



F. L'Esprit/AU AF

© Arnaud Bourgeois 2009

# Modélisation urbaine et stratégies d'adaptation au changement climatique pour anticiper la demande et la production énergétique (Muscade)

Programme ville durable 2009



# MUSCADE

**Modélisation Urbaine et Stratégie  
d'adaptation au Changement climatique  
pour Anticiper la Demande et  
la production Énergétique**



Rapport final  
2014

# Table des Matières

|     |                                                    |    |
|-----|----------------------------------------------------|----|
| A   | RÉSUMÉ.....                                        | 3  |
| B   | INTRODUCTION.....                                  | 6  |
| B.1 | Enjeux et problématique, état de l'art .....       | 6  |
| B.2 | Approche scientifique et technique.....            | 7  |
| C   | RÉSULTATS OBTENUS .....                            | 16 |
| C.1 | Validation des modèles.....                        | 16 |
| C.2 | Simulations systémiques dans le siècle futur ..... | 19 |
| D   | EXPLOITATION DES RÉSULTATS .....                   | 21 |
| D.1 | Ville compacte / ville étendue.....                | 21 |
| D.2 | Végétalisation, irrigation.....                    | 29 |
| D.3 | Rôle des usagers .....                             | 31 |
| E   | CONCLUSIONS.....                                   | 33 |
| F   | BIBLIOGRAPHIE .....                                | 36 |
|     | Publications scientifiques en anglais .....        | 36 |
|     | Publications scientifiques en français .....       | 37 |
|     | Articles de vulgarisation scientifique .....       | 37 |

## A RESUME



### **MUSCADE : VERS UNE VILLE D'EFFICACITE ENERGETIQUE «CLASSE A » EN 2100 ?**

#### **CHANGEMENT CLIMATIQUE, ENERGIE DU BATI ET EXPANSION URBAINE : TROIS PROBLEMATIQUES CLES DE LA VILLE DURABLE**

La ville est un système complexe particulièrement concerné par le changement climatique : ses bâtiments consomment de l'énergie et rejettent des gaz à effet de serre ; son climat local est accentué par la formation d'îlots de chaleur urbains ; les usages de climatisation ou de chauffage de ses habitants sont variés ; ses modifications structurelles sont soumises à une forte inertie qui oblige à raisonner, tout comme pour le changement climatique, à l'échelle du siècle.

Dans ce contexte, quelles mesures auront un effet significatif sur le climat urbain et la consommation d'énergie des bâtiments d'une ville : l'application du Grenelle de l'environnement concernant les bâtiments et l'énergie ? La production d'énergie locale ? Les usages énergétiques des bâtiments ? La végétalisation des toits ? La forme urbaine ? La végétalisation de la ville ? Les avancées technologiques ?

Le projet MUSCADE étudie les interactions entre ces différents processus et propose des stratégies d'adaptation qui mettent en perspective la consommation énergétique de la ville et ses capacités de production d'énergie. En se plaçant à l'échelle du siècle, le projet MUSCADE vise ainsi à apporter des éléments d'évaluation aux décideurs urbains qui doivent bâtir la ville durable de demain.

#### **UN MODELE NUMERIQUE POUR EVALUER DES STRATEGIES D'ADAPTATION DE L'AGGLOMERATION PARISIENNE AU CHANGEMENT CLIMATIQUE**

Pour représenter le système ville, son évolution et les processus liés à l'énergie, un modèle numérique a été développé à partir de plusieurs modèles :

Le modèle NEDUM d'expansion urbaine du CIRED (Viguié 2012, Viguié et Hallegatte 2012) reproduit les mécanismes socio-économiques sous-jacents à la dynamique du système urbain et permet de représenter son évolution des années 1900 jusqu'à la fin du XXI<sup>ème</sup> siècle. La morphologie à l'échelle du quartier est obtenue grâce au modèle GENIUS développé par le LRA et le GAME, qui permet de générer des cartes archétypales et de simuler l'évolution des îlots architecturaux urbains.

Le modèle Town Energy Balance du CNRM-GAME (TEB, Masson 2000) simule le microclimat urbain à partir des processus physiques liés à la géométrie urbaine, et le calcul du bilan interne du bâti (Bueno et al 2012) permet de représenter la consommation énergétique de la ville.

Une analyse par le LIENS de l'expansion passée de l'agglomération parisienne et une étude paramétrique de l'énergétique du bâtiment par le CSTB ont permis de valider les modèles jusqu'aux périodes contemporaines.

Enfin, pour représenter la ville future, des projections ont été construites en combinant des hypothèses climatiques, macroéconomiques (prix de l'énergie, croissance, démographie), et d'évolution du domaine urbain (ville étendue, compacte), des techniques de bâti (matériaux, réglementations) et de la production d'énergie décentralisée (technologies, choix d'implantation).

## **RESULTATS MAJEURS DU PROJET**

Le modèle développé permet d'évaluer le climat urbain et l'efficacité énergétique pour répondre de façon transversale aux questionnements d'architectes (quel type de bâti est le mieux adapté au climat futur ?), d'urbanistes (quelle morphologie de quartier permet la meilleure performance énergétique ?) et de collectivités (quel est l'impact de la forme urbaine sur le climat des villes ? sur les loyers ?). Il est ainsi possible de comparer différentes stratégies d'adaptation de l'agglomération parisienne au changement climatique.

Ainsi, certains résultats majeurs ont été obtenus :

- Les comportements des habitants et usagers apparaissent comme un gisement potentiel important de diminution des consommations d'énergie.
- La végétation, si elle est arrosée, peut sensiblement améliorer le confort extérieur en été. Les toits végétalisés ont une influence limitée sur le confort extérieur mais peuvent améliorer l'isolation du bâti.
- Les panneaux solaires, outre leur propriété intrinsèque de production d'énergie, permettent d'atténuer l'îlot de chaleur urbain.
- Le nombre de m<sup>2</sup> à chauffer est plus important dans la ville étendue que dans la ville compacte, toutes choses égales par ailleurs. En contrepartie, l'îlot de chaleur y est plus intense en hiver, ce qui réduit les besoins de chauffage. Il en résulte que les villes étendue et compacte ont des consommations d'énergie agrégées sur l'année pour le chauffage et la climatisation qui sont comparables en climat futur.
- L'été par contre, l'îlot de chaleur urbain est accentué dans la ville compacte, ce qui, combiné au fait que les habitants sont plus concentrés près du centre de l'agglomération, augmente les conditions de stress thermique.
- En climat futur, l'énergie solaire que la ville peut potentiellement produire sur l'année est comparable à la consommation d'énergie liée au chauffage et à la climatisation.

## **INFORMATIONS PRATIQUES**

Le projet MUSCADE (Modélisation Urbaine et Stratégies d'adaptation au Changement Climatique pour Anticiper la Demande et la production Energétique) est un projet de recherche fondamentale coordonné par le Groupe d'étude de l'Atmosphère Météorologique

(GAME, CNRS / Météo-France, Toulouse). Le partenariat multidisciplinaire est constitué du Centre International de Recherche sur l'Environnement et le Développement (CIRED, Nogent sur Marne), du Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB, Champs-sur-Marne et Marne-la-Vallée), du laboratoire Littoral Environnement et Sociétés (LIENSs, La Rochelle), du Laboratoire de Recherche en Architecture (LRA, École Nationale Supérieure d'Architecture de Toulouse), de l'Institut d'Aménagement et d'Urbanisme Île-de-France (IAU IdF, Paris) et de l'Agence Parisienne d'Urbanisme (APUR, Paris). Le projet a démarré en décembre 2009 pour une durée totale de 4 ans. Il a bénéficié d'une aide de l'ANR de 650 405 € pour un coût global de l'ordre de 2.4 millions €.

**Coordination & Contact** : Valéry MASSON ; email : [valery.masson@meteo.fr](mailto:valery.masson@meteo.fr)

**Site Web du projet** : <http://www.cnrmmeteo.fr/ville.climat/muscade>

### **Participants**

|         |                                                                                                                              |
|---------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| GAME    | Valéry Masson, Grégoire Pigeon, Aude Lemonsu, Colette Marchadier, Julia Hidalgo, Bruno Bueno, Cécile de Munck, Maxime Daniel |
| CIRED   | Vincent Viguié, Elisabetta Genovese                                                                                          |
| CSTB    | Jean Luc Salagnac, Kamel Zibouche                                                                                            |
| LIENSs  | Nathalie Long, Thomas Levellier                                                                                              |
| LRA     | Marion Bonhomme, Hassan Ait-Haddou, Luc Adolphe, Serge Faraut                                                                |
| IAU IdF | Laurence Nolorgues                                                                                                           |

## **B INTRODUCTION**

La ville est un système complexe particulièrement concerné par le changement climatique : ses bâtiments consomment de l'énergie et rejettent des gaz à effet de serre ; son climat local est accentué par la formation d'îlots de chaleur urbains ; les usages de climatisation ou chauffage de ses habitants sont variés ; ses modifications structurelles sont soumises à une forte inertie qui oblige à raisonner, tout comme pour le changement climatique, à l'échelle du siècle.

Dans ce contexte, quelles mesures auront un effet significatif sur le climat urbain et la consommation d'énergie des bâtiments d'une ville : L'application du Grenelle de l'environnement concernant les bâtiments et l'énergie ? La production d'énergie locale ? Les usages énergétiques ? La végétalisation des toits ? La forme urbaine ? La végétalisation de la ville ? Les avancées technologiques ?

Le projet MUSCADE étudie les interactions entre ces différents processus et propose des stratégies d'adaptation qui mettent en perspective la consommation énergétique de la ville et ses capacités de production d'énergie. En se plaçant à l'échelle du siècle, le projet MUSCADE vise ainsi à apporter des éléments d'évaluation aux décideurs urbains qui doivent bâtir la ville durable de demain.

### **B.1 ENJEUX ET PROBLEMATIQUE, ETAT DE L'ART**

La problématique de l'adaptation future de la ville au changement climatique, tout autant que la question de la ville durable, ont nécessité de lever deux verrous scientifiques majeurs. Le premier était lié à la nécessaire interdisciplinarité du projet, qui a mobilisé les travaux d'économistes, architectes, géographes, météorologistes et spécialistes du bâtiment. Le deuxième était lié à l'échelle de temps des processus en jeu. Les études prospectives menées habituellement par les acteurs urbains couvrent 10 ou 20 ans. Ici, nous avons dû considérer une échelle de temps bien plus longue : le siècle ! C'est en effet l'échelle de temps pertinente lorsque l'on s'intéresse aux impacts du changement climatique, dont l'évolution va s'accroître et accélérer sur le siècle à venir. C'est aussi l'échelle d'évolution structurelle des villes. Une grande partie des bâtiments a priori présents en 2100 dans Paris est en effet déjà construite ou le sera bientôt, et nos choix actuels de transport ou d'urbanisme ont un impact potentiel important sur ce que sera la ville tout au long du siècle.

Dans MUSCADE, nous abordons la question de la consommation d'énergie en ville, en se focalisant sur les aspects liés au bâti (nous abordons aussi, mais sans l'approfondir, celle liée au transport), en fonction des évolutions urbaines à différents niveaux : organisation spatiale de l'agglomération, formes urbaines, technologies constructives. Nous quantifions aussi la production possible d'énergie décentralisée via l'utilisation de panneaux solaires.

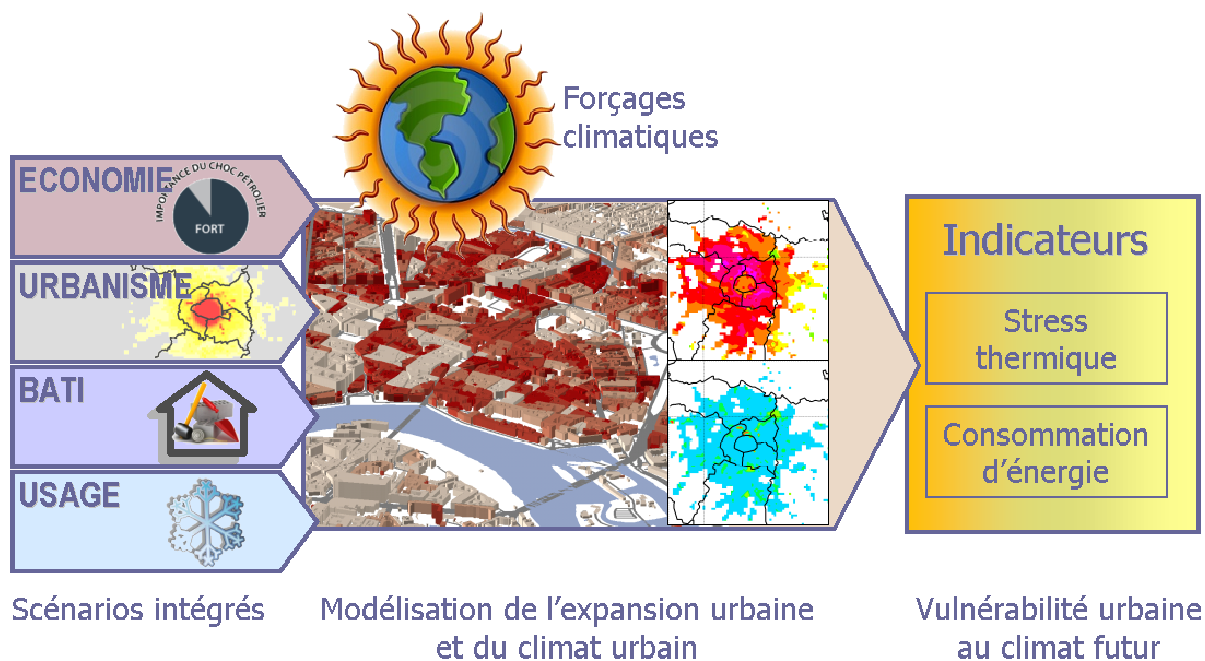


## B.2 APPROCHE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE

### Méthodologie générale

Étant donné l'échelle de temps considérée, les modèles d'expansion basés sur des extrapolations des enquêtes et données spatiales du passé montrent leurs limites. C'est aussi le cas pour les modèles statistiques de consommation d'énergie (supposant à la fois climat présent et techniques constructives actuelles). Nous avons donc choisi des outils numériques basés sur des processus physiques et socio-économiques. Le modèle numérique d'impact énergétique et de micro-climat est TEB (Town Energy Balance), développé par Météo-France et le CNRS. L'expansion quant à elle est simulée par le modèle dynamique NEDUM, basé sur des équations socio-économiques. Afin d'identifier précisément les impacts du changement climatique sur la ville, il est toutefois nécessaire de disposer de données précises sur les bâtiments qui la constitueront : forme architecturale, forme urbaine, matérialité de l'enveloppe, usages et apports internes associés, équipements, etc. Cependant, aucun modèle prospectif ne permet aujourd'hui de projeter avec précision ces informations. Un modèle d'évolution des formes architecturales a été développé au cours du projet (GENIUS), afin d'interpréter les informations d'expansion urbaine et de localisation future de la population.

