

# Histoire et prospective avec le projet Muscade

Marion Bonhomme<sup>(1)</sup>  
Valéry Masson<sup>(2)</sup>  
Vincent Viguié<sup>(3)</sup>



Le caractère minéral du bâti a une incidence sur le climat local : le soleil chauffe les surfaces construites, produisant des îlots de chaleur urbains. La végétalisation des façades et des toitures pourrait contribuer à rafraîchir les villes.

## Le projet Muscade

Le projet Muscade aborde la « modélisation urbaine et les stratégies d'adaptation au changement climatique pour anticiper la demande et la production énergétiques ». Il a bénéficié d'une aide de l'Agence nationale de la recherche et réunit dans un partenariat interdisciplinaire :

- **le Game** : groupe d'étude de l'atmosphère météorologique (modélisation du climat urbain) ;
- **le CSTB** : Centre scientifique des techniques du bâtiment (conception technique des bâtiments) ;
- **le Cired** : Centre international de recherche sur l'environnement et le développement (modélisation socio-économique de l'expansion urbaine) ;
- **LRA-Grecau** : groupe de recherche environnement, conception architecturale et urbaine (architecture, énergie et développement urbain durable) ;
- **le Liens** : Littoral, environnement et sociétés (évolution des villes) ;
- **l'Apur** : Atelier parisien d'urbanisme ;
- **l'IAU idF** : Institut d'aménagement et d'urbanisme d'Île-de-France.

Les villes sont au premier plan des enjeux climatiques, et ce dans leurs multiples dimensions. L'urbanisme ainsi que l'architecture des bâtiments qui le composent influent en effet de manière importante sur les émissions de gaz à effet de serre, *via* les consommations d'énergie liées au chauffage et au transport. Ces consommations ont également une incidence sur le climat local par la formation d'îlots de chaleur urbains. En outre, les modifications structurelles de la ville sont soumises à une forte inertie, ce qui oblige à raisonner, à l'instar du changement climatique, à l'échelle du siècle.

Dans ce contexte, quelles sont les mesures qui 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 ? Le verdissement de la ville ? La végétalisation des toits ? La forme urbaine ? Les avancées technologiques ?

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, ce projet vise ainsi à apporter des éléments d'évaluation aux décideurs urbains, qui doivent bâtir la ville durable de demain.

## Verrous scientifiques et enjeux de l'étude

La problématique de l'adaptation future de la ville au changement climatique, tout autant

que la question de la ville durable, ont exigé de lever deux verrous scientifiques majeurs. Le premier est la nécessité d'aborder des champs scientifiques très différents, du fait de la nature complexe de la ville : une approche par des climatologues seuls laisserait de côté de nombreux aspects. Ainsi, le projet a fait appel aux travaux d'économistes, architectes, géographes, météorologistes et spécialistes du bâtiment.

La tendance globale du réchauffement climatique se trouve renforcée en ville par le phénomène d'îlot de chaleur, très lié aux formes urbaines. À travers plusieurs scénarios, Muscade se propose, en s'appuyant notamment sur le Mos, de modéliser l'agglomération parisienne de 2100. L'objectif est d'identifier des leviers d'action réglementaires, énergétiques et d'aménagement pour réduire les impacts du changement climatique.

Le Mos a joué un rôle dans cette osmose, en permettant, par sa description typologique fine du tissu urbain, de faire le lien entre les données de nature différente utilisées par les partenaires de ce groupe de travail. Il a notamment permis de faire dialoguer les données de l'Insee, utilisées par les économistes et les géographes impliqués, avec des données fines sur les types de matériaux de toitures, par exemple, utilisées par les météorologistes. Une « carte » de l'agglomération parisienne actuelle a pu être établie, qui sert de base aux projections d'expansions urbaines.

Elle permet également de décrire des éléments architecturaux nécessaires aux outils numériques, qui calculent les impacts en

(1) Marion Bonhomme est enseignante-chercheuse au laboratoire de recherche en architecture (LRA) de l'université de Toulouse.

(2) Valéry Masson, CNRM-Game (URA CNRS et Météo-France) est responsable du groupe de recherche en climat urbain à Météo-France.

(3) Vincent Viguié est ingénieur des Ponts et Chaussées et chercheur au Centre international de recherche sur l'environnement et le développement (Cired).

termes de consommation d'énergie, de microclimat urbain et d'îlots de chaleur.

