

Simulation intégrée de la ville :

Modélisation Urbaine et Stratégies d'adaptation au Changement climatique pour Anticiper la Demande et la production Energétique (MUSCADE)

Valéry MASSON
Météo-France

V. Viguié (CIRED), K. Zibouche (CSTB), L. Adolphe (LRA),
N. Long (LIENS), L. Nolorgues (IAU) *et collaborateurs*

Afin de limiter le réchauffement climatique, le protocole de Kyoto planifie les objectifs de réduction d'émission de GES jusqu'en 2012. En France, des objectifs phares du Grenelle de l'environnement concernent directement les domaines du bâtiment et de l'énergie.

Le projet **MUSCADE** s'inscrit au cœur de trois sujets vifs de la problématique de la ville durable : le changement climatique, l'énergie dans les villes et l'expansion des villes. Il vise à en étudier les interactions, de nos jours à 2100.

En effet, les constantes de temps propres au changement climatique et à l'évolution structurelle des villes invitent à choisir l'échelle du siècle pour répondre à la question de leur adaptation face à un climat en transition. L'agglomération parisienne sera choisie comme cas d'étude, mais les méthodes, basées sur des lois et principes généraux d'échanges économiques ou physiques, seront applicables pour d'autres villes.

Un modèle socioéconomique d'expansion urbaine :

Le modèle NEDUM, développé au CIRED, est conçu pour reproduire les mécanismes d'évolution d'une agglomération sur le très long terme. Il vise à simuler les diverses expansions possibles de l'agglomération, en fonction à la fois de scénarios macroéconomiques et démographiques, et de scénarios d'aménagement du territoire contrastés (politique de contrôle de l'expansion urbaine, politique de verdissement et de création d'espaces verts...).

Vers la « ville à énergie positive » ?

Par des simulations couplées bâtiment-climat, le projet mettra en perspective la consommation énergétique de la ville et ses capacités de production d'énergies locales et renouvelables. L'énergie consommée par le secteur du transport sera estimée pour les différentes formes de villes. Seront abordées conjointement les échelles du bâtiment, du quartier, et de l'ensemble de la ville.

Ceci permettra, compte tenu des -importantes- incertitudes sur les projections économiques, technologiques et climatiques futures, d'identifier parmi tous les scénarios d'aménagement urbain étudiés, ceux *probablement* les plus propices à un développement soutenable.

Contexte : ville et réchauffement climatique

Le changement climatique ajoute des défis sans précédent à la planification urbaine. Les politiques de transport urbain, l'utilisation des terres et le logement sont en effet de plus en plus reconnus comme des outils importants pour l'atténuation des changements climatiques (par exemple, [1] Hoornweg et al., 2011, [5] Viguié et Hallegatte 2010). Dans le même temps, en raison de la forte concentration de la population et l'activité économique, les villes sont particulièrement vulnérables aux impacts du changement climatique, et leur vulnérabilité est fortement déterminée par la structure de la ville, rendant ainsi nécessaires des politiques d'adaptation en milieu urbain ([2] Hallegatte et Corfee-Morlot, 2011).

L'utilisation de l'urbanisme en tant qu'outil pour l'atténuation des émissions des gaz à effet de serre et l'adaptation au changement climatique est rendue extrêmement difficile par la forte inertie de l'évolution de la structure de la ville construite. Une action anticipée est nécessaire si l'on veut que les villes soient adaptées au climat de la fin du siècle et qu'elles contribuent à une baisse des émissions mondiales de CO₂. Aujourd'hui, cependant, il n'y a pas de vision claire de ce qu'il faut faire, ni de comment le faire. La question est complexe car les impacts des choix actuels sur la ville de l'avenir dépendront de plusieurs facteurs externes: les changements démographiques, socio-économiques, culturels, politiques et technologiques jouent un rôle majeur.

Le projet **MUSCADE** (Modélisation Urbaine et Stratégie d'adaptation au Changement climatique pour Anticiper le Demande et la production Energétique, financé par l'ANR « Villes Durables » n° ANR-09-VILL-0003) s'attache, via une approche de modélisation intégrée de la ville, à quantifier les impacts de différentes stratégies d'adaptation des villes jusqu'à un horizon temporel très lointain, 2100, nécessaire il est l'échelle de temps commune à la fois au réchauffement climatique et aux transformations d'une agglomération dans son ensemble.

Scénarios de réchauffement climatique en Région parisienne

Le réchauffement climatique est certain, d'après le GIEC. Toutefois, son intensité future ne l'est pas, en particulier car elle dépend des émissions futures des Gaz à Effet de Serre (GES), et de la possibilité qu'aura l'humanité à limiter ces émissions au cours du siècle. Par exemple, sur la figure 1, sont présentées les canicules possibles dans le futur pour la région parisienne pour divers scénarios d'émission de GES. La figure en haut à gauche présente les canicules passées, en particulier 2003, à partir des observations de la station de Chartres (choisie car peu influencée par un îlot de chaleur). En cas de scénario B1, des canicules similaires à 2003 se produiraient à la fin du siècle, voire quelques unes légèrement plus intenses. Par contre, dans les scénarios A1B et A2, on doit s'attendre à des canicules bien plus longues (jusqu'à 1 mois et demi) et bien plus chaudes (jusqu'à 5°C) que 2003.

