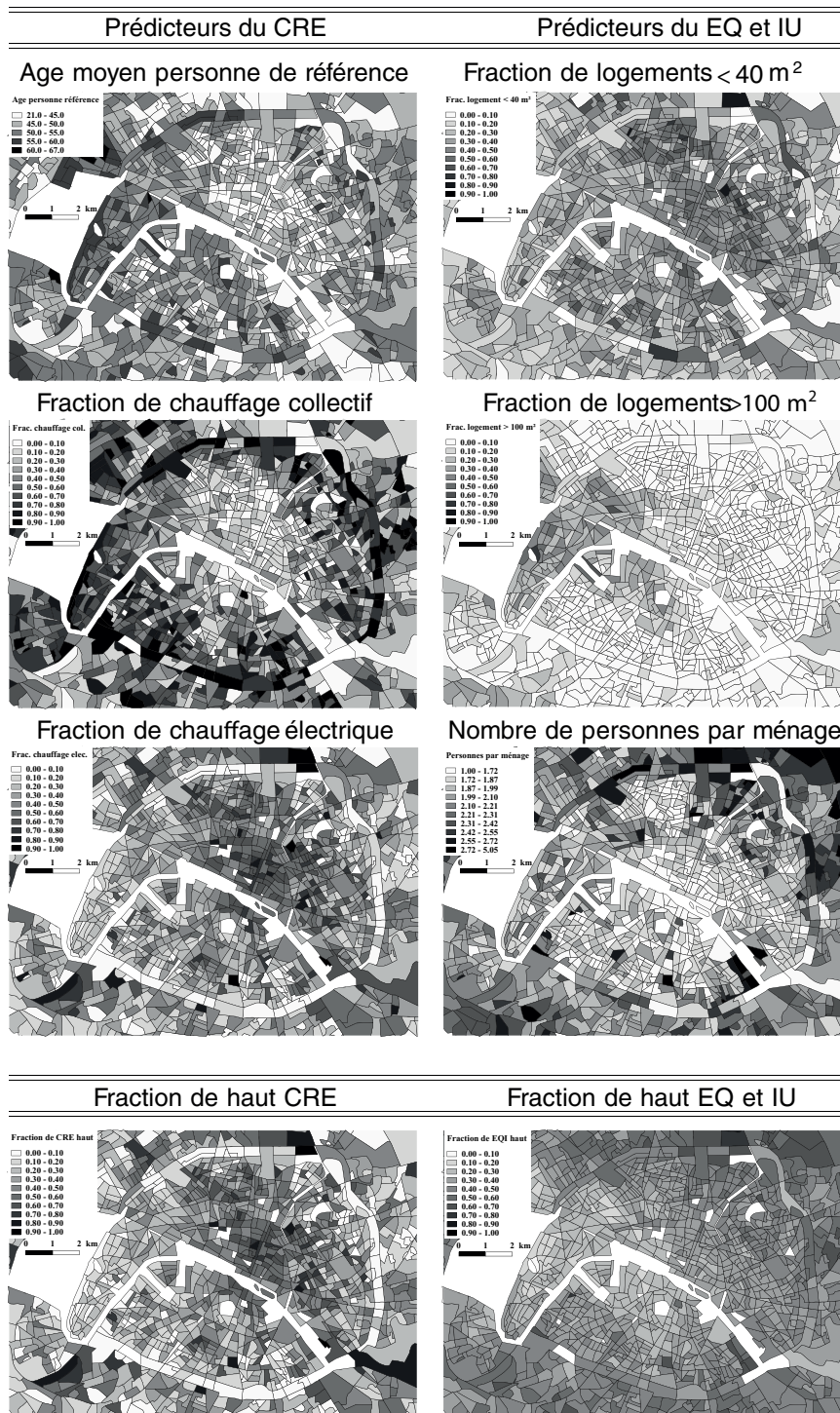


Figure 6. Répartition spatiale dans le centre de Paris des principales variables explicatives des indicateurs de comportements énergétiques, ainsi que de la fraction à l'échelle des Irls de « haut » CRE et de « haut » EQ combiné avec « haut » IU prévu par les modèles de régression logistique.

tandis que pour l'EQ et l'IU ce sont surtout la surface habitable du logement et le nombre de personnes par ménage.