Ces différents outils de simulation permettent ainsi de projeter des formes futures de l'agglomération et des impacts sur la consommation et la production décentralisée d'énergie, en fonction de divers scénarios sur des paramètres macro-économiques, technologiques ou d'aménagement du territoire sur le siècle à venir. Ces scénarios modifient des données d'entrée des outils de simulation, mais ne présagent pas de leur effet final au bout d'un siècle. Ainsi, ces différentes projections, qui sont autant de futurs possibles de la ville, nous permettent d'étudier les rôles de divers leviers d'action mis en œuvre dans les scénarios.





### Création de scénarios urbains

L'approche choisie pour construire les scénarios est originale pour deux raisons.

1) D'abord, la méthodologie générale choisie, c'est à dire de simuler conjointement l'expansion urbaine et ses impacts dans le cadre du changement climatique, fait que l'on ne suppose **pas de scénario d'évolution de la ville à proprement parler** (ce qui se fait classiquement, par exemple dans l'étude de Kusaka et al 2012 sur Tokyo, Nagoya et Kyoto). Nous devons ici construire **des scénarios pour les déterminants qui vont conduire la ville à évoluer** et éventuellement s'étendre. Ainsi, nous devons construire :

- Des scénarios socio-économiques, qui décrivent l'environnement plus ou moins favorable à l'expansion urbaine (richesse, démographie, prix des énergies, ...).
- Des scénarios de planification urbaine, qui représentent l'action et les choix d'aménageurs locaux. Dans le cadre de planification actuel, de tels choix seraient pris par la région (Sdrif, Schéma directeur de la Région Île-de-France), ou au sein des SCOT et PLU.
- Des scénarios technologiques, traduisant l'évolution des techniques constructives, des moyens de transports, ...
- Des scénarios sur les comportements et pratiques des habitants.

2) Ensuite, la méthodologie de construction de scénarios, développée dans le cadre de MUSCADE en lien avec le projet ACCLIMAT (sur Toulouse, <http://www.cnr.meteo.fr/ville.climat/spip.php?rubrique121>), propose de combiner la **réflexion prospective** pour l'élaboration de scénarios urbains (élaboration d'hypothèses à partir d'avis d'experts) et la modélisation numérique pour l'**évaluation quantitative** de ces scénarios urbains.



L'ensemble des hypothèses constitutives des scénarios thématiques a été défini de façon participative, regroupant les membres du projet ainsi que des experts extérieurs (Centre d'Études Techniques de l'Équipement; Centre Interdisciplinaire d'Études Urbaines; Mairie de Toulouse ; CONTINENTAL ; Agence Régionale Pour l'Environnement de Midi-Pyrénées), afin de représenter et prendre en compte une plus grande diversité de possibilités (thèmes, variables influentes et hypothèses). Une série de réunions organisées en groupes de réflexion a eu lieu en 2010.

Suivant un procédé similaire, les scénarios systémiques ont été définis de façon participative. Les scénarios thématiques ont été croisés de façon à définir des scénarios systémiques contrastés. Deux groupes ont réalisé ce travail de façon indépendante. Les résultats ont été confrontés pour définir les scénarios à retenir (élimination des redondances). Enfin, ces réunions ont également permis de vérifier méticuleusement la cohérence des hypothèses entre elles.

Le temps et l'organisation du projet MUSCADE n'ont pas permis d'engager un travail approfondi de ce type sur l'agglomération parisienne. Ces réflexions prospectives préparées pour Toulouse (projet ACCLIMAT) ont donc été réutilisées, sur Paris et sa région.

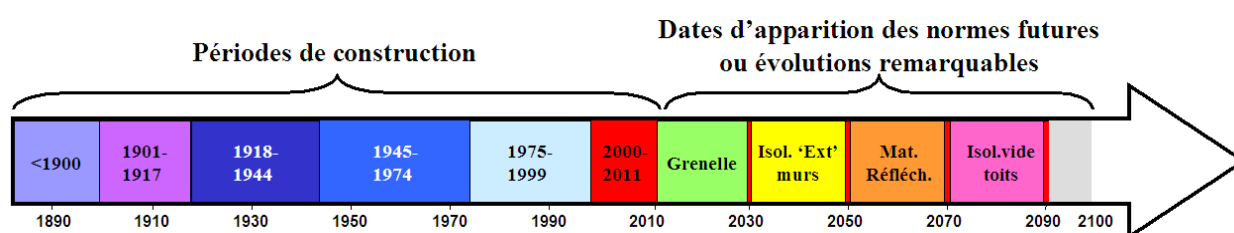


Figure 1 : Exemple de scénario thématique : évolution des normes constructives et technologies associées. Selon les scénarios, ces normes sont mises en œuvre plus ou moins rapidement (pour la rénovation).

### Méthodologie de scénarios climatiques

Dans le cadre du projet MUSCADE, un des objectifs scientifiques était de fournir des scénarios climatiques spécifiques aux besoins du projet. Dans ce contexte, les objectifs énumérés sont les suivants : d'une part de « recenser pour chaque scénario du GIEC les modèles disposant de projections climatiques de 2000 à 2100 sur la France (tâche 1f) » et « construire, à partir de scénarios de modèles régionaux de climat (MRC), des forçages atmosphériques représentatifs du climat futur auquel sera soumise l'agglomération parisienne de maintenant jusqu'à l'horizon 2100 (tâche 4a) » et d'autre part « d'inventer une méthodologie de descente d'échelle, permettant, pour une ville donnée, de reconstruire la structure spatiale et l'évolution au jour le jour de l'îlot de chaleur à partir de données météorologiques à l'échelle régionale (tâche 4c) ».

Trois sources de données climatiques pour la France métropolitaine ont été identifiées (cf tableau 1). Les biais systématiques de ces projections climatiques ont été corrigés à partir de l'analyse des percentiles des séries simulées et observées dans le passé.

Toutefois, seules des données journalières sont disponibles dans les projections climatiques. Une méthode d'analyse en types de temps a été menée afin de reconstruire des séries à haute fréquence temporelle (1h), mariant la variabilité temporelle observée pour chaque type de temps par une station rurale voisine de l'agglomération, et les données journalières moyennes du futur. Un algorithme de détermination des types de temps est ainsi appliqué à chaque journée des projections futures (à partir des données modélisées de vent, température minimale et maximale, humidité et pluie). Neuf types de temps ont été identifiés pour Paris. L'intérêt de cette méthodologie, que l'on voulait généralisable, est qu'elle ne nécessite les données que d'une seule station météorologique (il y a une station

météorologique sur chaque aéroport par exemple); elle est donc applicable sur de très nombreuses villes.

| E.Scenario | Num.models | Runs | Horiz. Resol. (km) | Source    |
|------------|------------|------|--------------------|-----------|
| <b>A1B</b> | 6          | 1    | 25                 | ENSEMBLES |
|            |            |      |                    |           |
| <b>A2</b>  | 1          | 1    | 50                 | CNRM      |
| <b>A1B</b> | 1          | 1    | 50                 |           |
| <b>B1</b>  | 1          | 1    | 50                 |           |
|            |            |      |                    |           |
| <b>E1</b>  | 1          | 1    | 50                 | MPI       |
| <b>A1B</b> | 1          | 1    | 50                 |           |
| <b>B1</b>  | 1          | 1    | 50                 |           |

Tableau 1 : Liste des projections climatiques identifiées. La première colonne correspond au scénario d'émission de gaz à effet de serre du GIEC et la deuxième au nombre de modèles régionaux de climat (MRC) qui disposent des données nécessaires.

### **Développement et validation du modèle spatialisé d'îlot de chaleur sur l'agglomération**

Toutefois, les simulations climatiques ne disposent pas, même à l'heure actuelle, de description de la ville. La résolution des modèles climatiques (cf tableau 1) ne permettrait pas de reproduire les îlots de chaleur urbains. Pour simuler celui-ci, on utilise couramment des modèles météorologiques à haute résolution. Toutefois ceux-ci sont très coûteux numériquement, et ne permettent pas l'exploration de nombreux scénarios sur des périodes de temps de l'année ou plus (pertinentes pour la problématique de consommation et production d'énergie). Ainsi, nous avons construit une méthode permettant de reconstruire l'îlot de chaleur urbain à partir d'une donnée de forçage météorologique à la campagne (pouvant provenir d'une station d'observation ou de modèles de climat, une fois ramenée à haute fréquence temporelle comme mentionné dans la section précédente).

Cette tâche a été développée en collaboration avec Bruno Bueno pendant sa thèse au MIT (USA) (Bueno et al 2013a,b). D'abord nous avons proposé un modèle théorique, basé sur un bilan d'énergie de la couche limite urbaine, qui permet de calculer l'intensité de l'îlot de chaleur urbain moyen sur ce volume pour des conditions diurnes/nocturnes et avec ou sans vent. Ce modèle théorique a été validé avec des observations des deux campagnes de mesures BUBBLE (Bâle, Suisse, 10 juin-10 juillet 2002 ; Rotach et al. 2005) et CAPITOU (Toulouse, France, 2004-2005 ; Masson et al. 2008), ainsi que par des simulations idéalisés avec le modèle atmosphérique Meso-NH.

Dans le cadre de la thèse de Julien Le-Bras (hors financement ANR), la validation s'est poursuivie avec une analyse poussée sur la région parisienne sur 14 années (de 1998 à 2011) en exploitant les observations disponibles (notamment les stations opérationnelles de Montsouris et Belleville). L'îlot de chaleur est bien reproduit, avec une erreur quadratique moyenne de moins de 1.3°C (pour un biais nul), alors que les îlots de chaleur dépassent fréquemment 4°C.

### Amélioration du modèle socio-économique d'expansion urbaine : NEDUM

Le modèle qui a été choisi dans MUSCADE pour décrire l'évolution et l'expansion de l'agglomération parisienne est le modèle NEDUM (Non-Equilibrium Dynamical Urban Model). Il se base sur les modèles économiques, fondés sur la théorie de l'économie urbaine (Alonso 1964). Il est adapté à la projection à long terme de la croissance urbaine (Viguié 2012, Viguié et Hallegatte 2012) mais ne permet pas de prendre en compte finement les spécificités géographiques locales et les politiques de planification urbaine à échelle fine, (comme le peuvent, par exemple, les modèles TRANUS ou Urbansim mais qui sont très difficiles à caler sur une ville et adaptés pour des périodes de quelques décennies seulement).

Au cours de MUSCADE, il a été nécessaire de modifier NEDUM assez profondément, de façon à ce qu'il passe d'une représentation unidirectionnelle (la ville est ronde cf. Gusdorf et al. 2008) à une représentation 2D, permettant de prendre en compte, au moins partiellement, des effets géographiques locaux (sans viser une précision géographique extrêmement forte, ce qui n'aurait pas de sens vu l'horizon temporel visé : 2100). Une hypothèse très simplificatrice a été conservée : les emplois sont localisés au centre de la ville. Cette hypothèse est certes discutable, mais elle est assez bien vérifiée pour l'agglomération parisienne. Il ne faut pas comprendre cette contrainte comme la réalité stricte, mais comme une simplification des mouvements pendulaires journaliers, où, *en moyenne*, les habitants vont vers Paris (parfois plus près, parfois plus loin). Par contre, les habitations peuvent se situer n'importe où. Le modèle est ainsi bâti sur un double arbitrage des ménages (habiter près du centre pour avoir moins de transport ou payer son habitation moins cher en banlieue) et des investisseurs immobiliers (construire des immeubles où le foncier est cher, des maisons ailleurs). La version 2D du modèle prend en compte les réseaux de transport et les contraintes de zones inconstructibles (zones protégées, zones de bruits d'aéroports, zones inondables éventuellement, ...).

### Développement et validation du modèle d'évolution architecturale : GENIUS

Afin d'évaluer la consommation énergétique des bâtiments et le microclimat urbain dans les villes futures, il est nécessaire de connaître des données d'entrée précises telles que la morphologie des bâtiments, leur matérialité, leurs équipements, etc.

Or, dans le cadre de ce projet prospectif, les informations utilisables en entrée sont soit issues de scénarios et donc peu détaillées et non cartographiées, soit issues des cartes de densité de surface de plancher bâties, produites par NEDUM, et ne contenant pas d'indication sur la morphologie urbaine.