Cette incertitude est un des défis qu'il faudra relever lors de la conception des stratégies d'adaptation urbaine : par exemple, diverses stratégies pourraient être bénéfiques tant que le réchauffement ne dépasse pas 2 ou 4°C, mais se révéler catastrophiques pour des réchauffements de 6°C, certes moins probables, mais toujours possibles. Il faudra donc concevoir des stratégies d'urbanisation flexibles permettant de s'adapter à ces conditions extrêmes s'il s'avère (dans la futur, par exemple en 2050) qu'elles sont en passe de survenir.

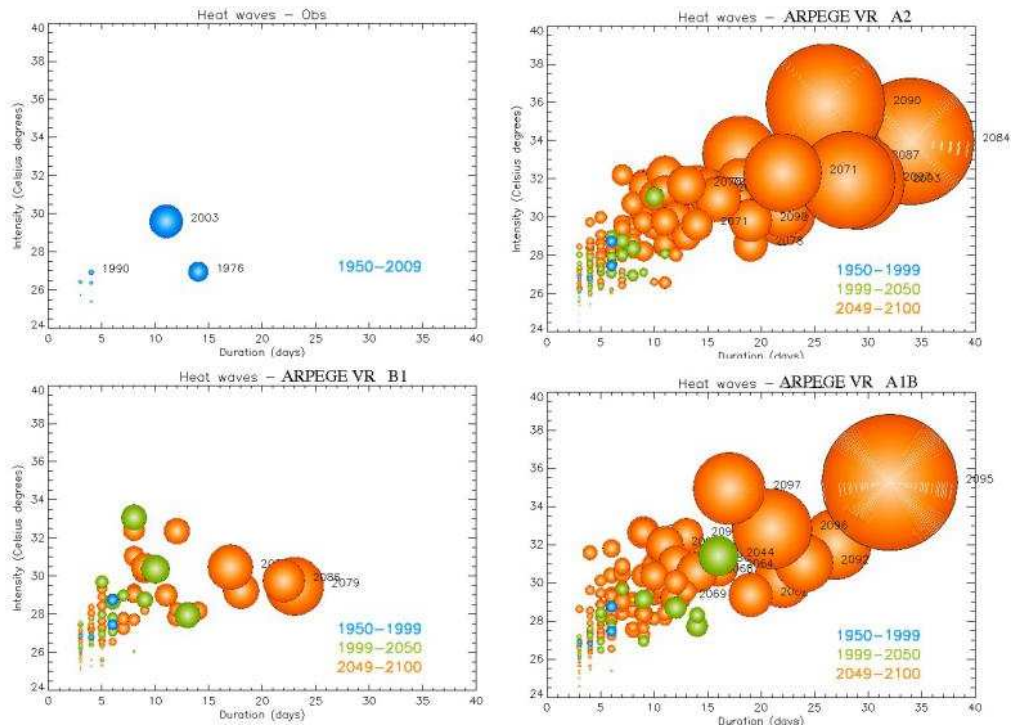


Figure 1 : Canicules passées (observations) et futures selon différents scénarios du GIEC. La durée des canicules est en abscisse, l'intensité en ordonnée. Les bulles représentent la gravité de chaque canicule (durée x intensité au dessus du seuil d'alerte).
 Source : projet ANR « VURCA », référence ANR-08-VULN-013

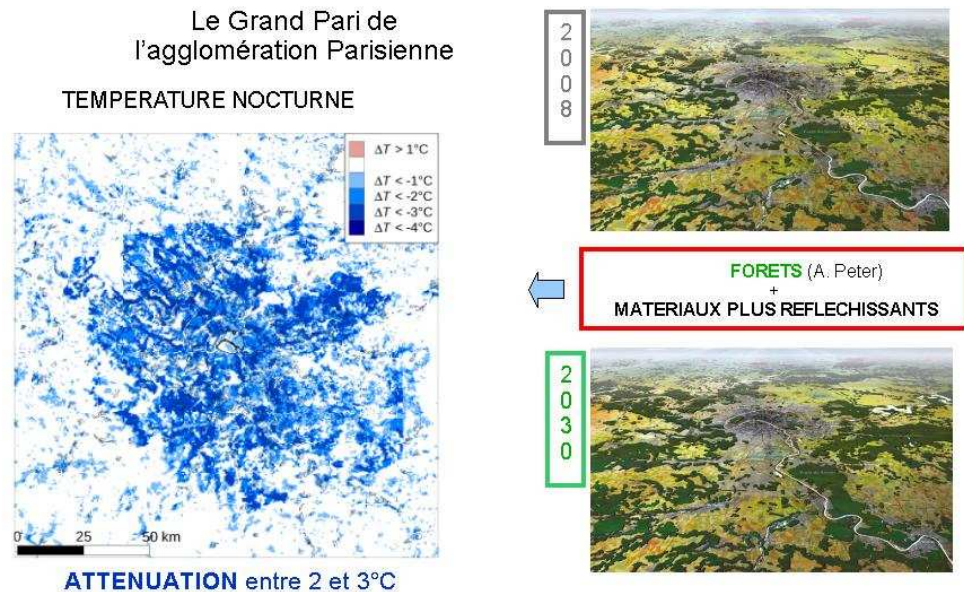


Figure 2 : Impact des scénarios d'extension de forêts, agriculture de proximité et matériaux réfléchissants sur l'îlot de chaleur sur Paris (résultats du groupe Descartes).