Incertitudes et points faibles du jeu de données

Malgré la richesse des jeux de données de base (résolution spatiale, nouveaux attributs) pour la caractérisation du

tissu urbain, il existe un certain nombre de points faibles qui nécessiteront des travaux supplémentaires :

- la BD Topo[®] ne contient pas toute l'information sur les jardins privatifs ou les arbres de rue qui peuvent beaucoup influencer le confort des habitants en milieu urbain ;
- la BD Parcellaire[®], qui permettrait de déduire des surfaces de jardin, n'est pas disponible au format vectoriel sur toute la France ;

– l'information sur la surface occupée par les trottoirs et les parkings n'est pas totalement connue dans la BD Topo[®]. Or, ces surfaces imperméables sont pertinentes pour l'hydrologie urbaine ;

– un seul archétype architectural est considéré par combinaison de type de bâtiment, usage, période de construction et région, ce qui néglige une potentielle variété de pratiques architecturales à l'échelle du quartier ;

– la description des archétypes architecturaux correspond à l'état dans lequel les bâtiments ont été construits. Des travaux supplémentaires sont nécessaires pour mieux qualifier les rénovations ;

– chaque matériau de construction possède les mêmes propriétés physiques, quel que soit son âge ou sa localisation géographique. Ceci introduit des incertitudes, car des matériaux comme le zinc peuvent changer de propriétés optiques en fonction de l'âge et d'autres matériaux comme les briques peuvent avoir des caractéristiques physiques différentes selon la région ;

– le questionnaire sur les comportements énergétiques recouvre l'Île-de-France, mais les modèles statistiques étalonnés à partir de ce questionnaire sont appliqués à toute la France. Ceci introduit des incertitudes, car certaines variables sociodémographiques diffèrent entre l'Île-de-France et le reste du pays. Par exemple, la taille moyenne des logements est plus basse et les revenus moyens sont plus élevés en Île-de-France qu'en moyenne nationale ;

– l'effet d'éventuelles différences culturelles sur les comportements énergétiques est négligé. Un exemple serait un comportement plus adapté aux épisodes de chaleur dans le sud que dans le nord de la France ;

– le jeu de données n'inclut pas les rejets de chaleur liés aux transports et aux activités industrielles. Le flux de chaleur lié au trafic n'est pas entièrement rejeté en milieu urbain (autoroutes, transport aérien). Néanmoins, ne pas le prendre en compte dans la modélisation du climat urbain pourrait mener à une sous-estimation de la température, surtout proche des grands axes routiers et lors des heures de pointe. La turbulence produite par exemple par les voitures est également négligée. Les rejets de chaleur liés aux activités industrielles sont moins importants pour le climat urbain, car ils sont localisés principalement à l'extérieur des centres-villes.

Représentation des comportements énergétiques dans le modèle de climat urbain *Town Energy Balance (TEB)*

Motivation

Le modèle *Town Energy Balance (TEB)* ; Masson, 2000) est la description de ville utilisée dans les modèles atmosphériques développés à Météo-France, comme Mésoscale-NH ou Arome. TEB a été conçu pour représenter l'effet de la ville (bâtiments, routes, végétation urbaine) sur l'atmosphère à l'échelle du quartier. Il inclut un module de thermique du bâtiment (MTB) qui simule le bilan d'énergie d'un bâtiment représentatif à l'échelle du quartier en considérant les pratiques de chauffage, de climatisation, les rejets de chaleur dus à l'électroménager, ainsi que de potentiels actionnements des fenêtres et volets. Le MTB dans TEB représente l'ensemble des bâtiments à l'échelle du quartier et diffère en cela d'un modèle de la thermique du bâtiment comme *EnergyPlus* (Crawley *et al.*, 2001) qui ne modélise la dynamique thermique que d'un seul bâtiment, voire d'un seul logement.