Nous avons donc choisi, alors que ce n'était pas prévu au départ du projet MUSCADE, de développer un modèle, basé sur des types d'îlots urbains (au sens de quartiers), permettant de fournir une **information architecturale**, certes simplifiée par rapport à la ville réelle, au modèle de thermique du bâtiment et micro-météorologie TEB. Cette tâche a été naturellement confiée au Laboratoire de Recherche en Architecture, ce qui a eu pour effet de limiter les avancées prévues initialement lors de la proposition de projet, aussi confiées au LRA, sur la modélisation des systèmes de production d'énergie.

La génération d'îlots se réalise en deux temps :

Tout d'abord, à partir de bases de données urbaines actuelles, nous générons **une première carte constituée de ce que nous appelons les « îlots types »**. Il s'agit d'une représentation simplifiée de la ville constituée de l'assemblage d'archétypes d'îlots urbains.

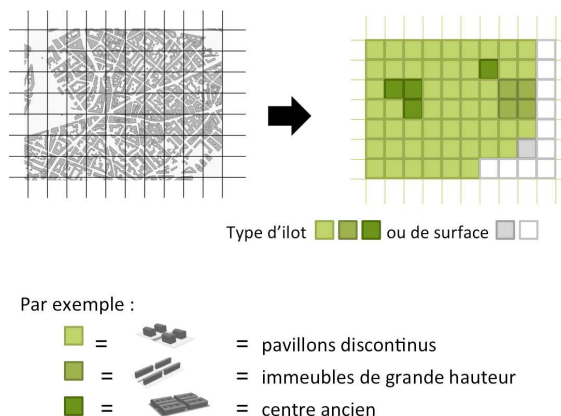


Figure 2 : Génération de la carte initiale - Schéma de principe.

Dans un deuxième temps, pour chaque année jusqu'à 2100, GENIUS échange avec NEDUM qui lui fournit des informations sur l'occupation des sols et la densité bâtie brute. En fonction des sorties de NEDUM, des scénarios, de la carte d'îlots types de l'année précédente et de règles d'évolution urbaine, GENIUS **génère une nouvelle carte chaque année**.

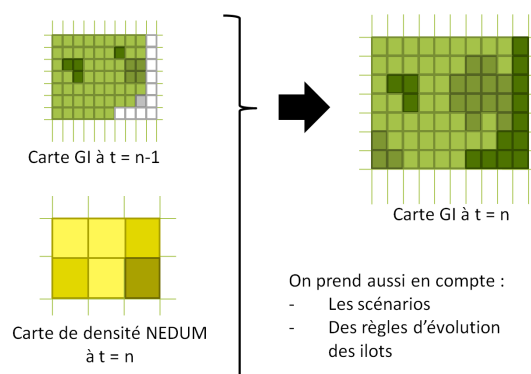


Figure 3 : Génération des cartes d'évolution - Schéma de principe.

Nous avons sélectionné 7 formes urbaines de référence ou « îlots types » :

| Type                    | Illustration | Type                           | Illustration |
|-------------------------|--------------|--------------------------------|--------------|
| N°1 Pavillon continu    |              | N°4 Immeuble discontinu        |              |
| N°2 Pavillon discontinu |              | N°5 Immeuble de grande hauteur |              |
| N°3 Immeuble continu    |              | N°6 Centre ancien              |              |
|                         |              | N°7 Bâtiment d'activité        |              |

Tableau 2 : Description des 7 îlots types retenus.



Chaque maille de 250 m x 250 m contient un type d'îlot et un seul parmi les 7 formes urbaines de référence. Un ou plusieurs usages peuvent être attribués au type d'îlot choisi. Chaque maille contient également des bâtiments auxquels sont associées des données attributaires (hauteur, âge, surface, ...), soit une soixantaine d'indicateurs en tout.

Des règles permettant de définir les seuils de transition entre typologies sont aussi nécessaires. Différents scénarios permettent ainsi de considérer des politiques urbaines différentes. Ces scénarios prennent en compte l'aménagement du territoire au niveau local (typiquement le PLU et les SCOT, en lien en Île-de-France avec le Sdrif). Une étude des différents schémas directeurs d'aménagement du territoire régional a pu mettre en évidence un tournant urbanistique autour des années 1990. En effet, les objectifs affichés ont évolué entre les années 60 et les années 2000, passant d'une politique quantitative de construction de logements, de réseau routiers et d'émergence des villes nouvelles à une politique plus qualitative, de plus en plus tournée vers la préservation de l'environnement, la qualité du cadre de vie et un développement urbain durable. Par ailleurs, cette analyse de l'évolution de tissus urbains franciliens (livrable réalisé par le LIENS), à partir de différentes versions de la base de données des Modes d'Occupation des Sols produites par l'IAU, permet de définir les scénarios de type « verticalisation » (avant 1974) et « fil de l'eau » (après 1974). D'autres scénarios, favorisant le petit collectif et les maisons mitoyennes par exemple, ont été réalisés à partir de dires d'expert.

Au cours de la simulation de GENIUS, en fonction de la pression foncière (gérée par NEDUM qui indique la quantité à bâtir dans chaque quartier), certains quartiers sont reconstruits suite à cette densification de la ville. Les paramètres descriptifs de chaque maille évoluent en fonction de lois statistiques issues d'une analyse architecturale sur l'Île-de-France. Ainsi, une zone pavillonnaire peut se densifier soit par division de parcelles ou agrandissement de pavillons (le type reste pavillonnaire), soit se densifier via destruction et reconstruction de petit collectif (le type change).

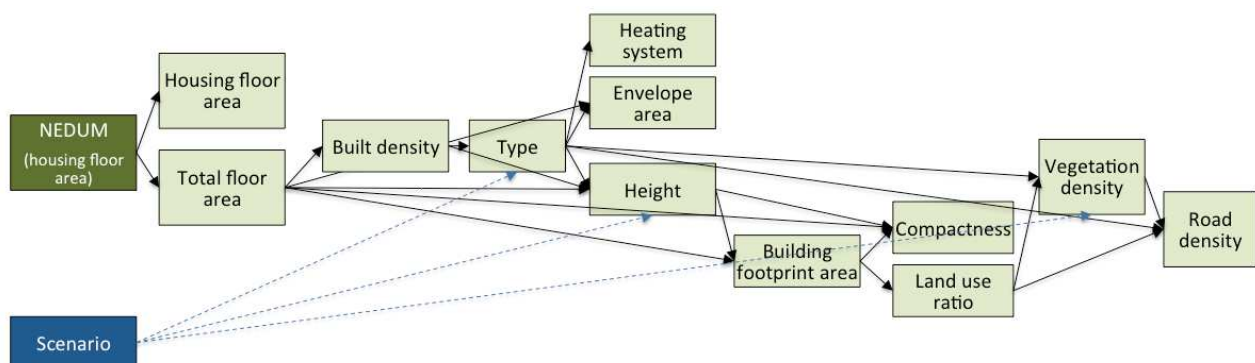


Figure 4 : Liens causaux induisant des modifications des indicateurs liés à chaque maille dans GENIUS. Les scénarios d'urbanisme interviennent au niveau du changement (ou pas) de typologie en fonction de la densité, de la hauteur (scénario favorisant des tours par exemple) et de la végétalisation de la ville.

### Développement des aspects énergétiques dans TEB

Le modèle TEB (Town Energy Balance, Masson 2000) permet de simuler les échanges d'énergie entre ville et atmosphère. Il a récemment été amélioré afin d'être aussi capable de

simuler finement des impacts liés à l'énergétique du bâtiment ou le confort humain, ainsi que certains aménagements pouvant être mis en œuvre dans des stratégies d'adaptation au changement climatique (végétalisation, toits végétalisés, climatisation, etc...).

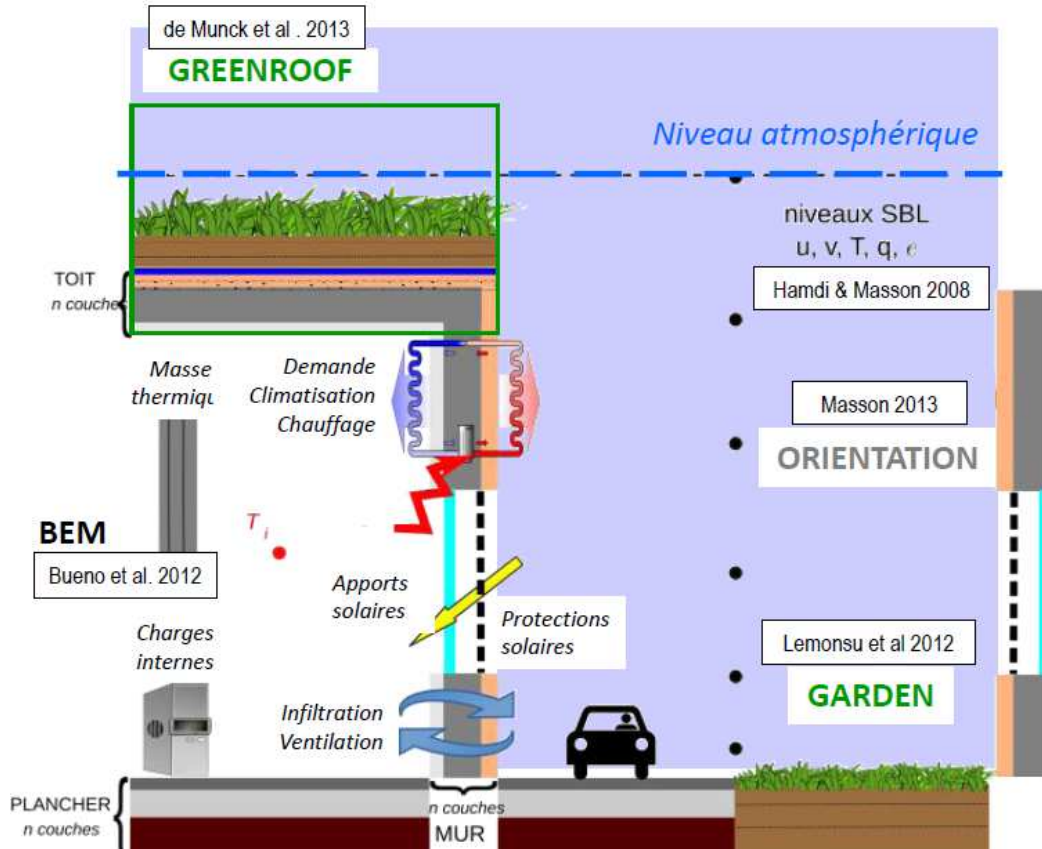


Figure 5 : Représentation de l'ensemble des processus représentés du modèle TEB.

Plus en détail, le bilan d'énergie des bâtiments prend en compte les vitrages (et volets), les charges internes, la conduction dans les parois (décrites avec plusieurs types de couches possibles, permettant en particulier l'isolation à l'intérieur ou par l'extérieur), la ventilation, l'infiltration, et différents systèmes de climatisation et chauffage. Les rejets d'énergie liés à ces systèmes vers l'extérieur peuvent se faire au niveau de la façade ou du toit. Les consommations d'énergie liées au chauffage et à la climatisation sont calculées à chaque instant (en fonction des conditions extérieures et intérieures et des échanges entre les deux) et intégrées sur l'année.

Le micro-climat dans la rue est simulé avec une bonne résolution verticale (6 niveaux sous 30 m). Les profils de température, vent, humidité et turbulence de l'air sont ainsi simulés et interagissent avec les éléments bâtis et la surface (routes et jardins). Les jardins, simulés avec le modèle d'« Interface Sol-Biosphère-Atmosphère » (ISBA) au sein même du canyon urbain sont bien sûr aussi utilisés, afin de prendre en compte des stratégies de végétalisation. Un indice de confort (UTCI, Universal Thermal Climate Index) est calculé à l'intérieur mais aussi dans la rue, à l'ombre et au soleil. Les toits végétalisés sont aussi simulés avec ISBA, mais en



modifiant le fonctionnement du sol pour tenir compte du fait que l'on utilise des substrats artificiels.

Les surfaces urbaines sont donc simulées par TEB. Les surfaces végétales naturelles ou agricoles à l'extérieur de la ville sont simulées par ISBA. Les contrastes de comportement énergétique entre les deux vont créer un îlot de chaleur, pouvant être différent suivant le scénario urbain simulé.

Un module de simulation de panneaux solaires (et leur impact sur le bâti sous-jacent) a aussi été ajouté à TEB pour MUSCADE, afin de quantifier la part d'énergie renouvelable qui pourrait être produite selon divers scénarios d'implantation de panneaux (thermiques ou photovoltaïques). Ce travail a résulté d'une collaboration entre le GAME, le LRA et le CSTB.

## C RESULTATS OBTENUS

### C.1 VALIDATION DES MODELES

Puisque l'on ambitionnait de projeter l'expansion de l'agglomération parisienne sur le siècle à venir, il convenait d'abord de comparer l'approche utilisée aux évolutions réellement observées sur tout le siècle passé, en remontant aussi loin que 1900. Seule une telle comparaison permet en effet de valider en quelque sorte le réalisme des scénarios obtenus. Les travaux de reconstitution de l'usage des sols passé en Île-de-France, réalisés par l'IAU, ont permis de mener à bien cette tâche. Ceci représentait tout de même un défi, non seulement vis-à-vis de la robustesse du modèle, mais aussi vis-à-vis de la collecte de données, notamment sur les systèmes de transport (temps et coûts) et les données de loyers et coût de logement dans le passé.