Quelques études d'impact sur le microclimat de Paris

Une première étude numérique d'adaptation de Paris au réchauffement climatique a été menée lors de la consultation du « Grand Pari de l'Agglomération Parisienne ». C'est une étude réalisée par dix équipes de chercheurs et d'urbanistes dans le but de proposer les orientations générales de l'évolution de l'agglomération parisienne en 2030. Toutes les équipes suggèrent de la zone "verte" en quelque sorte, pour combattre le réchauffement climatique par la séquestration du CO₂. Le groupe Descartes, auquel le centre de recherches de Météo-France participait, montre également que l'extension de 30% des forêts voisines, l'agriculture maraîchère de proximité et l'utilisation de matériaux plus réfléchissants peut diminuer l'intensité de l'îlot de chaleur urbain de 2 à 3°C (figure 2). Ceci contribuerait à réduire la mortalité lors des vagues de chaleur ainsi que le recours à la climatisation. Ces premiers résultats nous amènent à inverser la façon de penser l'urbanisme: les aspects géographiques et naturels doivent, sinon remplacer, du moins s'ajouter à l'infrastructure urbaine comme moteur de la planification du développement urbain. Cette nouvelle stratégie permet des changements de la ville sur une assez grande échelle, qui auront un impact favorable en termes d'économie, de loisirs, d'émissions de gaz à effet de serre et de microclimat local.

Les impacts des différents systèmes de refroidissement sur le microclimat de Paris ont été étudiés dans le projet de recherche CLIM2, réalisé par le Laboratoire de Génie des Procédés pour l'Energie, l'Environnement et la Santé (CNAM), le Groupe d'Etudes de l'Atmosphère Météorologique (CNRS Météo France), et la société Climespace. Là encore, une méthode numérique a été mise en œuvre, basée sur l'utilisation d'un jeu de modèles reproduisant l'écoulement atmosphérique.

Nous avons reproduit, avec des données réelles d'occupation du sol et de caractéristiques de bâti, la canicule 2003 avec le modèle atmosphérique MESO-NH ([3] Lafore et al. 1998). Le processus de climatisation pour le bâtiment dans les zones urbaines a été intégré dans le modèle de « canopée » urbaine TEB (Town Energy Balance) ([4] Masson 2000). Le type, le nombre, la localisation et la puissance des installations de climatisation de Paris et sa région ont été estimés : recensement de la préfecture pour les installations classées (refroidissement par tour aéroréfrigérée), centrales de production des réseaux de froid (refroidies aussi par eau), et estimation à partir de visualisations aériennes pour les installations sèches en toiture et façade. Les résultats montrent que les rejets du parc actuel de systèmes de refroidissement (secs et humides) provoquent une augmentation faible et locale de la température nocturne dans les rues (0.25 à 1°C par rapport à un cas de référence sans climatisation, cf figure 3). Si l'ensemble des rejets est uniquement sous forme sèche, cette augmentation de température nocturne est alors de l'ordre de 0.5 à 2°C.

Dans une situation future où la puissance globale de climatisation est doublée et l'ensemble des rejets sous forme sèche, l'intensité et l'emprise spatiale des impacts augmentent fortement, même en journée, et au-delà des zones où les rejets sont prescrits: l'augmentation de la température nocturne atteint au centre de Paris 3°C, l'îlot de chaleur nocturne est nettement plus étalé et plus intense (+2°C), toujours par rapport à un cas de référence sans climatisation. La climatisation augmente la température des rues et appelle donc plus de climatisation pour combattre l'îlot de chaleur renforcé.

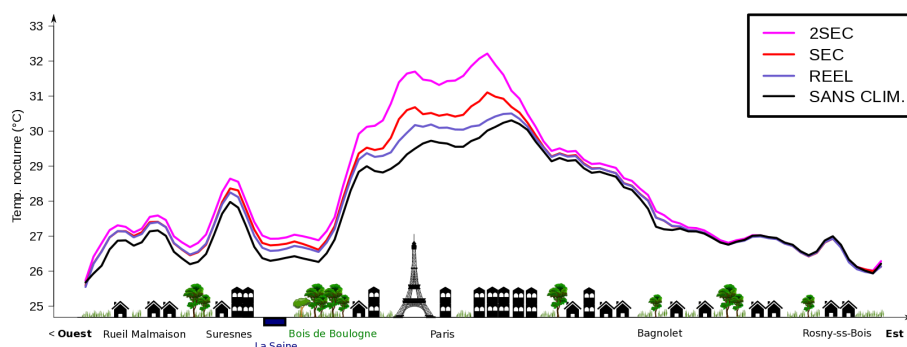


Figure 3 : Impact de différentes technologies de climatisation sur Paris en cas de canicule (source : projet CLIM2)

La simulation intégrée de la ville pour aborder les questions énergétiques du futur

Aborder la problématique de l'adaptation des villes vis-à-vis de la consommation et de la production décentralisée d'énergie requiert une approche pluridisciplinaire. En effet, les aspects liés à l'énergie sont souvent abordés sectoriellement.