La deuxième difficulté à lever est l'échelle de temps des processus en jeu. Les études prospectives menées habituellement par les acteurs urbains couvrent en général dix ou vingt années. Dans ce cadre d'étude, il faut considérer une échelle temporelle bien plus longue : celle du siècle !

Le réchauffement climatique persistera et s'accroîtra même dans le siècle à venir, plus ou moins, certes, selon les politiques mondiales de réduction de gaz à effet de serre déployées. Mais un autre élément évolue aussi lentement : la ville elle-même. Une majeure partie des bâtiments présents en 2100 dans l'agglomération parisienne sont déjà construits ou le seront bientôt. Modifier les formes urbaines prend donc du temps, beaucoup de temps.

### L'évolution de l'occupation du sol pour l'étude du climat urbain

L'analyse fine de l'occupation du sol et de son évolution est le socle des études en climat urbain et en énergétique. En effet, l'îlot de chaleur urbain prend naissance du fait de la présence de matériaux urbains en lieu et place de surfaces naturelles : le jour, le soleil chauffe fortement les pierres, briques, surfaces bitumées, etc. (il suffit de poser la main sur un mur en fin d'après-midi pour s'en rendre compte). Cette chaleur est rendue à l'atmosphère la nuit, empêchant ou limitant le refroidissement de l'air. L'effet sera d'autant plus important que les surfaces sont imperméabilisées et les bâtiments hauts. L'autre bénéfice d'une description fine de l'occupation du sol concerne les calculs de consommation énergétique : il est en effet nécessaire de connaître le type de bâtiment à diagnostiquer, et ce sur l'ensemble de la ville.

### Méthodologie de simulation de l'expansion urbaine et de ses impacts

Étant donné l'échelle de temps considérée, les modèles d'expansion basés sur des extrapolations

d'enquêtes et de 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). Pour réaliser les simulations, le choix s'est donc porté sur des outils numériques basés sur des processus physiques et socio-économiques. Le modèle numérique d'impact énergétique et de microclimat est TEB (Town Energy Balance), développé par Météo-France et le CNRS. L'expansion quant à elle a été simulée par le modèle dynamique Nedum (Non Equilibrium Dynamic Urban Model), basé sur des équations socio-économiques. Le modèle Genius (GENérateur d'Îlots UrbainS) d'évolution des formes architecturales a été créé au cours du projet afin d'interpréter les informations d'expansion urbaine et de localisation future de la population.

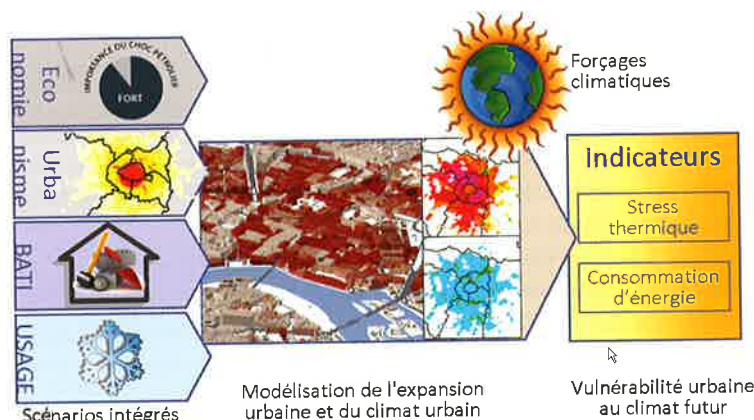
Ces différents outils de simulation permettent de projeter des formes futures de l'agglomération et des impacts sur la consommation et la production décentralisées d'énergie, en fonction de divers scénarios sur des paramètres macroéconomiques, technologiques ou d'aménagement du territoire sur le siècle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

### Le projet Nedum

Les travaux de recensement des usages du sol francilien, conduits par l'IAU îdF, se sont révélés utiles pour le projet Nedum, qui permet de simuler l'expansion de l'agglomération parisienne sur le siècle à venir. Il convenait d'abord de comparer l'approche utilisée avec les évolutions réellement observées sur tout le siècle passé, en remontant jusqu'en 1900. Seule une telle comparaison peut valider le réalisme des scénarios obtenus. Les travaux de reconstitution de l'usage du sol antérieur en Île-de-France, réalisés par l'IAU îdF, ont permis de mener à bien cette tâche.