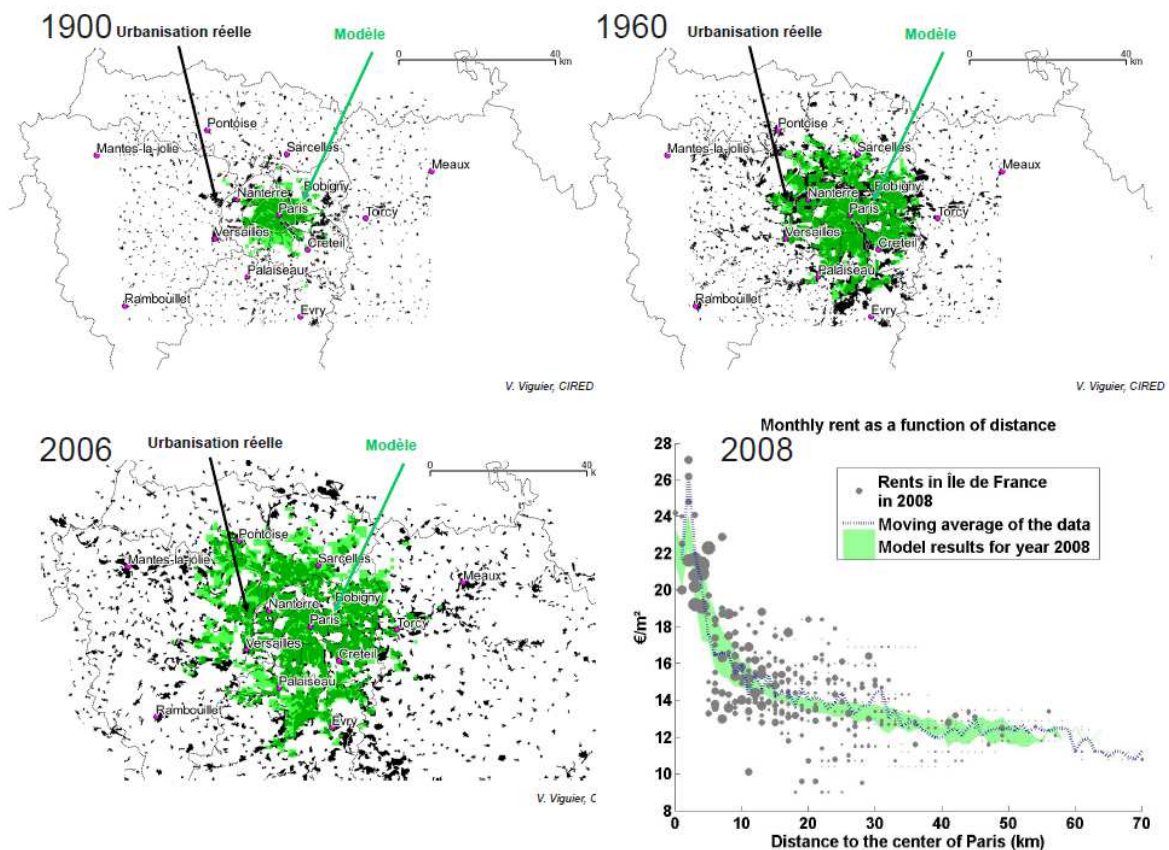


Figure 6 : Validation de NEDUM sur le passé. Les données réelles sont représentées en noir, et les simulations du modèle en vert transparent.

Comme présenté sur la figure 6, NEDUM est capable de bien reproduire l'expansion parisienne au cours du siècle dernier. Il convient de souligner ici qu'il n'y a pas eu de calage particulier de paramètres internes au modèle, et les données d'entrées (démographiques et

économiques) sont indépendantes du modèle. Le résultat n'est certes pas parfait, mais la forme en doigts de gant est bien représentée. Les villes les plus éloignées, comme Melun, Mantes La Jolie ou Meaux, ne sont pas bien vues, mais ceci est lié au fait qu'elles représentent des centres d'emploi en elles-mêmes, et ne sont donc pas simulées par le modèle du fait de l'hypothèse que tous les emplois sont au centre de Paris.

La validation ne s'est pas limitée à l'aspect expansion géographique, mais aussi à la répartition de la population (seule la population totale de l'agglomération étant fournie au modèle, et non sa répartition) et à des données économiques comme le coût des loyers (cf figure 6 en bas à droite). Le modèle est ainsi capable de bien représenter l'arbitrage des ménages entre habiter proche du centre (et payer cher) ou loin (et se déplacer longtemps chaque jour pour aller au travail).

Afin de valider GENIUS, nous avons choisi de faire une simulation sur le passé de l'évolution de Paris et de comparer les résultats à la réalité de la ville existante. Cette simulation a été réalisée entre 1962 et 2008, période au cours de laquelle il a été possible de reconstruire à diverses dates (1962, 1968, 1975, 1982, 1990, 1999, 2008) des quantités de surface de plancher à une résolution de 250m. L'on cherche alors à savoir si GENIUS est capable, que ce soit pour des mailles non encore bâties en 1962 ou changeant de type urbain entre 1962 et 2008, de produire le bon type de bâti et au bon moment.



Figure 7 : Validation de GENIUS sur le passé : à gauche 1962 ; au milieu : 2008 ; à droite : simulation des types d'îlots urbains en 2008 à partir de 1962 (bleu : maisons, vert : collectif, jaune : industriel). Nota : le bâti issu de la BD Topo de l'IGN est indiqué en surimpression pour information (GENIUS ne gère que les types d'îlots et indicateurs à l'échelle des carrés de couleur).

Les taux de validation des typologies sont très bons :

- le pourcentage de validation global du bâti est de 91% ;
- le pourcentage de validation du bâti créé par GENIUS entre 1962 et 2008 est de 93% ;

- le pourcentage de validation du bâti réellement construit entre 1962 et 2008 (c'est à dire les mailles de la carte de 2008 dont l'année de construction est postérieure à 1962) est de 84% ;
- parmi les quartiers qui ont effectivement évolué en termes de forme architecturale au cours de la période, 66% des quartiers ont été bâtis (ou ont changé de forme urbaine) au bon moment.

La figure 7 présente les résultats de la simulation GENIUS sur une zone en très forte expansion : Marne-La-Vallée. Les zones les plus densifiées, traduites par de l'habitat collectif, sont bien localisées, même si un peu sous-estimées.

Les développements sur l'énergétique du bâtiment par TEB ont été validés à la fois à l'échelle locale et à l'échelle de l'agglomération. Des comparaisons avec Energy+, réalisées à l'échelle de bâtiments franciliens typiques en collaboration entre le CNRM et le CSTB, ont permis de montrer que TEB parvient à reproduire, dans la grande majorité des cas, les simulations d'Energy+ avec moins de 5% de différence, et cela aussi bien en climat actuel que futur (Pigeon et al 2014).

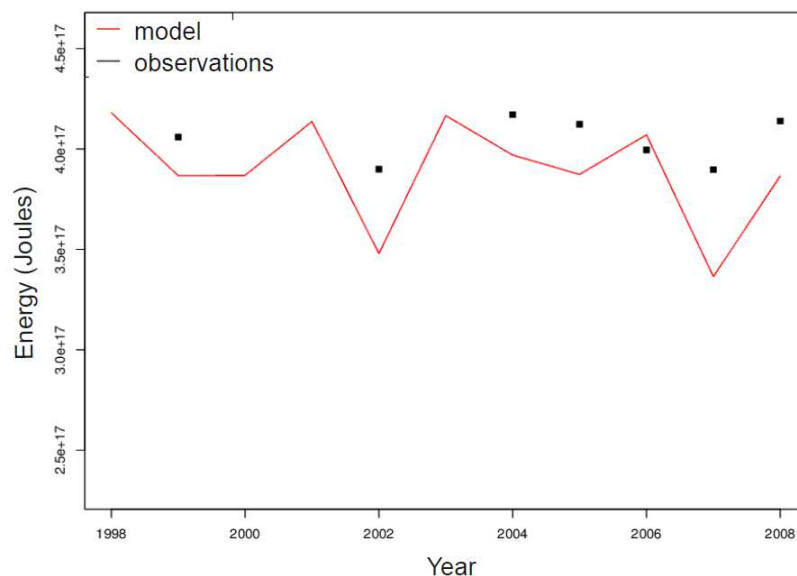


Figure 8 : Validation de la consommation d'énergie annuelle simulée par TEB (rouge) par rapport aux observations disponibles sur le site du ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie (<http://www.stats.environnement.developpement-durable.gouv.fr/Eider/series.do#>). Figure issue de Masson et al 2014.

De plus, une comparaison avec les observations de consommation d'énergie sur l'Île-de-France sur le tertiaire et le résidentiel (ce qui est simulé par TEB) montre aussi que TEB simule correctement la consommation à l'échelle de l'ensemble de l'agglomération (moins de 5% de différence) avec une variabilité inter annuelle aussi bien reproduite (figure 8).

Ainsi, nous considérerons que l'erreur commise dans nos simulations sur la consommation d'énergie des évolutions futures de l'agglomération parisienne est de 5%. **Seront ainsi considérés significatifs des écarts de consommations de plus de 5% entre deux scénarios.**

Enfin, le module de toits végétalisés a été validé avec des données recueillies par le CEREMA à Nancy (de Munck et al 2013). Cette validation a permis, via une analyse de sensibilité, de déterminer la nature du comportement hydrique de la couche de drainage et la façon de le modéliser.

## C.2 SIMULATIONS SYSTEMIQUES DANS LE SIECLE FUTUR

Ensuite, des scénarios d'évolution de l'agglomération parisienne dans le futur ont pu être réalisés (cf figure 9). Leurs impacts en termes de consommation d'énergie et production d'énergie solaire ont été quantifiés à très long terme, à l'horizon 2100. Afin de pouvoir plus facilement interpréter l'influence de certains (groupes de) leviers, les scénarios systémiques ont été conçus et regroupés comme suit :

- **Analyse de l'expansion urbaine** : expansion « ville étendue » ou « ville compacte ». Dans cette dernière, est appliquée **une ceinture verte** stricte et très large sur l'ensemble de l'Île-de-France : les contraintes de planification urbaine font que la ville ne peut s'étendre dans les zones rurales qui n'ont pas encore été construites, et donc se densifie nécessairement sur elle-même. Cette densification est toujours contrôlée par le modèle socio-économique NEDUM. Le scénario « ville étendue » (qui correspond à une évolution au fil de l'eau) est alors considéré comme une référence.
- **Analyse des contraintes architecturales locales** : dans le scénario de ville compacte, plusieurs stratégies de planification locale qui influent sur les formes et types des bâtiments sont explorées : « fil de l'eau : maisons et petit collectif », « petit collectif fortement favorisé et végétalisation », « verticalisation et grand collectifs ».
- **Analyse du rôle de la végétation** : dans le scénario d'expansion « fil de l'eau » (le plus étendu), on étudie l'influence de diverses stratégies de végétalisation : avec ou sans arrosage des jardins (par défaut ils sont arrosés) et avec ou sans toits végétalisés.
- **Analyse des comportements** : nous étudions ici (i) l'influence de l'usage économe ou dispendieux du chauffage et de la climatisation (avec comme hypothèse une généralisation de la climatisation en 2100, suite aux conclusions du projet ANR VURCA qui prévoit de fortes canicules dans le futur) ; (ii) l'influence de systèmes de ventilation naturelle (mais en présence de climatisation) ; (iii) l'influence de comportements comme la fermeture des volets le jour lorsqu'il fait trop chaud (comme cela se fait dans les villes du sud).

Les résultats associés à ces scénarios systémiques jusqu'en 2100 sont présentés dans la section suivante.



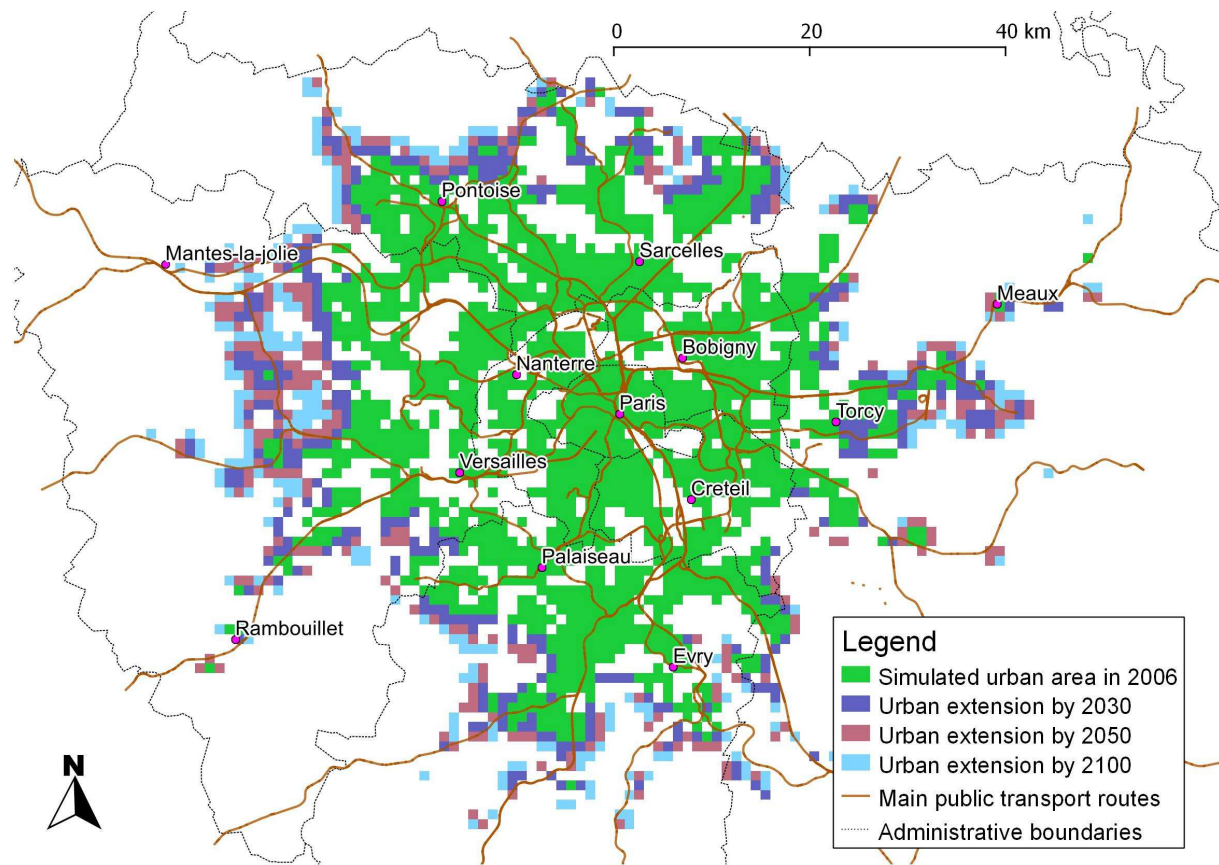


Figure 9 : Agglomération parisienne simulée avec NEDUM à partir d'un scénario « ville étendue ».