On peut citer par exemple la densification des villes souvent proposée pour diminuer la consommation d'énergie dans les transports. Cependant, est-ce qu'une telle ville dense consommera moins d'énergie dans 50 ou 100 ans ? Lorsque l'îlot de chaleur de cette ville dense accentuera le réchauffement, cela pourrait conduire à une forte utilisation de la climatisation ou une forte consommation de ressources en eau (éventuellement plus rares) pour des toits végétalisés. Les économies sur les transports voire sur la diminution des besoins de chauffage en hiver (via la densité et le réchauffement climatique) seraient-elles plus importantes que les nouveaux besoins énergétiques en été ? Et surtout, quelles seraient les conditions de confort et qualité d'usage de la ville dans le futur ?

Toutes ces questions ne peuvent être appréhendées par une seule ou même quelques disciplines proches. C'est la nature même de la ville d'être multi-sectorielle. Les questions d'adaptation des villes au changement climatique nécessitent de considérer au minimum 3 grands types de processus :

- Réchauffement climatique global et régional
- Expansion urbaine, formes urbaines et architecturales
- Evolution des modes de vie

En effet, les conditions climatiques vont bien évidemment modifier les besoins en énergie du bâti. La taille de l'agglomération va modifier l'îlot de chaleur, alors que les formes urbaines vont modifier la ventilation locale, les ombrages, ou le comportement des bâtiments aux sollicitations extérieures. Enfin, les évolutions des modes de vie sont cruciaux, par exemple pour ce qui est du recours massif (ou non) à la climatisation.

La modélisation intégrée est donc un outil précieux pour étudier ces questions d'adaptation. Le projet MUSCADE regroupe des scientifiques de différentes cultures (CSTB : bâtiment, LRA : architecture, CIRED : socio-économie, LIENS : géographie, CNRM/GAME : météorologie), ce qui permet de mettre en œuvre de manière complémentaire des modèles sur les divers processus en jeu :

- les modèles de climat du GIEC (les simulations ayant été réalisées en amont dans le cadre du GIEC)
- le modèle NEDUM d'expansion urbaine sur le très long terme prenant en compte les déterminants économiques, sociaux et les transports
- le modèle MUSE pour représenter les effets liés aux formes d'îlots et de quartiers
- le modèle Energy+ pour simuler la thermique du bâtiment
- des modèles de masques solaires et d'écoulement fine échelle pour l'optimisation des systèmes à énergie solaire et éolienne
- le modèle TEB pour prendre en compte à l'échelle de l'agglomération (et à la granularité des quartiers) ces divers processus, parfois simplifiés, en lien avec l'atmosphère et le microclimat dans les rues.

Simulation socio-économique d'expansions possibles de Paris

Pourquoi et comment simuler Paris en 2100 ?

Nous ne prétendons évidemment pas faire des prévisions de l'évolution future de l'agglomération parisienne. Celle-ci dépend des évolutions démographiques, économiques, sociales, technologiques, culturelles. Il dépend du reste du monde: changements technologiques, prix des énergies, engagements internationaux sur les émissions de gaz à effet de serre...

Cependant, comme on l'a vu, les formes urbaines ont une grande influence sur les émissions de gaz à effet de serre, ainsi que sur la vulnérabilité face au changement climatique, et comprendre l'effet de nos choix actuels ne peut donc se faire que par le jeu d'un exercice de prospective. Pour cela, nous devons nous doter d'un modèle capable de simuler, de manière réaliste, divers scénarios d'expansion de l'agglomération, et ceci jusqu'à l'horizon 2100 (ce qui est le verrou scientifique majeur du projet). Le but est ici de créer des scénarios possibles et cohérents, qui présentent différents futurs envisageables.

Il existe deux grandes familles de modèles d'expansion urbaine, basés sur deux méthodes différentes :

1^{ère} méthode : Extrapolation des tendances passées. Cette méthode a les avantages et inconvénients suivants :

- Elle permet des analyses très détaillées (géographiquement aussi bien que par secteurs)
- Par contre, elle n'est valide qu'à des horizons de 10 à 20 ans
- Elle ne tient pas compte des changements technologiques, économiques, mondiaux.