À l'échelle du quartier cohabitent une variété d'usages des bâtiments (résidentiel, bureaux, commerces) et de

comportements énergétiques des habitants. Même pour un quartier ou un bloc de bâtiments ayant une morphologie très homogène, il faut prendre en compte la diversité des comportements énergétiques, car les consommations énergétiques dépendent de manière non linéaire de ces comportements. C'est le cas typique de certains immeubles du centre des villes françaises où le rez-de-chaussée est occupé par des commerces et les autres étages sont d'usage résidentiel. Les commerces sont utilisés et chauffés entre environ 10 h et 20 h, tandis que durant les jours de travail les logements résidentiels sont à l'inverse occupés tôt le matin, puis pendant la soirée et la nuit.

Amélioration de TEB et prise en compte des comportements énergétiques

L'amélioration de TEB publiée dans Schoetter *et al.* (2017) consiste à prendre en compte une variété d'usages et de comportements énergétiques à l'échelle du quartier pour une morphologie urbaine et un type de bâtiment donnés. L'hypothèse de base est que les différents comportements énergétiques influencent en premier lieu les conditions à l'intérieur et moins les conditions à l'extérieur des bâtiments. L'approche qui est choisie pour représenter la variété de comportements est inspirée de l'approche en tuiles (*tile approach*) qui a fait ses preuves dans la modélisation du

bilan d'énergie de surface dans les modèles atmosphériques. Dans cet exemple, afin d'éviter de moyenner les paramètres physiques très différents de différentes surfaces (eau, végétation, surfaces urbaines), les bilans sont calculés séparément pour chaque type de surface, puis les flux turbulents et de rayonnement sont agrégés. La mise en œuvre de cette approche dans le cadre de l'amélioration de TEB (figure 7) est basée sur cette idée : le calcul du bilan d'énergie du bâtiment est réalisé pour différents comportements, puis les flux de rayonnement et convectifs depuis l'intérieur vers l'extérieur du bâtiment sont agrégés. Avec cette amélioration, il est désormais possible de considérer une variété de températures de consigne de chauffage et de climatisation, des valeurs différentes pour les rejets de chaleur dus aux consommations de l'électroménager et également la variété des pratiques de ventilation et d'utilisation des volets à l'échelle d'un quartier. La validité de l'approche en tuiles a été testée pour des comportements idéalisés. Les erreurs des sorties du modèle comme le flux anthropique dû au chauffage/climatisation et le flux de chaleur sensible sont de l'ordre de 10 %.

L'amélioration de TEB permet de prendre en compte n'importe quelle variété de comportement si la distinction de tels comportements est jugée pertinente pour l'application en question. Pour une application en France ayant pour but principal de bien simuler les consommations énergétiques et leur lien avec le climat urbain, les comportements énergétiques sont spécifiés en fonction de l'usage principal du bâtiment (résidentiel, bureaux, commerces, enseignement...). Pour chaque usage, des créneaux (heure du jour et jour de la semaine) sont définis et pour chacun de ces créneaux la température de consigne de chauffage, les charges internes et l'utilisation de la ventilation et des volets. La nouvelle option de TEB est utilisée pour distinguer deux aspects particulièrement importants pour la consommation énergétique à l'échelle du quartier en métropole :

- pour les quartiers avec une typologie de bâtiments « immeuble continu » qui est typique des centres-villes en métropole, une fraction d'usage commercial et de bureaux est considérée. En effet, dans de tels quartiers, des bâtiments à usage initialement purement résidentiel ont été transformés partiellement en usage commercial (par exemple au rez-de-chaussée) et en usage tertiaire. Les fractions de