## D EXPLOITATION DES RESULTATS

L'ensemble de tous ces développements a permis de réaliser des simulations systémiques de l'évolution de l'agglomération parisienne et des consommations d'énergie (et production d'énergie solaire) associées jusqu'en 2100. L'analyse des simulations des scénarios systémiques présentés ci-dessus permet d'arriver aux conclusions suivantes.

### D.1 VILLE COMPACTE / VILLE ETENDUE

*Même si l'îlot de chaleur urbain est peu impacté par la taille et la forme de la ville, la ville compacte dégrade le confort thermique des habitants en comparaison de la ville étendue.*

En climat présent, l'îlot de chaleur maximum, que ce soit le jour ou la nuit, n'est pas significativement modifié géographiquement si l'agglomération parisienne suit une évolution vers une ville étendue ou une ville compacte. C'est à dire qu'en un point donné de l'agglomération, la température est à peu près similaire dans les deux cas. **L'hiver, le jour, la ville compacte semble plus fraîche que la ville étendue (de 0.2 à -0.3°C) assez uniformément spatialement.** Ceci est sans doute lié au fait que le soleil pénètre moins dans les rues. La nuit par contre, il n'y a quasiment pas d'impact dans Paris et en petit couronne, et la ville compacte semble un peu plus fraîche (de 0.2°C) dans les zones pavillonnaires en bordure de ville vers l'Ouest et le Sud (car ces zones sont tout simplement au contact avec l'air frais venant de la campagne). Il faut toutefois noter que ces impacts relativement faibles peuvent s'expliquer du fait que les formes architecturales, elles, varient peu entre les scénarios : on ne favorise pas spécialement l'habitat collectif dans la ville compacte, sauf si la densité devient telle qu'on ne peut faire autrement.

**L'été, l'îlot de chaleur en ville compacte est typiquement 0.2°C plus chaud dans la très proche banlieue** (très localement jusqu'à 1°C la nuit) ainsi que dans la zone pavillonnaire en limite de la ville (figure 10). Pour cette zone limitrophe, ceci peut s'expliquer d'une part par la densité de maisons plus importante qu'en ville étendue (où les zones pavillonnaires s'étalent plus loin dans les zones initialement rurales), et d'autre part par le fait que la ville étendue présente alors en août, loin du centre, un léger îlot de fraîcheur du fait de l'arrosage des jardins (cf plus loin une discussion sur l'effet de l'irrigation).

Cependant, dans la ville compacte, les habitants sont localisés dans des zones plus denses mais surtout plus proches du centre-ville. Or l'îlot de chaleur est plus fort en centre-ville qu'en périphérie. Ainsi, les habitants sont plus exposés (+5% pour un seuil donné d'îlot de chaleur) à la chaleur dans une ville compacte que dans une ville étendue, toutes choses égales par ailleurs. Des calculs d'exposition à un indice de stress (UTCI) ont aussi été réalisés.



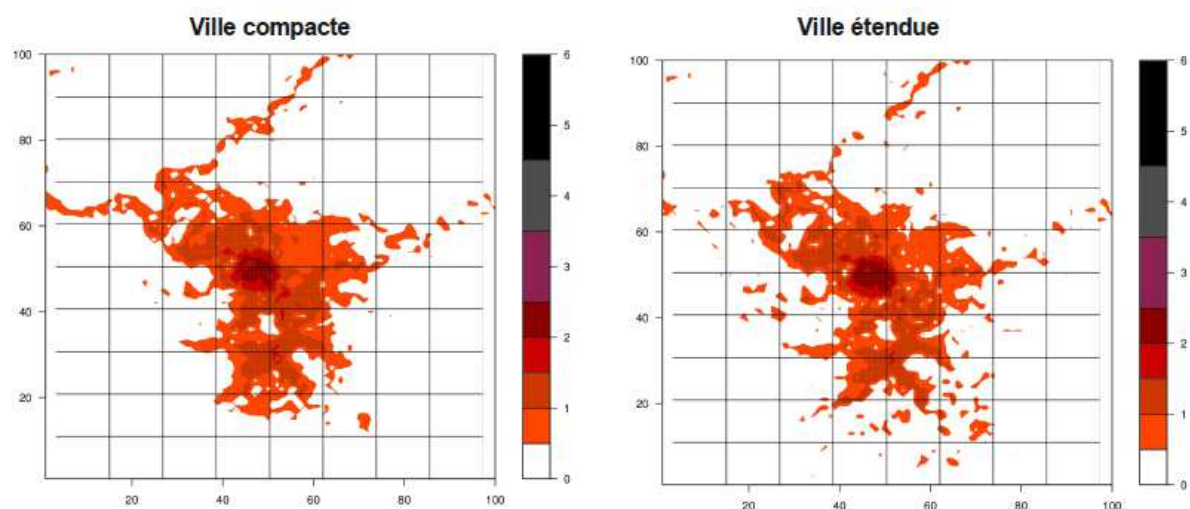
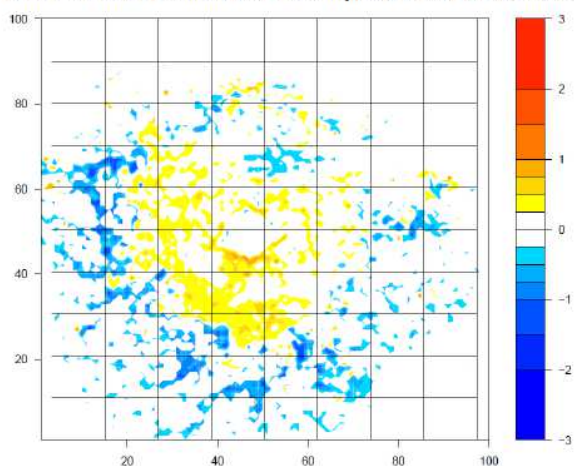


Figure 10 : Îlot de chaleur estival (nocturne, en climat présent) pour les villes compacte et étendue, en climat présent. La zone tracée couvre 100km par 100km.

Les seuils de stress pour cet indice sont indiqués sur la figure ci-contre. Dans nos estimations de stress, ont été pris en compte tous les seuils de stress thermique à partir de modéré. Ainsi, la population dans la ville compacte est sujette à environ 45 min par jour de stress supplémentaire (figure 11, droite), du fait d'un indice de stress plus fort d'environ 30 min dans la zone périurbaine (figure 11, gauche) et d'une exposition plus forte (localisation des habitants au sein de l'agglomération).

| Echelle UTCI (°C) | Niveau de stress            |
|-------------------|-----------------------------|
| au-dessus de + 46 | Stress thermique extrême    |
| + 38 à + 46       | Stress thermique très élevé |
| + 32 à + 38       | Stress thermique élevé      |
| + 26 à + 32       | Stress thermique modéré     |
| + 9 à + 26        | Pas de stress thermique     |

Temps passé par jour en stress thermique (en heures) : Différence entre scénarios « ville compacte » et « ville étendue »



Temps passé par jour en stress thermique (en heures) intégré sur la population pour les deux scénarios

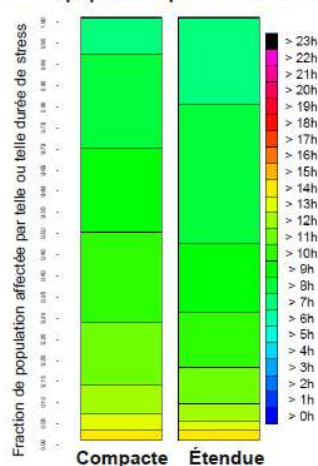


Figure 11 : Comparaison du stress thermique en août entre ville compacte et étendue (climat présent).

Avec le réchauffement climatique (figures 12 et 13), les mêmes conclusions s'appliquent à quelques différences près. Premièrement, les températures sont bien sûr plus élevées, et le temps d'inconfort augmente de 4 h par jour. Ensuite, l'îlot de chaleur s'intensifie plus dans la ville compacte que dans la ville étendue, avec un intensification en petite couronne de plus de 0.3 à 0.5°C en journée et localement la nuit de 2 à 3°C. La figure 12 montre notamment que les zones fraîches observées en petite couronne dans le scénario de ville étendue (carte de droite) sont intégrées dans l'îlot de chaleur dans le scénario de ville compacte (carte de gauche).

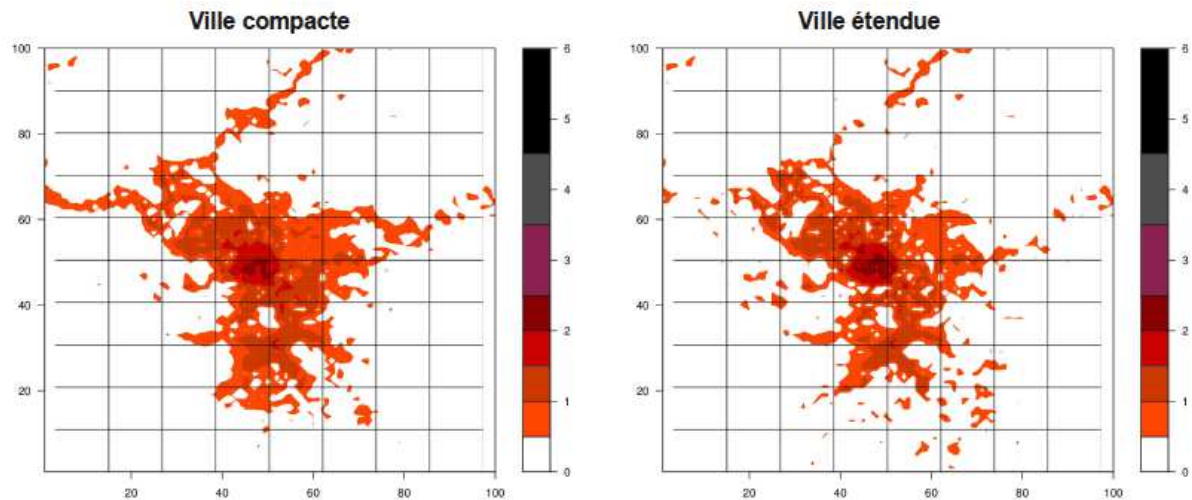


Figure 12 : Îlot de chaleur estival (nocturne, en climat futur) pour les villes compacte et étendue.

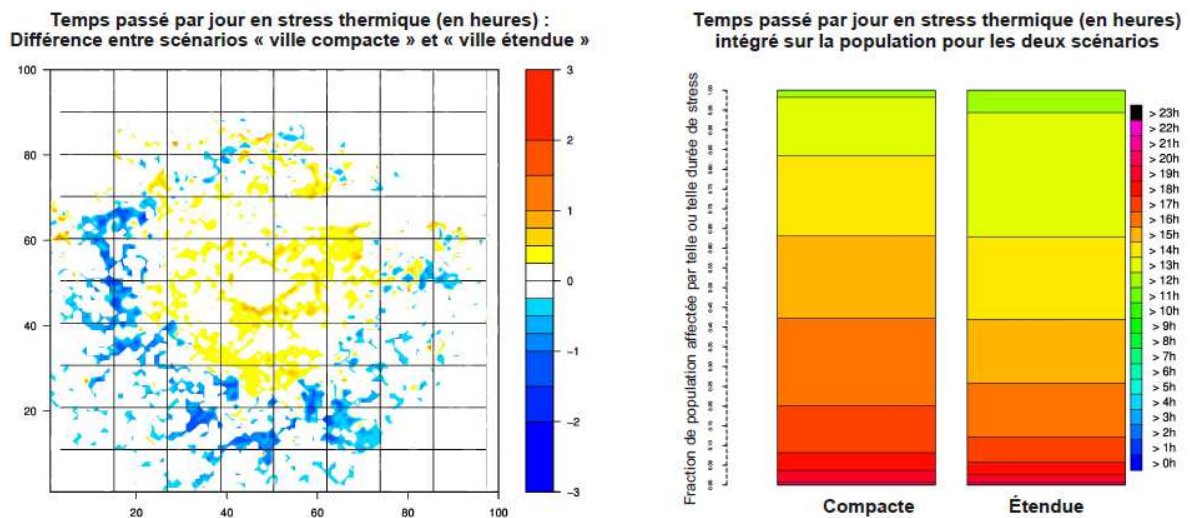


Figure 13 : Comparaison du stress thermique en août entre ville compacte et étendue (climat futur avec réchauffement modéré).