2^{ème} méthode : Modélisation des grandes tendances d'évolution

Cette méthode est celle choisie dans le projet MUSCADE, principalement car elle permet de simuler les villes à des horizons temporels plus lointains. Contrairement à la première, elle est basée sur un petit nombre de facteurs qui semblent avoir une grande influence sur la forme urbaine, et modélise uniquement l'influence de ces facteurs. Elle a les avantages et inconvénients suivants :

- Elle est plus simple et moins détaillée que les méthodes basées sur extrapolations des tendances passées
- Mais elle est plus robuste, et plus générale

Le modèle NEDUM

Le modèle NEDUM repose sur 3 mécanismes principaux ([6] Vigié and Hallegatte 2011):

1. Un arbitrage des ménages entre:
 - Des appartements de grande taille et des loyers plus faibles loin du centre-ville;
 - Des coûts et des temps de transport faibles près du centre-ville, mais des loyers plus élevés.
2. Les promoteurs/investisseurs optimisent la densité de bâti en fonction des coûts de construction et des prix immobiliers.
3. Différentes échelles temporelles d'évolution : la construction d'un bâtiment prend du temps, la variation d'un loyer est plus rapide.

Validation du modèle NEDUM

Le modèle NEDUM a été validé sur Paris. Puisque le modèle est censé pouvoir simuler Paris jusqu'en 2100, soit un siècle, on s'est attaché à valider le modèle sur une longue période de temps, soit tout le XXème siècle. Les données d'entrée du modèle sont les flux démographiques, la richesse par habitant, ainsi que le réseau et les coûts de transport (en temps et en argent).

Le modèle reproduit de manière satisfaisante la forme générale actuelle de l'agglomération parisienne (Figure 4). Le modèle a néanmoins tendance à considérer comme urbanisée une grande zone au nord de Paris, près de l'aéroport Charles de Gaulle, alors que celle-ci ne l'est pas dans la réalité. Ce phénomène est en grande partie dû à la présence de la zone de bruit de l'aéroport, qui limite l'urbanisation, et que le modèle ne prend pas (encore) en compte. Le même phénomène se retrouve à une échelle moindre aux alentours de l'aéroport d'Orly, au sud de l'agglomération. A l'inverse, le modèle ne décrit pas l'urbanisation de Mantes la Jolie à l'ouest et de Melun au sud de Paris : ces deux zones correspondent à des villes dont l'urbanisation s'est effectuée bien avant qu'elles ne soient englobées dans l'agglomération parisienne, et qui ne sont donc pas représentées dans notre modélisation qui ne représente, elle, que l'avancée de l'urbanisation due à l'extension de l'agglomération parisienne.

Le modèle donne également des résultats satisfaisants sur la trajectoire de l'agglomération sur l'ensemble du XXème siècle. Partant de 1900, le modèle reproduit son évolution jusqu'en 2006. Évidemment, les données sont de plus en plus parcellaires quand on remonte dans le passé, notamment sur la vitesse et le coût des transports, et les incertitudes augmentent quand on remonte dans le temps, ce qui explique sans doute la surestimation de la taille initiale de Paris, en 1900.

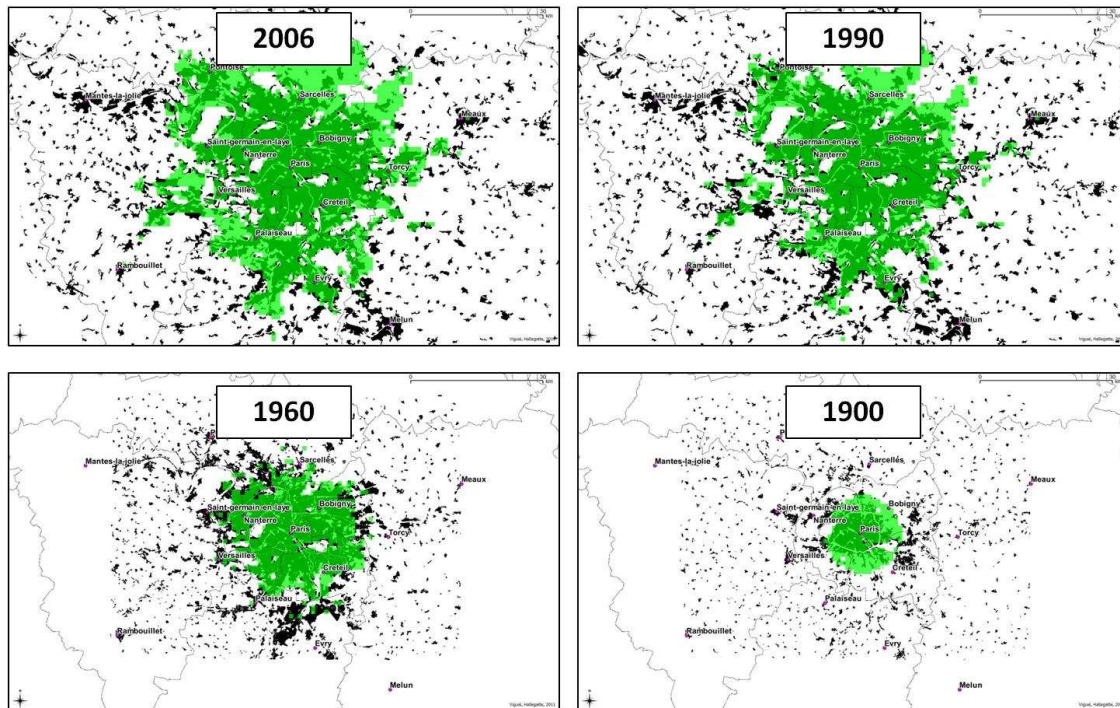


Figure 4 : Simulation des zones urbanisées par le modèle NEDUM du CIRED de 1900 à 2006 (en vert). Les zones réellement urbanisées sont en noir (source : Corine Land Cover et Institut d'Aménagement et d'Urbanisme d'Île de France)

Au final toutefois, le modèle est capable de reproduire l'évolution globale de l'agglomération parisienne entre 1900 et 2010, suggérant ainsi que, malgré son niveau d'agrégation, le modèle capte

de façon satisfaisante certains des déterminants importants des évolutions urbaines sur le très long terme.