### Le modèle dynamique Genius : générateur d'îlots urbains









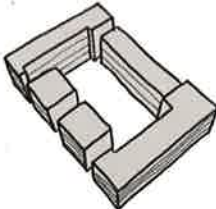


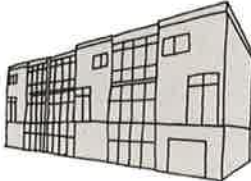





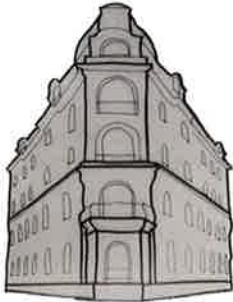



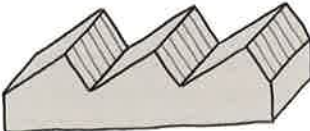
Afin d'identifier précisément les impacts du changement climatique sur la ville, il est nécessaire de disposer de données précises sur les bâtiments qui la constitueront : forme architecturale, forme urbaine, matérialité de l'enveloppe, usages et apports internes associés, équipements, etc. Cependant, aucun modèle prospectif ne permet aujourd'hui de projeter avec précision ces informations. Le cadre du projet Muscade a favorisé la création d'un outil spécifique :



Plusieurs scénarios ont été élaborés afin de déterminer la vulnérabilité urbaine au climat futur.

Projet Muscade

## Les sept îlots types retenus

Îlot type	Mos en 81 postes	Illustration
N° 1 Pavillon continu (logement)	31  Habitat rural 32  Habitat continu bas	
N° 2 Pavillon discontinu (logement)	29  Habitat individuel 30  Ensemble d'habitat individuel identique	
N° 3 Immeuble continu (logements ou bureaux)	33  Habitat collectif continu haut 52  Bureaux	
N° 4 Immeuble discontinu (logements ou bureaux)	34  Habitat collectif discontinu 52  Bureaux	
N° 5 Immeuble de grande hauteur (logements ou bureaux)	34  Habitat collectif discontinu 52  Bureaux	
N° 6 Centre ancien (logements ou bureaux)	33  Habitat collectif continu haut 52  Bureaux	
N° 7 Bâtiment d'activités (agricole, industriel ou commercial)	43 à 46  Zones ou espaces affectés aux activités 47  Entrepôts logistiques 48 à 50  Commerces	

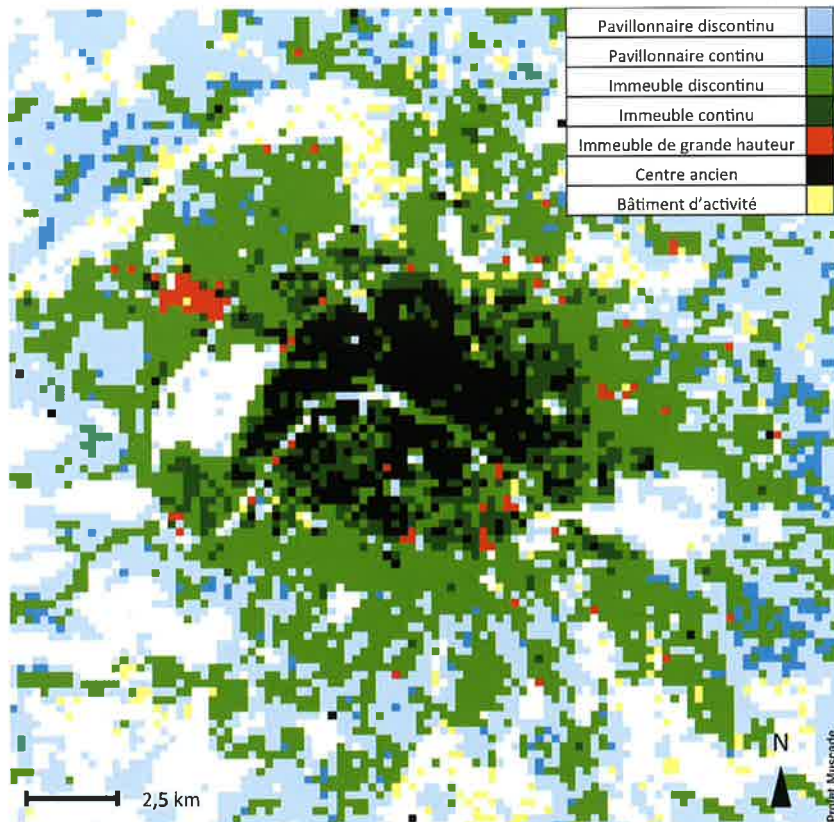
Genius, pour GENérateur d'Îlots Urbains. Il peut générer des bases de données adaptées aux différentes échelles de l'énergétique urbaine, qui sont capables d'évoluer dans le temps, à partir des informations d'expansion du modèle socio-économique Nedum.