*En climat futur, la production potentielle d'énergie solaire et la consommation d'énergie des bâtiments pour le chauffage et la climatisation peuvent être similaires à l'échelle annuelle.*

Ce résultat concerne l'énergie finale, c'est-à-dire consommée dans chaque bâtiment. Rien n'est précisé sur la forme de l'énergie consommée (électricité, gaz, ENR) et par conséquent sur les pertes d'énergie le long de la chaîne entre le lieu où est transformée l'énergie primaire et le bâtiment. On ne considère pas, par exemple, les impacts de systèmes tels que les réseaux de chaleur. Les principaux résultats concernant les comparaisons entre ville compacte et ville étendue sont résumés dans le tableau 3.

|              |                |                   | Conso totale/m <sup>2</sup> | Conso chauffage/m <sup>2</sup> | Conso Clim/m <sup>2</sup> | Conso totale sur l'agglomération |        | Production solaire totale sur l'agglomération |        |
|--------------|----------------|-------------------|-----------------------------|--------------------------------|---------------------------|----------------------------------|--------|-----------------------------------------------|--------|
|              |                |                   | KWh/m <sup>2</sup> /an      | kWh/m <sup>2</sup> /an         | kWh/m <sup>2</sup> /an    | Ktep/an                          | GWh/an | Ktep/an                                       | GWh/an |
| Paris Actuel | Climat présent |                   | 130                         | 119                            | 11                        | 9701                             | 112797 | 0                                             | 0      |
|              | Climat présent | Panneaux solaires | 132                         | 122                            | 11                        | 9849                             | 114517 | 2566                                          | 29833  |
| Paris 2100   | Climat présent | Ville compacte    | 45                          | 40                             | 5                         | 5176                             | 60189  | 3662                                          | 42578  |
|              | Climat présent | Ville étendue     | 43                          | 38                             | 5                         | 5159                             | 59983  | 3933                                          | 45728  |
|              | Climat futur   | Ville compacte    | 31                          | 22                             | 9                         | 3525                             | 40983  | 3662                                          | 42578  |
|              | Climat futur   | Ville étendue     | 29                          | 21                             | 9                         | 3537                             | 41122  | 3933                                          | 45728  |

Tableau 3 : Consommations d'énergie sur l'année simulées pour la ville compacte et la ville étendue.

Du fait de l'air un peu plus froid en hiver dans la ville compacte (ombres des bâtiments le jour et zones périurbaines denses à proximité de la campagne), la **consommation de chauffage par m<sup>2</sup> y est plus élevée dans nos simulations que dans une ville étendue** : 40 kWh/m<sup>2</sup>/an contre 38 kWh/m<sup>2</sup>/an (ce qui est tout juste significatif vu l'incertitude sur le modèle).

Il faut noter que l'on est en 2100 et que l'ensemble des bâtiments, maisons ou immeubles, sont supposés bien isolés dans nos scénarios technologiques. Le comportement des occupants résultant de l'augmentation des performances énergétiques des bâtiments (meilleure qualité de l'enveloppe, équipements plus efficaces qu'actuellement) peut avoir pour conséquence de « gâcher » l'énergie. En effet, la consommation d'énergie étant devenue objectivement moins élevée qu'auparavant pour un niveau de confort donné, les occupants peuvent être tentés d'être moins regardant et de consommer plus que ne leur permettrait les performances élevées de leur bâtiment. Cet effet rebond est déjà observé dans des bâtiments

récemment rénovés thermiquement et devra être examiné en détail quant à ses conséquences futures lors de prochains projets (par exemple l'ANR-MapUCE). Cet effet n'a pas été pris en compte dans le projet MUSCADE.

Cependant, à l'échelle de l'agglomération, les habitants vivent dans des **logements plus petits** dans le scénario de ville compacte, du fait du coût du foncier élevé (raréfaction des surfaces de construction autorisées). Par conséquent, lorsque la consommation d'énergie est intégrée sur l'ensemble des bâtiments, alors les deux types d'expansion conduisent dans nos simulations à une consommation d'énergie (finale) identique pour le chauffage. En ce qui concerne la climatisation en été, il n'y a pas non plus de différence significative entre les deux types d'expansion urbaine.

En termes de production par les panneaux solaires, les bâtiments en ville compacte produisent chacun plus en moyenne, pour deux raisons. La raison principale est que, dans nos simulations, quand il y a plus d'habitants par bâtiment, on favorise l'implantation de panneaux thermiques (pour l'eau chaude sanitaire). Ces panneaux sont plus performants que les panneaux photovoltaïques. La deuxième raison est que la ville étant plus compacte, certaines zones pavillonnaires ont été transformées en habitats collectifs, pour lesquels les toits sont plats et disposent de plus de surface pour l'implantation de panneaux solaires. Toutefois, à l'échelle de l'agglomération, le plus faible nombre de bâtiments fait que la ville étendue conserve un plus fort potentiel d'installation de panneaux solaires localement (c'est à dire sur les bâtiments). A noter que nous n'avons pas supposé qu'il y avait des fermes solaires dans les zones rurales, en particulier celles non occupées par la ville compacte.

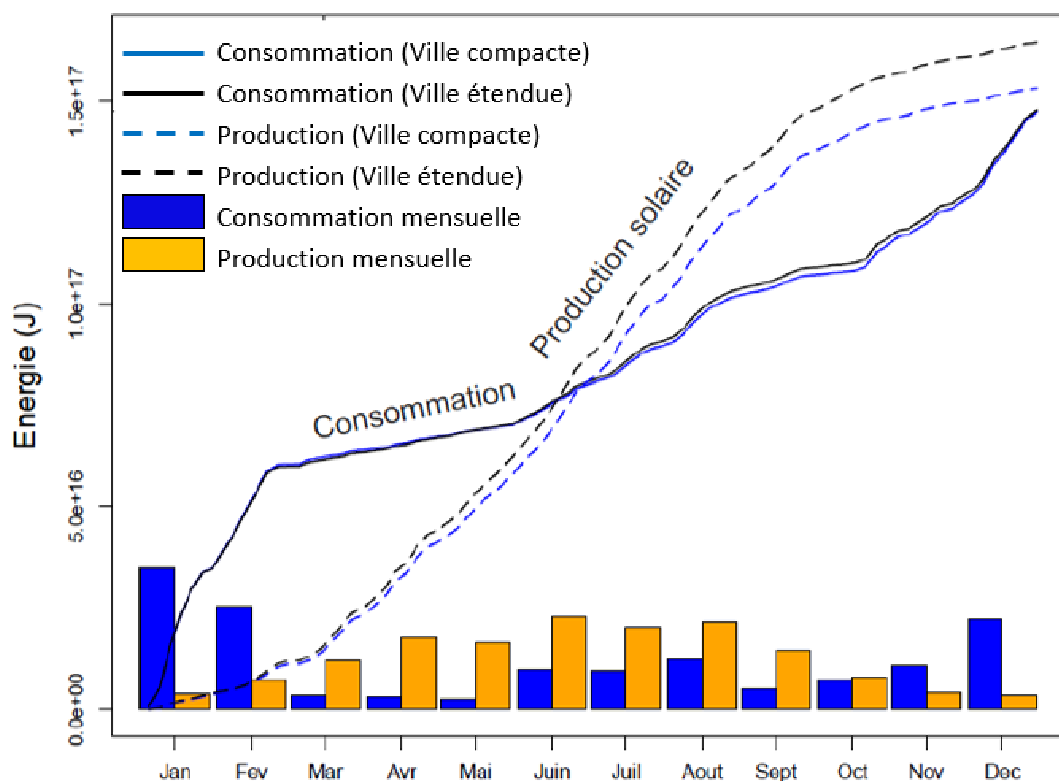


Figure 14 : Consommation et production solaire d'énergie en climat futur pour les deux types d'expansion urbaine (villes étendue et compacte).

Si l'on considère le bilan « production potentielle » moins « consommation d'énergie des bâtiments » sur une année complète, il en ressort ainsi que **la ville étendue est (un peu) plus efficace en termes énergétiques que la ville compacte**. Ceci ne tient pas compte de la consommation liée à l'éclairage (avec un effet ambigu : plus de surface habitée à éclairer dans la ville étendue, mais avec des bâtiments ayant plus accès au ciel et à la lumière naturelle dans ce même scénario).

D'autre part, même en climat présent (où le chauffage est important), les rénovations et les normes constructives appliquées dans nos scénarios d'ici la fin du siècle font que les bâtiments sont très bien isolés, consomment beaucoup moins en chauffage qu'actuellement, et donc que **l'énergie solaire produite couvre quasiment l'équivalent des consommations d'énergie de chauffage et climatisation**. Il faut toutefois noter que d'une part on ne tient compte là que d'une seule source d'énergie décentralisée, et d'autre part que la consommation d'énergie (majoritaire en hiver) et la production d'énergie (majoritaire en été) **ne sont pas synchrones** (ni utilisées pour la même chose, une partie des panneaux servant à l'eau chaude sanitaire). Ce déphasage temporel nécessiterait soit de stocker l'énergie sur de longues périodes, soit de l'utiliser pour d'autres fins.

*Avec le réchauffement climatique, les consommations d'énergie du bâti liées au chauffage et à la climatisation pour les villes compacte et étendues restent similaires.*

En tenant compte d'un réchauffement climatique (en moyenne 4°C pour fixer les idées), les consommations de chauffage, principalement liées à la température, diminuent fortement. Les consommations de climatisations, quant à elles, augmentent mais moins rapidement : elles dépendent bien sûr de la température, mais surtout du rayonnement solaire (et de l'apport solaire direct à travers les vitrages). Pour un tel réchauffement climatique, la consommation en climatisation agrégée sur l'année atteint tout de même 40% de la consommation en chauffage pour l'agglomération parisienne. Au final, la consommation d'énergie météo-dépendante (chauffage et climatisation) diminue.

La production potentielle d'énergie solaire, par contre, reste similaire en climat futur par rapport au climat présent. Par conséquent, **en termes de bilan net « production solaire potentielle » moins « consommation d'énergie du bâti », la ville étendue devient plus efficace que la ville compacte** : la ville étendue couvre *l'équivalent* de 111% des besoins d'énergie en chauffage et climatisation grâce à l'énergie solaire produite, alors que ce ratio n'atteint que 104% pour la ville compacte.

Ceci indique que la voie vers les « **villes à énergie positive** » semble possible. Toutefois, le terme important est le mot *équivalent*. En effet, les énergies produites et consommées ne le sont pas, rappelons-le, au même moment. De plus, nous analysons ici uniquement une fraction des consommations d'énergie. Les consommations liées à l'eau chaude sanitaire et à l'éclairage, par exemple, ne sont pas comptabilisées dans cette consommation, alors même qu'une partie des panneaux solaires produit justement l'énergie pour l'eau chaude sanitaire. Il en va de même pour les émissions liées aux transports, qui sont très dépendantes de la

forme de la ville. Dans nos scénarios, les consommations liées au transport apparaissent ainsi légèrement plus faibles (de l'ordre de 5%, figure 15) dans le scénario de ville compacte par rapport au scénario de ville étendue. Il est cependant difficile de comparer nos estimations en termes de consommation d'énergie dans les transports et dans les bâtiments, car la précision des modèles utilisés n'est pas la même.

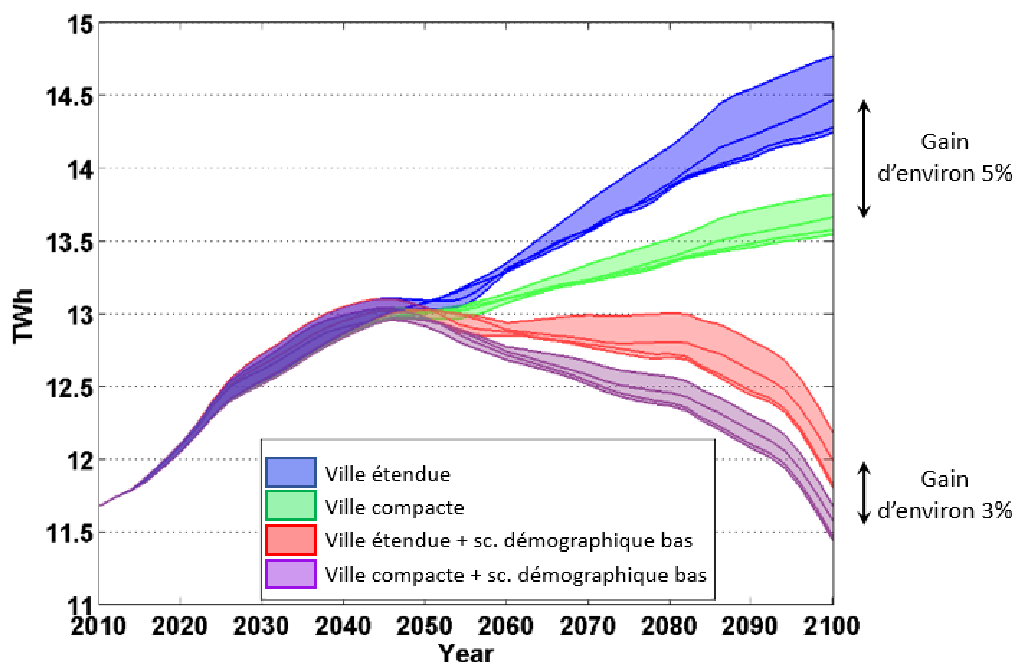


Figure 15 : La « consommation potentielle d'électricité » liée au transport dans tous les scénarios. Il s'agit de la distance totale parcourue en transport multipliée par ce que ce transport consommerait comme énergie s'il était entièrement électrique. Nous avons supposé ici qu'un passager.km (que ce soit en voiture ou en transport en commun) consommait 0.18 kWh (ordre de grandeur de la consommation des véhicules électriques actuels, et utilisé dans le modèle Imaclim du CIRED).