La validation ne s'arrête pas là. Le modèle décrit également de manière satisfaisante la répartition de la population et des prix immobiliers à travers l'agglomération, ainsi que l'on peut le voir sur la figure 5, où sont montrés les loyers moyens et la densité de population en fonction de la distance au centre ville. Le modèle ne représente pas en détail les fluctuations de ces paramètres à une même distance de Paris (par exemple les zones plus ou moins recherchées), mais reproduit bien la tendance générale.

Une autre validation du modèle sera également réalisée à partir de la base de données de l'occupation des sols (47 postes) produite par l'IAU, permettant un suivi temporel de 1982 à 2008.

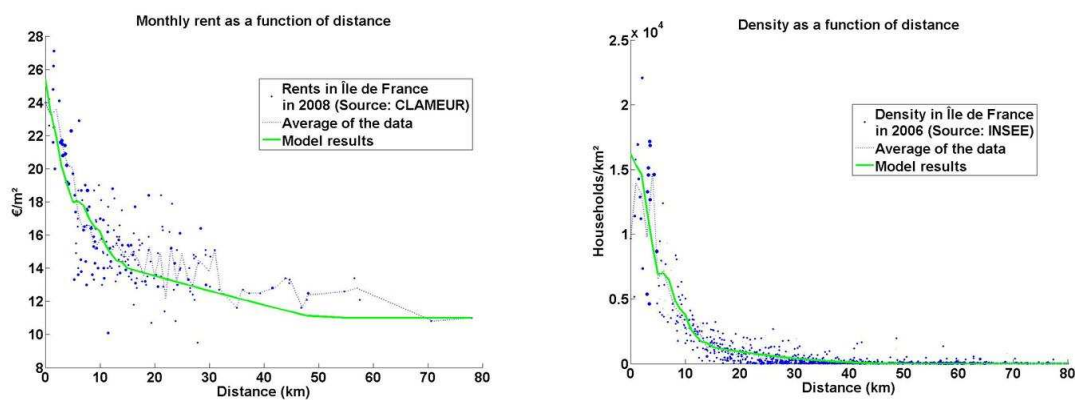


figure 5 : Validation des données socio-économiques produites par le modèle (en vert. à gauche : loyers ; à droite : densité de population), en fonction de la distance au centre de Paris. Chaque point représente la donnée réelle pour chaque commune ou arrondissement.

Des Paris possibles en 2100

Des projections de Paris ont été réalisées jusqu'en 2100. Celles-ci prennent en compte à la fois des paramètres exogènes aux décideurs locaux, que l'on pourrait qualifier de « subits », comme la démographie, la raréfaction des ressources fossiles (pouvant mener à un important « peak oil »), et l'existence ou non d'une politique climatique mondiale, et des paramètres liés à l'action locale de stratégies d'aménagement et de structuration de la ville.

Parmi les paramètres « subits », le paramètre démographique, et en premier lieu la population totale au sein de l'agglomération, apparaît comme le facteur déterminant : son influence semble notamment beaucoup plus importante que les variations du coût des énergies fossiles et les variations technologiques des modes de transport ([7] Viguié and Hallegatte 2011)

Nous avons testé 3 scénarios, correspondant à 3 stratégies d'adaptation différentes :

Scénario « Fil de l'eau »

L'hypothèse faite est qu'il n'y a pas de contrainte forte au niveau de l'urbanisme. Les résultats clés sont alors que :

- L'expansion urbaine est importante
- La taille des logements augmente
- La densité baisse

Scénario « Ville Verte »

Dans ce scénario, on impose une présence de parcs plus importante dans l'agglomération, qui ont entre autres vocation à améliorer le confort dans la ville. Pour ce faire, on suppose que 10% de la surface urbaine est réservée à de la végétation, sans autre contrainte. L'expansion de cette « ville verte », en cas de scénario démographique fort (population atteignant 6.5 millions de ménages en 2050, puis par souci de simplicité, population et taille des ménages constants jusqu'en 2100), [s1]est représentée en figure 6. L'expansion est forte jusqu'en 2050, puis continue encore jusqu'en 2100, bien que la population n'augmente plus (ceci est dû à la baisse du coût des transports par rapport au revenu des ménages). On note en particulier que :

- L'expansion urbaine est encore plus importante que dans le scénario « fil de l'eau »

Ceci provient de la perte de foncier disponible, une partie étant affectée aux parcs.