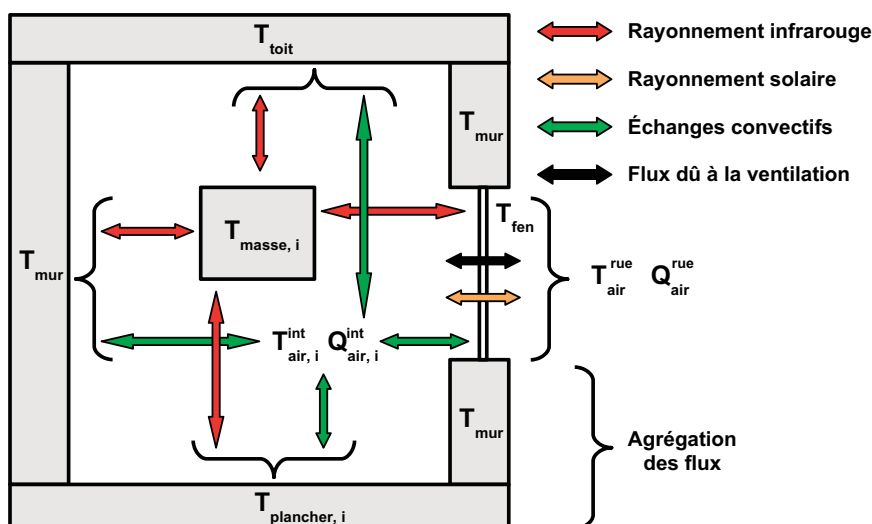


Figure 7. Approche en tuiles pour les comportements énergétiques. Le bilan énergétique du bâtiment est calculé séparément pour différents usages (notés avec l'indice i) et comportements énergétiques (consignes de chauffage, de climatisation, rejets de chaleur interne, ouverture des fenêtres, fermeture des volets). Les flux dus au rayonnement, à la convection et à la ventilation depuis l'intérieur vers l'extérieur sont agrégés pour les différents comportements. Adapté de Schoetter *et al.* (2017).

commerce et de bureaux ont été estimées *via* la densité de population et la surface de plancher ;
 – pour les bâtiments résidentiels, une variété de consignes de chauffage est prise en compte. Le croisement de l'information sur les consignes de chauffage depuis l'enquête Energihab et l'indicateur CRE permet de déterminer les consignes de chauffage par catégorie de CRE (22,3 °C et 18,4 °C, respectivement, pour CRE « bas » et « haut »). La fraction de ménages chauffant à la consigne plus élevée/plus basse est calculée en fonction de la carte sur la fraction de ménages à CRE « haut » (figure 6) qui est lue par TEB.

Le croisement des données sur les dépenses des ménages pour l'électricité inclus dans l'ENL et les indicateurs EQ et IU permet de calculer les rejets de chaleur dus à l'électroménager et à l'éclairage. Elles sont de 5 W/m² (3 W/m²) de surface habitable pour les ménages avec EQ et IU « haut » (« bas »). Dans TEB, les rejets de chaleur dus à l'électroménager sont calculés en fonction de la carte de ménages à EQ et IU « haut » (figure 6) en pondérant entre les valeurs pour EQ et IU « haut » et « bas ».

Application et validation

Les nouveaux développements de TEB sont testés pour la période de la campagne d'observations en milieu urbain Capitoul de mars 2004 à février 2005 à Toulouse. Le bilan d'énergie urbain et les conditions météorologiques ont été mesurés par un mât équipé d'un anémomètre sonique installé 28 m au-dessus des toits au centre-ville de Toulouse (figure 8). Pour la même période, un inventaire des consommations énergétiques (surtout gaz et électricité) a été réalisé pour un domaine de 15 km × 15 km couvrant une grande partie de l'agglomération toulousaine. TEB est forcé par les observations météorologiques du mât. Une première simulation est faite en initialisant les paramètres liés aux comportements énergétiques par des valeurs qui pourraient typiquement être utilisées comme valeurs par défaut (consigne de chauffage de 19 °C, consigne de climatisation de 27 °C, rejets de chaleur internes de 5 W/m² de surface de plancher). Une deuxième simulation est faite en initialisant les paramètres liés aux comportements énergétiques en tenant compte de la variété des usages et des comportements énergétiques. La figure 8, ligne du milieu, montre la