En ce qui concerne les émissions de GES des bâtiments, elles ont été évaluées en tenant compte d'un scénario « décarbonné ». Celui-ci se base sur le projet COSIME 2050 (Construction Simplifiée d'un Modèle Énergétique du monde en 2050). Par conséquent, comme on peut le voir dans le tableau 4, **l'impact d'une politique de contrôle de l'étalement urbain a peu d'influence sur les émissions de GES résultant des consommations d'énergie des bâtiments.**

Si on prend en compte les économies d'énergie liées aux panneaux solaires, les écarts sont un peu plus marqués. La ville étendue se montre alors plus vertueuse dans le sens où elle émet moins de GES (entre 0.06 et 0.08 Mega-tonnes eq CO<sub>2</sub>/an).



|              |                | Consommation (clim+chauffage) des bâtiments sur l'agglomération |                                              | Consommation des bâtiments moins Production solaire totale sur l'agglomération |                                              |       |
|--------------|----------------|-----------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|-------|
|              |                | Consommations GWh/an                                            | Emissions Mega-tonnes eq CO <sub>2</sub> /an | Consommations GWh/an                                                           | Emissions Mega-tonnes eq CO <sub>2</sub> /an |       |
| Paris Actuel | Climat présent |                                                                 |                                              |                                                                                |                                              |       |
|              |                | 114517                                                          | +2.52                                        | +84684                                                                         | +1.86                                        |       |
| Paris 2100   | Climat présent | Ville compacte                                                  | 60189                                        | +1.32                                                                          | +17611                                       | +0.39 |
|              | Climat présent | Ville étendue                                                   | 59983                                        | +1.32                                                                          | +14255                                       | +0.31 |
|              | Climat futur   | Ville compacte                                                  | 40983                                        | +0.90                                                                          | -1595                                        | -0.04 |
|              | Climat futur   | Ville étendue                                                   | 41122                                        | +0.90                                                                          | -4606                                        | -0.10 |

Tableau 4 : Emissions résultant des consommations d'énergie des bâtiments simulées pour la ville compacte et la ville étendue.

*Les émissions de gaz à effet de serre sont dominées par les technologies dans les moyens de transport.*

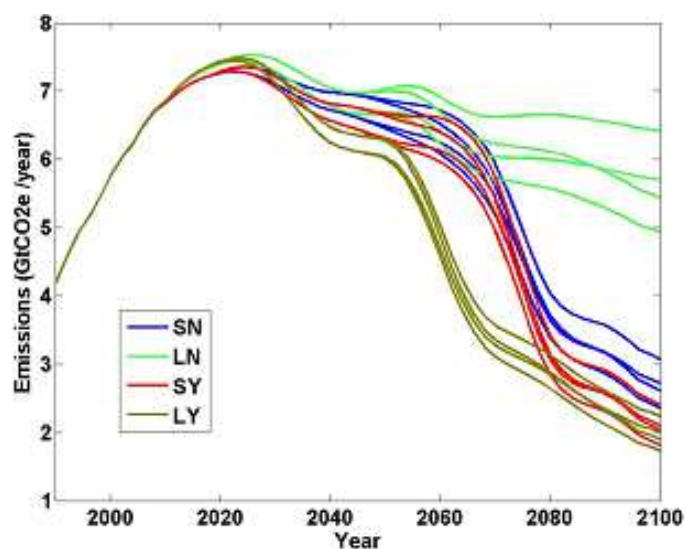


Figure 16 : Niveau total des émissions de CO<sub>2</sub> liées aux déplacements domicile-travail dans les simulations de MUSCADE. Contrairement aux figures précédents, les courbes s'agrègent par fuseaux rassemblant les simulations basées sur les mêmes scénarios économiques globaux (notés SN, LN, SY, LY), et non par fuseaux rassemblant les simulations basées sur l'adoption commune d'une politique de ceinture verte ou non.



En ce qui concerne les émissions liées aux transports, toutes choses étant égales par ailleurs, on observe dans les simulations que la mise en place d'une politique de ceinture verte (scénario de ville compacte) permet par la suite d'obtenir des émissions de gaz à effet de serre liées au transport réduites (voir figure 16). Cependant, la baisse de niveau d'émission liée à la mise en place de cette politique reste très largement inférieure à la différence entre niveaux d'émissions que l'on constate entre scénarios de technologie de transport différents.

## **D.2 VEGETALISATION, IRRIGATION**

L'étude d'impact de la végétalisation a été réalisée sur l'agglomération parisienne actuelle, lors de la thèse de C. de Munck (2014) commune aux projets de recherche MUSCADE et VegDUD, et sur la ville future (évolution ville étendue).

*Comparativement aux toits végétalisés, la végétation de pleine terre est plus efficace à rafraîchir l'air en ville.*

Les scénarios de végétalisation en ville actuelle concernaient d'une part la mise en place généralisée de toits végétalisés sur tous les immeubles collectifs, de bureaux et industriels, et d'autre part la végétalisation des « espaces libres » en ville (c'est à dire ronds-points, trottoirs, parkings, places, ...) à divers taux : 0%, 25%, 50% et 75%. Les impacts sont alors calculés d'abord sur la canicule de 2003, puis pour la consommation d'énergie à l'échelle annuelle.

Les résultats de simulation montrent que les toitures végétalisées n'ont soit aucun effet sur la température dans les rues au niveau des piétons, soit un effet faible mais non nul (au mieux de  $-0.5^{\circ}\text{C}$ ) quand elles sont arrosées ; cet aspect peut présenter une difficulté lors de périodes de canicule. L'augmentation de la couverture végétale au sol est plus efficace à rafraîchir les rues, avec un rafraîchissement d'autant plus élevé que le taux de végétalisation est important et que la proportion d'arbres est élevée. Ces différences d'impacts entre végétation basse et arborée proviennent principalement des différences de densité foliaire, et donc des variations des taux d'évapotranspiration entre les deux types de végétation, car les effets d'ombrage des arbres sur les surfaces urbaines ne sont pas actuellement pris en compte dans le modèle. Les rafraîchissements obtenus varient entre  $0.5$  et  $2.0^{\circ}\text{C}$  selon les stratégies, et le scénario de végétalisation maximale (i.e., une augmentation de 33% de la surface globale de végétation et une installation massive de toitures végétalisées irriguées sur les bâtiments collectifs et individuels) permet d'atteindre jusqu'à  $-3^{\circ}\text{C}$  localement. L'effet de rafraîchissement est aussi plus marqué la nuit que le jour pour les stratégies arborées, ces différences provenant du choix qui a été fait en termes de plage horaire et mode d'arrosage (la nuit, par asperseurs). Le rafraîchissement des températures se traduit systématiquement par l'amélioration du confort thermique. On note une réduction sensible du temps passé dans les différents niveaux de stress thermique : jusqu'à 1 heure de moins par jour passée en stress thermique extrême pour un individu dans la rue au soleil, ou en stress thermique très élevé pour un individu dans la rue à l'ombre, pour le scénario de végétalisation maximale. La prise en compte des effets d'ombrage des arbres devraient logiquement améliorer les bénéfices des stratégies arborées

en termes de confort thermique. Enfin, l'analyse des impacts des différentes typologies urbaines montre un effet net de la forme urbaine sur les conditions de confort, avec un confort extérieur meilleur dans le tissu Haussmannien dont la forme permet de limiter les apports solaires et ainsi le réchauffement des rues en journée.

*La végétation urbaine a un impact sur les consommations d'énergie.*

Dans nos simulations, les toitures végétalisées, contrairement à leur faible impact sur le confort thermique extérieur, apparaissent comme une des solutions les plus efficaces pour réduire la consommation énergétique liée à l'usage de la climatisation au cours de la canicule. Cela est dû notamment à l'évapotranspiration qui « consomme » une partie significative de l'énergie solaire incidente tant que le substrat et la végétation ne sont pas secs. Ce phénomène participe au maintien du confort thermique à l'intérieur des bâtiments tout en limitant le recours à la climatisation. Par ailleurs, la végétalisation en toiture contribue à l'isolation thermique des bâtiments. Ces effets cumulés permettent de diminuer d'environ 12% la consommation totale d'énergie sur la durée de la canicule et de 13% la demande maximale au plus chaud de la canicule. Si l'on agrège les résultats tout au long de l'année, les toitures végétalisées permettent une économie d'énergie annuelle d'environ 7%. Cependant, ces effets sont en grande partie dus au grand pouvoir isolant de ces toitures dans nos simulations, obtenu également en supposant des toits isolés mais non végétalisés. C'est ce que l'on observe lorsque l'on considère l'état projeté de la ville en 2100, dans lequel l'amélioration généralisée de l'isolation des toits fait que ce pouvoir isolant des toitures végétalisées n'est plus une valeur ajoutée significative.

L'augmentation de végétation engendre en général une diminution des températures de l'air dans la rue tout au long de l'année, plus marquée pour la végétation arborée, ce qui donne lieu à une légère surconsommation d'énergie sur l'année, mais non significative (1% environ). Ces résultats étaient prévisibles du fait que la végétation au sol n'a qu'un effet indirect sur la consommation énergétique via le rafraîchissement des températures extérieures. Les simulations ont aussi montré qu'en période de canicule, une augmentation faible du taux de végétation arborée avait autant d'impact sur la consommation énergétique qu'une augmentation élevée du taux de végétation basse au sol, en lien avec les rafraîchissements respectifs que ces deux solutions génèrent.

*Il est nécessaire de développer des systèmes de gestion de l'eau à l'échelle locale.*

Ces performances, tant sur l'amélioration du confort thermique extérieur que sur la consommation énergétique, ont toutefois un coût en eau considérable pour l'arrosage de la végétation. Nous avons comparé ce coût aux apports d'eau que la ville peut recevoir au cours de l'année sous forme de précipitations.

En supposant que le ruissellement de surface engendré au cours de l'année sur l'ensemble des surfaces urbaines puisse être stocké afin d'assurer l'arrosage estival de la végétation

urbaine, on constate que le ruissellement annuel moyen, estimé à partir de dix ans de simulation, permettrait d'assurer l'arrosage complet de la végétation urbaine uniquement pour le scénario de toitures végétalisées et pour les scénarios d'augmentation minimale du taux de végétation de pleine terre.

Quant à l'inverse, on augmente trop la couverture de végétation en ville, la réduction des surfaces artificialisées entraîne une diminution du ruissellement annuel qui ne permet plus de couvrir les besoins en eau pour l'arrosage en été, suggérant que la ressource en eau devrait être trouvée ailleurs. Il serait intéressant dans le futur de vérifier ces résultats avec une version de TEB qui permettrait une description explicite des processus hydrologiques dans le sous-sol urbain. Une autre hypothèse d'irrigation est la récupération des eaux grises des logements (eaux usées provenant des douches, lavabos et laves linges), qui permettrait, après une phase de traitement, de couvrir les besoins en eau pour l'irrigation.

*L'impact des formes architecturales est dominé par les effets de la végétation.*

Des scénarios d'aménagement à échelle locale ont ensuite été appliqués sur la ville (pour une expansion limitée de la tache urbaine dans tous les cas, i.e. le scénario de ville compacte). Il s'agissait de traduire les impacts potentiels d'une modification du PLU visant à favoriser la compacité des bâtiments et à limiter leur emprise au sol. En été, les variations constatées entre les différents scénarios sont essentiellement liées au choix de végétalisation. Or ce choix est, en général, relativement indépendant de la forme architecturale choisie (hormis pour les formes très denses comme le centre ancien de Paris). Par exemple, on peut planter quasiment autant de végétation dans une zone pavillonnaire dense que dans des petits collectifs ou des grands collectifs. En hiver - lorsque la végétation en sommeil a peu d'effet - les différents scénarios de formes urbaines présentent toutefois des variations de consommation énergétique. Ainsi, les formes de bâti compactes (maisons mitoyennes et petit collectif) semblent consommer moins d'énergie pour le chauffage que les pavillons isolés (une différence de 5% à l'échelle de l'agglomération, soit à la limite de significativité des modèles). L'îlot de chaleur urbain n'est pourtant pas modifié significativement (moins de 0.1°C) en hiver par ces modifications locales et limitées spatialement des formes architecturales.

### **D.3 ROLE DES USAGERS**

*L'utilisateur du logement tient entre ses mains un efficace levier potentiel d'adaptation.*

Quelques paramètres liés à la manière dont les occupants/usagers gèrent leur logement ont été explorés au cours du projet. Le premier concerne le réglage par l'utilisateur des températures de consigne pour le chauffage ou la climatisation. Ces choix individuels ont, et de loin, le plus fort impact sur les consommations d'énergie liées au bâtiment. Ainsi, la consommation de chauffage baisserait de 28% en passant d'une température de consigne de 21°C à 19°C

(sous le climat de l'Île-de-France). De même pour la climatisation en été, la diminution de consommation serait bien plus notable, de 80%, pour une température de consigne passant de 23°C à 26°C. Dans la réalité, certains bâtiments sont aujourd'hui climatisés à des températures bien plus fraîches que 23°C, comme les hôtels (surtout ceux à clientèle internationale), les data centers et parfois les bureaux. Toutefois, en ce qui concerne l'habitat, il semblerait, mais ceci est à confirmer dans le futur projet MapUCE, que les usages de la climatisation sont bien plus raisonnables actuellement en France qu'outre-Atlantique.