Scénario « Ville compacte »

Dans ce scénario, on suppose que des contraintes réglementaires fortes sont appliquées à partir de 2020, interdisant toute expansion de la ville sur les zones non déjà construites. Les résultats sont alors que :

- La ville se densifie sur elle-même (construction de bâtiments plus hauts)
- Le coût du logement augmente (ce qui est illustré par le fait qu'en moyenne, les logements font 3m² de moins dans ce scénario que dans le scénario « fil de l'eau », soit 4% de surface en moins)

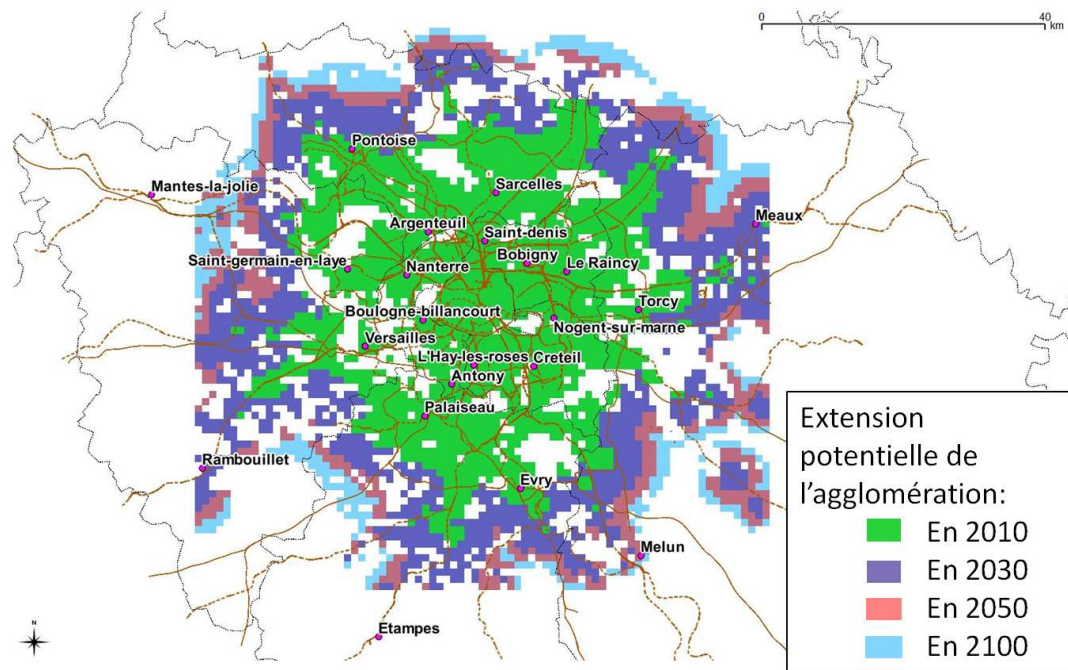


Figure 6 : Exemple de simulation d'expansion urbaine, selon le scénario démographique « haut » et le scénario d'aménagement « ville verte ».

Consommation et de la production d'énergie selon les stratégies d'adaptation

Les consommations et potentiel de production d'énergie de ces différentes projections de Paris vont alors être estimées en fonction des conditions climatiques futures (divers scénarios) et de divers scénarios technologiques et architecturaux.

La problématique est double :

D'une part, il s'agit de concevoir des scénarios pour différents paramètres influençant l'énergie. Ceci a été mené en parallèle de MUSCADE dans le cadre du projet ACCLIMAT¹ (<http://www.cnrm.meteo.fr/ville.climat/>). La stratégie retenue est de construire des scénarios systémiques contrastés, à partir de scénarios dans les grandes thèmes :

- économie mondiale,
- démographie et conditions économiques régionales,
- avancées technologiques, architecture
- usages
- aménagement

D'autre part, il s'agit de mettre en relation les différentes échelles contribuant à la consommation générale de la ville, en particulier :

- **L'échelle du bâtiment.** La façon de construire un bâtiment et son usage vont fortement influencer sa consommation, notamment pour ce qui concerne le confort en hiver –chauffage- et en été – climatisation, ventilation.
- **L'échelle de l'îlot ou du quartier.** L'agencement des bâtiments entre eux peut fortement influencer le microclimat local, et donc ses rétroactions en terme de consommation d'énergie, ainsi que les parties en contact avec l'air (bâtiment mitoyens par exemple). D'autre part, des considérations de « droit au soleil » sont aussi pertinentes vis-à-vis des apports de chaleur passifs ou de la production photovoltaïque (figure 7).
- **L'échelle de la ville enfin.** Outre l'agrégation des différentes échelles ci-dessus, elle présente des caractéristiques propres. L'une est bien sûr la consommation d'énergie liée aux transports, qui sera évaluée par NEDUM selon les scénarios d'urbanisation et de technologies. Une autre est la formation de l'îlot de chaleur urbain, pouvant lui-même être intensifié par certaines stratégies d'adaptation, comme les rejets de climatisations. Cet îlot de chaleur doit être pris en compte interactivement avec les autres phénomènes.