série temporelle de la somme des consommations énergétiques dans les bâtiments sur tout le domaine. La configuration « par défaut » surestime les consommations liées à la climatisation et la sensibilité des consommations énergétiques à la température extérieure pendant la saison de chauffage. Ceci est amélioré en considérant les comportements plus

réalistes (très peu de climatisation), la variété d'usages, les créneaux d'occupation plus réalistes, ainsi que la variété de consignes de température pour le chauffage. La ligne de bas de la figure 8 compare la répartition spatiale du flux de chaleur anthropique dû à la consommation énergétique des bâtiments en hiver entre la simulation avec la variété de comportements et l'inventaire.

Mât équipé d'un anémomètre sonique



Morphologie centre-ville de Toulouse

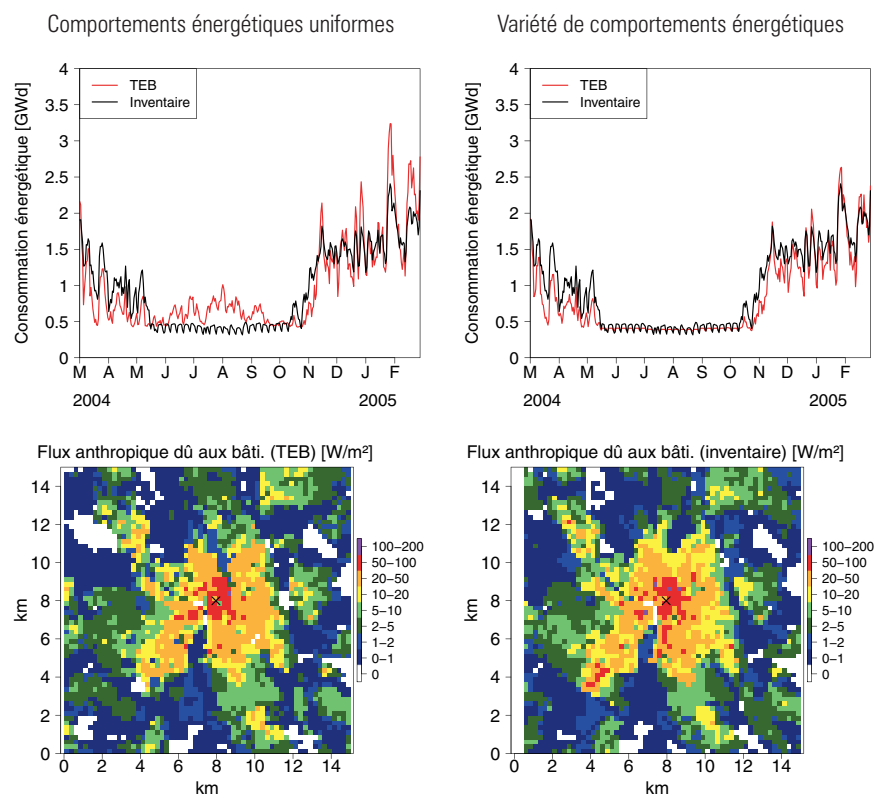


Figure 8. Simulations pour l'année de la campagne Capitoul (mars 2004 à février 2005) de la consommation énergétique dans les bâtiments pour un domaine couvrant une grande partie de l'agglomération toulousaine. La ligne du haut montre le mât équipé d'un anémomètre sonique (à gauche) qui mesurait les conditions météorologiques ainsi que les flux turbulents et de rayonnement au centre de Toulouse caractérisé par des bâtiments denses de moyenne hauteur, des murs en brique rose et des toits couverts de tuiles (à droite). Les résultats de la ligne du milieu illustrent l'apport de la modélisation détaillée des usages et comportements énergétiques (à droite) pour la simulation de la consommation énergétique quotidienne (en gigawatts-jour ; GWd) par les bâtiments par rapport à des valeurs uniformes pour les paramètres liés aux comportements énergétiques (à gauche). La ligne du bas montre le flux de chaleur anthropique dû à l'usage d'énergie dans les bâtiments moyenné sur l'hiver simulé par TEB avec prise en compte détaillée des usages et comportements énergétiques (à gauche) et selon l'inventaire compilé lors de la campagne Capitoul (à droite). Adapté de Schoetter *et al.* (2017).

Les résultats montrent que TEB simule bien la répartition spatiale du flux de chaleur anthropique. Il est le plus élevé dans le centre historique de Toulouse, ce qui est dû à la forte densité de bâtiments de moyenne hauteur (grand volume chauffé) et le fait que ces bâtiments ne sont pas très bien isolés. La modélisation avec TEB permettra, grâce aux jeux de données sur le tissu urbain français, de quantifier les consommations énergétiques à l'échelle du quartier pour différentes villes françaises et leur modification suite à l'évolution du climat, des bâtiments ainsi que des comportements énergétiques. Néanmoins, une évaluation critique des résultats des simulations pour d'autres villes devrait être faite, ce qui est limité par la faible disponibilité de données sur les consommations énergétiques à haute échelle spatiale et temporelle.