La génération de ces données architecturales s'est réalisée en deux temps. À partir de bases

de données urbaines, une première carte a été constituée avec des « îlots types ». Il s'agit de sept archétypes de formes urbaines illustrés dans le tableau ci-dessus.

Afin de générer cette carte, la zone d'étude a été découpée en mailles de 250 m de résolution. Chacune d'entre elles a été caractérisée par une cinquantaine de paramètres





Carte à la maille générée par le modèle pour le secteur de Paris.

Ainsi, il est très probable que la forme future d'un quartier dépende de sa forme passée. À chaque pas de temps, le type d'îlot préexistant sera donc pris en compte et cette information sera croisée avec les données disponibles : la densité bâtie brute de la maille (issue de Nedum) et l'âge des bâtiments. *A priori*, tant qu'il reste dans un intervalle de densité compatible avec son type, le quartier n'évolue qu'en se densifiant par des constructions supplémentaires. Le type change si deux conditions sont réunies :

- les bâtiments existent depuis plus de cinquante ans ;
- la densité bâtie brute dépasse la limite supérieure du type.

Dans ce cas, on assistera à un changement de type qui pourrait correspondre, par exemple, à la destruction d'un quartier pavillonnaire pour construire des logements collectifs.

L'approche présentée ici a donc permis de construire des scénarios cohérents d'expansion de l'agglomération parisienne jusqu'en 2100, allant jusqu'à décrire le bâti dans chaque quartier. Des caractéristiques architecturales sont associées à chaque type de bâti (en fonction de sa date de construction et/ou de rénovation), ce qui permettra d'estimer les impacts en termes de consommation d'énergie de ces divers scénarios. Le Mos a eu un rôle important dans cette étude prospective sur le très long terme.

morphologiques (hauteur, compacité, contiguïté, etc.). Ceux-ci sont calculés à partir de bases de données disponibles dans tout le territoire français (BD TOPO® de l'IGN et données infracommunales de l'Insee). Une analyse statistique de ces paramètres a été effectuée par la suite pour identifier de manière automatique le type de chaque maille parmi les sept îlots types.

Dans cette étape, le Mos a joué un rôle essentiel pour valider cette typologie et la carte obtenue pour l'Île-de-France. Ainsi, sur l'emprise du Mos, la méthode a été validée avec un taux d'identification de 97% des surfaces (soit 71% des zones bâties seules).

Dans un deuxième temps, pour chaque année jusqu'à 2100, Genius échange avec Nedum, qui fournit des informations sur les évolutions de densité bâtie brute. En fonction de ces informations, de scénarios d'aménagement du territoire et de règles d'évolution urbaine, Genius génère une nouvelle carte à chaque pas de temps. Ces règles d'évolution ont été établies, entre autres, d'après les études d'Amélie Darley et Gwenaëlle Zunino, de l'IAU îdF [Darley, Zunino, 2010], et de Thomas Leveiller et Nathalie Long [Leveiller, Long, 2012], qui s'appuient sur les évolutions du Mos.

Le principe retenu est une certaine continuité dans la forme urbaine et le fait que la ville garde une trace de son histoire [Panerai, Demorgon, Depaule, 1999].

### Références bibliographiques

- BONHOMME Marion, *Contribution à la génération de bases de données multiscalaires et évolutives pour une approche pluridisciplinaire de l'énergétique urbaine*, thèse de doctorat, université de Toulouse, 2013.
- DARLEY Amélie, ZUNINO Gwenaëlle, *Évolutivité des tissus urbains. L'impact de la trame urbaine et de la forme architecturale*, mars 2010, IAU îdF.
- LEVEILLER Thomas, LONG Nathalie, *Vers un développement durable de l'aire urbanisée de la région Île-de-France: une démarche amorcée*, *Environnement urbain*, vol. 7, 2012, pp. 18-37.
- PANERAI Philippe, DEMORGON Marcelle, DEPAULE Jean-Charles, *Analyse urbaine*, Marseille, Parenthèses, coll. Eupalinos, 1999.