La fermeture ou non des volets en journée constitue une autre action individuelle ayant un impact énergétique fort pour ce qui est de la consommation de climatisation. La fermeture des volets est un usage fortement répandu dans les villes du sud de la France lors des journées chaudes en été (au moins pour les bâtiments à usage domestique). Cependant, cet usage est moins répandu dans les villes du nord de la France. On peut noter qu'il est même impossible dans nombre de pays du nord de l'Europe, comme en Angleterre ou les pays nordiques, où les maisons sont souvent dépourvues de volets au bénéfice de rideaux intérieurs. Or, en période caniculaire, comme par exemple celle de 2003, fermer les volets des ouvertures exposées au soleil pendant la journée permettrait de limiter les apports solaires à l'intérieur des habitations et donc la demande d'énergie finale liée à la climatisation. Ne pas le faire augmenterait la consommation estivale de 30% environ.

Le fort potentiel de réduction de consommation d'énergie afférent à ces choix et ces comportements individuels ne peut toutefois pleinement se révéler aisément. Les « mauvais » choix sont faits en référence à l'histoire, aux habitudes, à la personnalité de chacun. Les modifier demande du temps, de trouver les bons leviers, les arguments convaincants. Des dispositifs d'assistance, judicieusement conçus pour ne pas être trop intrusifs dans la vie de chacun, peuvent contribuer à faire évoluer les comportements qui ne changeront pas par décret.

Limiter les rejets de chaleur liés à la climatisation aurait aussi un effet important sur l'îlot de chaleur. En effet, dans les zones fortement peuplées dans Paris et en petite couronne, la climatisation augmente l'îlot de chaleur jusqu'à 1°C (ce qui dans le cas présent entraîne, pour les populations exposées dans ces zones, un accroissement de l'inconfort thermique à l'extérieur de 30 min par jour en été).

*Les panneaux solaires ont un (faible) effet de rafraîchissement de l'air.*

L'implantation de panneaux solaires est avant tout motivée par leur capacité à produire de l'énergie. Cependant, ils ont aussi un léger effet sur le climat urbain. En effet, les panneaux solaires, notamment les panneaux thermiques qui ont une grande efficacité, absorbent une grande proportion de l'énergie solaire incidente. Un scénario de déploiement massif des panneaux solaire permet ainsi de diminuer au final, en été lorsque l'ensoleillement est important, les températures d'environ 0.2°C. Ainsi, même si cet effet est faible, il peut s'ajouter à des refroidissements liés eux à des actions d'adaptation visant spécifiquement à rafraîchir la ville, comme la végétalisation des espaces publics.

## E CONCLUSIONS

Les impacts des différentes stratégies d'adaptation ont été quantifiés pour des projections de l'agglomération parisienne en 2100, et ce, pour les climats présent et futurs. Les interactions entre ville, îlot de chaleur urbain et consommation d'énergie sont prises en compte.

### Usages

- Les comportements sont très influents sur la consommation d'énergie, autant voire plus que les techniques de rénovation du bâtiment. Ainsi, simplement chauffer à 19°C au lieu de 21°C permet de baisser la consommation de 28%. L'été, fermer les volets permet de diminuer sensiblement l'usage de la climatisation (-45% environ).
- La climatisation a tendance à augmenter l'intensité de l'îlot de chaleur urbain et à détériorer le confort extérieur (+30 min par jour en stress thermique élevé en petite couronne). Toutefois, il existe d'autres technologies qui permettent de ne pas relâcher directement la chaleur vers l'atmosphère (par exemple, avec des tours aéroréfrigérantes, vers les rivières si la température de l'eau le permet, ou mieux, en récupérant cette énergie).

### Végétation

- La végétalisation urbaine de pleine terre est efficace pour améliorer le confort d'été en extérieur, mais tend aussi à rafraîchir l'air aux autres périodes de l'année, nécessitant un peu plus de chauffage.
- Les toits végétalisés dits « extensifs » (ceux avec peu de substrat, largement utilisés sur le bâti existant mais aussi sur le bâti neuf) ne sont que peu efficaces pour rafraîchir l'air. Par contre, leur effet d'isolation et de rafraîchissement des bâtiments permet de diminuer la consommation d'énergie (-7%) en supposant les bâtiments dans leur état actuel. Toutefois, cet effet isolant n'est plus pertinent à long terme si l'on suppose que les bâtiments seront suffisamment isolés à la fin du siècle, sous l'effet de la mise en œuvre des réglementations thermiques présentes et à venir.
- Dans tous les cas, la végétation doit être arrosée pour avoir un effet rafraîchissant en été. Ceci nécessite une ressource en eau importante et implique donc de développer des systèmes de récupération d'eau à l'échelle du quartier ou du bâtiment.

### Panneaux solaires

- L'utilisation de panneaux solaires permet de diminuer l'îlot de chaleur urbain. En effet, bien qu'ils soient plus sombres que les matériaux de toitures et absorbent donc beaucoup d'énergie solaire, ils en utilisent une bonne partie pour produire de l'énergie et restituent de ce fait moins de chaleur vers l'atmosphère.
- En supposant un déploiement important des panneaux solaires (thermiques et photovoltaïques), la production d'énergie qui en résulte permet de couvrir entre 70% (ville

compacte) et 76% (ville étendue) de la consommation annuelle d'énergie pour le chauffage et la climatisation en climat présent, et 104% à 111% en climat futur. Mais il conviendrait toutefois de concevoir des infrastructures de stockage inter-saisonnier de l'énergie pour une utilisation optimale de l'énergie solaire produite.

### **Formes urbaines**

- Une forme dense de bâti, comme les maisons mitoyennes ou le petit collectif, nécessite localement moins d'énergie pour le bâti (chauffage et climatisation) et le transport. Toutefois, à l'échelle d'une agglomération, une expansion de type « ville compacte » ne serait au final pas plus efficace qu'une expansion de type « ville étendue » (i.e., une expansion au fil de l'eau), du fait d'un rafraîchissement de l'îlot de chaleur en hiver pendant la période de chauffe. Une agglomération ayant suivi une expansion au fil de l'eau (donc relativement étendue mais gardant toutefois l'empreinte de ville européenne relativement dense du Paris actuel) ne nécessitera pour le bâti pas plus d'énergie qu'une agglomération compacte (dont l'empreinte urbaine est supposée figée dès 2020). Une ville compacte a aussi moins de potentiel de production d'énergie solaire.

D'autre part, le focus sur les périodes de canicule, réalisé dans le cadre du projet VURCA (ANR-08-VUL-013), indique que la ville compacte consomme plus d'énergie en climatisation que la ville étendue, et qu'elle intensifie également l'îlot de chaleur urbain. Ceci et le fait que les habitants logent plus près du centre-ville conduit, toutes choses égales par ailleurs, à des conditions de stress thermique en été plus fortes que pour la ville étendue.

- Une ville compacte aura cependant tendance à limiter le transport. Dans notre scénario de ville compacte, la consommation d'énergie potentielle liée au transport est d'environ 3 à 5% inférieure à celle que l'on obtient dans notre scénario de ville étendue. Une étude plus précise dédiée aux transports est cependant nécessaire, car notre analyse n'est que très partielle.

### **Perspectives**

- Les comportements ayant une très forte influence sur la consommation d'énergie au sein du logement (ou du lieu de travail), il convient d'avancer sur ce sujet, en intégrant plus spécialement la composante sociale dans la modélisation. Le projet MapUCE (ANR-13-VBDU-0004-06) s'attachera à documenter cet aspect, en associant sociologues, juristes, météorologistes et architectes. Au sein de ce projet le périmètre d'étude sera aussi élargi à l'ensemble des villes françaises.

- La végétation est un autre élément important permettant d'adapter les villes au changement climatique. Sans oublier que la végétation apporte aussi bien d'autres services écosystémiques ; il est montré, par exemple, que la présence de végétal en ville réduit les occurrences de certaines maladies liées au stress, favorise le lien social, et améliore probablement le bilan carbone des villes. Toutefois, se posent les questions de la gestion de la ressource en eau, des conflits d'usages de l'eau, ou du développement de la végétation comme élément de gestion du cycle hydrologique et hydrique urbain. Ces questions restent pleinement à approfondir.

- La question de la prise en compte effective des problématiques liées à l'énergie et au microclimat urbain dans le processus de planification urbaine demeure une priorité pour les collectivités et les agences d'urbanisme. Le projet MapUCE vise aussi à proposer une méthodologie d'intégration de données quantitatives de microclimat urbain, climat et énergie dans les procédures juridiques et les politiques urbaines.



## F BIBLIOGRAPHIE

### PUBLICATIONS SCIENTIFIQUES EN ANGLAIS

1. Bueno B., Pigeon G., Norford L.K., Zibouche K. & Marchadier C., 2012: Development and evaluation of a building energy model integrated in the TEB scheme. *Geoscientific Model Development*, , 5, 433-448 <http://www.geosci-model-dev.net/5/433/2012/gmd-5-433-2012.html>.
2. Bueno B., Norford L., Pigeon G. & Britter R., 2012: A resistance-capacitance network model for the analysis of the interactions between the energy performance of buildings and the urban climate. *Building and Environment*, 54 , 116-125.
3. Bueno B., Norford L., Hidalgo J. & Pigeon G., 2013: The urban weather generator. *Journal of Building Performance Simulation*, 6(4), 269-281, doi:10.1080/19401493.2012.718797.
4. Bueno B., Hidalgo J., Pigeon G., Norford L. & Masson V., 2013: Calculation of air temperatures above the urban canopy layer from measurements at a rural operational weather station. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 52, 472-483, doi:10.1175/JAMC-D-12-083.1.
5. Lemonsu A., Masson V., Shashua-Bar L., Erell E. & Pearlmutter D., 2012: Inclusion of vegetation in the Town Energy Balance model for modeling urban green areas. *Geoscientific Model Development*, 5, 1377-1393.
6. Hidalgo J. & Masson V., 2014: From daily climatic scenarios to hourly atmospheric forcing fields when dynamical downscaling is used in impact studies. *Climate Research*, sous presse.
7. Vigi   V. & Hallegatte S., 2012: Trade-offs and synergies in urban climate policies. *Nature Climate Change*, 2, 334-337.
8. Vigi   V., Hallegatte S. & Rozenberg J., 2014: Downscaling long term socio-economic scenarios at city scale: A case study on Paris. *Technological Forecasting and Social Change*, doi:10.1016/j.techfore.2013.12.028.
9. de Munck C., Lemonsu A., Bouzouidja R., Masson V. & Claverie R., 2013: The GREENROOF module (v7.3) for modelling green roof hydrological and energetic performances within TEB. *Geoscientific Model Development*, 6, 1941-1960, doi:10.5194/gmd-6-1941-2013.
10. Pigeon G., Zibouche K., Bueno B., Le Bras J. & Masson V., 2014: Evaluation of building energy simulations with the TEB model against EnergyPlus for a set of representative buildings in Paris. *Energy and Buildings*, 76, 1-14, doi : 10.1016/j.enbuild.2013.10.038.
11. Masson V., Marchadier C., Adolphe L., Aguejdad 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., Nologues L., Pigeon G., Salagnac J.-L. & Zibouche K., 2014: Adapting cities to climate change: A systemic modelling approach. *Urban Climate*, sous press.

## PUBLICATIONS SCIENTIFIQUES EN FRANÇAIS

1. Leveiller T. & Long N., 2013 : Vers un développement durable de l'aire urbanisée de la région Île-de-France : une démarche amorcée. *Environnement Urbain*, 7, c18-c37.
2. Leveiller T. & Long N., 2014 : Analyse des formes urbaines à partir de métriques spatiales : une approche par télédétection et SIG. *Cybergeo*, soumis
3. Bonhomme Marion, 2013 : Contribution à la génération de bases de données multi-scalaires et évolutives pour une approche pluridisciplinaire de l'énergétique urbaine, Thèse de l'Université de Toulouse, [http://lra.toulouse.archi.fr/lra/activites/theses/Marion\\_Bonhomme](http://lra.toulouse.archi.fr/lra/activites/theses/Marion_Bonhomme).
4. de Munck Cécile, 2013 : Modélisation de la végétation urbaine et des stratégies d'adaptation au changement climatique pour l'amélioration du confort climatique et de la demande énergétique en ville. Thèse de l'Institut National Polytechnique de Toulouse, <http://ethesis.inp-toulouse.fr/archive/00002485/>.

## ARTICLES DE VULGARISATION SCIENTIFIQUE

1. Viguié V. & Hallegatte S., 2010 : Les villes aujourd'hui, quelle vulnérabilité au changement climatique ? Villes et adaptation au changement climatique. *Rapport de L'Onerc 2010*.
2. Masson V., 2010 : Contribution à : Perspectives : la recherche urbaine liée aux enjeux climatiques. Villes et adaptation au changement climatique. *Rapport de L'Onerc 2010*.
3. Masson V. & Salagnac J.-L., 2011 : La canicule de 2003, un été normal en 2060 ? *Les Cahiers de l'IAU Île-de-France*.
4. Masson V., Viguié V. & Bonhomme M., 2013 : Histoire et prospective avec le projet MUSCADE. *Les Cahiers de l'IAU Île-de-France*, décembre 2013.