Conclusions et perspectives

Dans cet article a été présenté un jeu de données caractérisant le tissu urbain des villes françaises (morphologie, architecture et comportements énergétiques) pour la modélisation du

climat urbain et de son interaction avec la consommation énergétique dans les bâtiments. Une première version de ce jeu de données a été compilée pour 80 grandes agglomérations urbaines et son extension à toute la France est prévue. Le modèle de climat urbain TEB a été amélioré pour prendre en compte la variété d'usages et des comportements énergétiques à l'échelle du quartier, connue grâce au nouveau jeu de données. L'amélioration de TEB permet de mieux modéliser le flux de chaleur anthropique qui est l'une des causes de l'îlot de chaleur urbain.

La caractérisation du tissu urbain *via* des données administratives n'est possible que grâce à l'existence de tels jeux de données détaillés et centralisés en France. Néanmoins, l'expertise obtenue en France et au-delà pour l'utilisation d'autres sources de données comme les données satellitaires, les bases de données collaboratives (comme OpenStreetMap) ou l'exploitation de Google Street View permettra d'enrichir notre connaissance du tissu urbain en France et au-delà. D'autres travaux pourraient porter sur l'amélioration de la description architecturale et de comportements énergétiques pour mieux prendre en compte le cycle de vie des bâtiments et de leurs habitants. L'effet

des différences culturelles sur les comportements énergétiques pourrait être analysé et éventuellement être pris en compte. Dans le contexte du réchauffement climatique, le taux d'équipement avec des climatiseurs ainsi que leur fréquence d'utilisation devrait augmenter. De futures enquêtes devraient donc se focaliser sur les comportements liés à la climatisation.

Dans la suite, le climat des villes françaises sera simulé pour comparer l'effet des villes sur le climat local en fonction du climat régional et de facteurs géographiques comme les couvertures de surface en milieu rural, la proximité du littoral et le relief. Les développements permettront aussi de quantifier les interactions entre l'îlot de chaleur urbain et les consommations énergétiques et l'efficacité de potentielles mesures d'atténuation et d'adaptation face au changement climatique.

Remerciements

Les travaux de recherche et de développement présentés dans cet article ont été conduits dans le cadre du projet Mapuce financé par l'Agence nationale de la recherche (ANR-13-VBDU-0004).

Bibliographie

- Bernard J., Bocher E., Petit G., Palominos S., 2018. Sky view factor calculation in urban context: computational performance and accuracy analysis of two open and free GIS tools. *Climate*, 6, 1-24.
- Bocher E., Petit G., Bernard J., Palominos S., 2018. A geoprocessing framework to compute urban indicators: The MAPUCE tools chain. *Urban Climate*, 24, 153-174.
- Bourgeois A., Pellegrino M., Lévy J.-P., 2017. Modeling and mapping domestic energy behavior: Insights from a consumer survey in France. *Energy Research & Social Science*, 32, 180-192.
- Ching J., Brown M., Burian S., Chen F., Cionco R., Hanna A., Hultgren T., McPherson T., Sailor D., Taha H., Williams D., 2009. National urban database and access portal tool. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 90, 1157-1168.
- Ching J., Mills G., Bechtel B., See L., Feddema J., Wang X., Ren C., Brousse O., Martilli A., Neophytou M., Mouzourides P., Stewart I., Hanna A., Ng E., Foley M., Alexander P., Aliaga D., Niyogi D., Shreevastava A., Bhalachandran P., Masson V., Hidalgo J., Fung J., Andrade M., Baklanov A., Dai W., Milcinski G., Demuzere M., Brunsell N., Pesaresi M., Miao S., Mu Q., Chen F., Theeuwes N., 2018. WUDAPT: An urban weather, climate, and environmental modeling infrastructure for the Anthropocene. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 99, 1907-1924.
- Crawley D.B., Lawrie L.K., Winkelmann F.C., Buhl W.F., Huang Y.J., Pedersen C.O., Strand R.K., Liesen R.J., Fisher D.E., Witte M.J., Glazer J., 2001. EnergyPlus: creating a new-generation building energy simulation program. *Energy and Buildings*, 33, 319-331.
- Daniel M., Lemonsu A., Vigié V., 2018. Role of watering practices in large-scale urban planning strategies to face the heat-wave risk in future climate. *Urban Climate*, 23, 287-308.
- Hendel M., Gutierrez P., Colombert M., Diab Y., Royon L., 2016. Measuring the effects of urban heat island mitigation techniques in the field: Application to the case of pavement-watering in Paris. *Urban Climate*, 16, 43-58.
- Jackson T.L., Feddema J.J., Oleson K.W., Bonan G.B., Bauer J.T., 2010. Parameterization of urban characteristics for global climate modelling. *Annals of the Association of American Geographers*, 100, 848-865.
- Koukoun-Amaud R., Desplat J., Lemonsu L., Salagnac J.-L., 2014. Epicea : étude des impacts du changement climatique à Paris. *La Météorologie*, 84, 42-48.
- Masson V., 2000. A physically-based scheme for the urban energy budget in atmospheric models. *Bound.-Layer Meteorol.*, 94, 357-397.
- Masson V., Marchadier C., Adolphe L., Aguejda R., Avner P., Bonhomme M., Bretagne G., Briottet X., Bueno B., de Munck C., Doukari O., Hallegatte S., Hidalgo J., Houet T., Le Bras J., Lemonsu A., Long N., Moine M.-P., Morel T., Nolorgues L., Pigeon G., Salagnac J.-L., Zibouche K., 2014. Adapting cities to climate change: a systemic modelling approach. *Urban Climate*, 10, 407-429.
- Schoetter R., Masson V., Bourgeois A., Pellegrino M., Lévy J.-P., 2017. Parametrisation of the variety of human behaviour related to building energy consumption in the Town Energy Balance (SURFEX-TEB v.8.2). *Geosci. Model Dev.*, 10, 2801-2831.
- Tornay N., Schoetter R., Bonhomme M., Faraut S., Masson V., 2017. GENIUS: A methodology to define a detailed description of buildings for urban climate and building energy consumption simulations. *Urban Climate*, 20, 75-93.