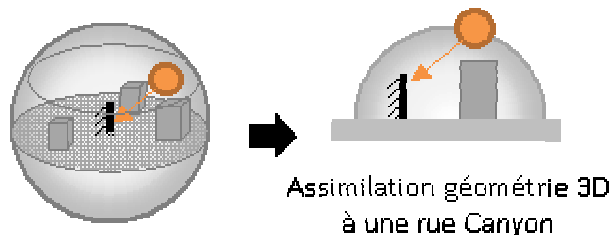


Figure 7 : Simulation de la production d'énergie solaire en fonction des formes urbaines sur l'ensemble d'une ville

¹ Le projet ACCLIMAT a bénéficié d'une aide de la Fondation de Coopération Scientifique STAE Toulouse

La figure 8 présente la stratégie retenue pour aborder les interactions entre ces échelles. Les simulations à l'échelle de la ville seront réalisées avec le modèle TEB d'échanges d'énergie entre ville et atmosphère. Pour cela, des études détaillées à chaque échelle seront réalisées avec des modèles dédiés. Ainsi, divers types de bâtiments caractéristiques de la région parisienne, comme par exemple les bâtiments haussmanniens (cf figure 8), seront simulés avec le modèle de thermique des bâtiments Energy+. Les processus clés à simuler sont intégrés dans TEB. Sont ainsi déjà intégrés dans TEB la masse thermique du bâtiment, les fenêtres et les apports solaires, les apports internes et divers systèmes de chauffage et de ventilation. La climatisation est aussi prise en compte. Les rejets de chaleur et d'eau de ces systèmes sont pris en considération, afin d'interagir sur (et de rétroagir avec) le microclimat urbain. Ensuite, en fonction d'aménagements des formes d'îlots (testés avec le modèle MUSE –Modelisation of Urban Shape and Energy-) chaque agglomération parisienne future sera simulée, de nos jours à 2100.

Les données architecturales et de typologies de bâtiments disponibles serviront à définir quels bâtiments et formes d'îlots sont présents dans chaque maille du modèle (1km² voire plus fin). Ensuite, en fonction des évolutions de la ville, ces bâtiments pourront évoluer (par exemple en remplaçant par endroit des pavillons par des petits collectifs si la densité augmente fortement). Les caractéristiques propres des bâtiments varieront selon un scénario « fil de l'eau » (où il n'y aura pas d'effort particulier pour accélérer la rénovation des bâtiments existants par exemple), et un scénario « vertueux ».

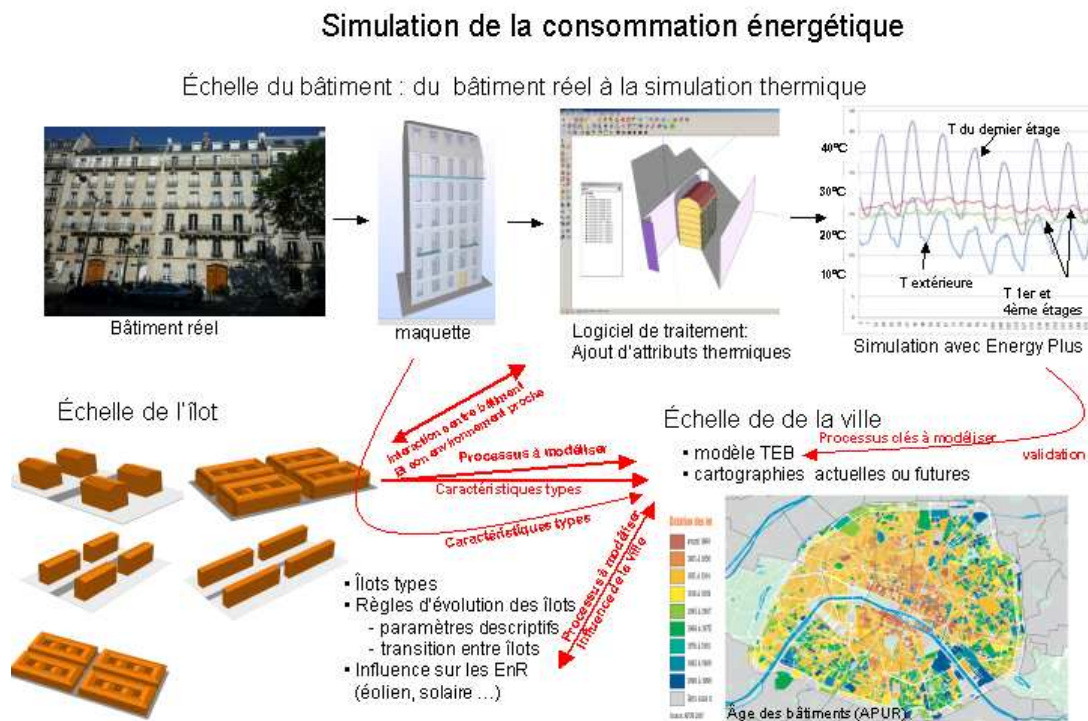


Figure 8 : Interactions d'échelles pour simuler la consommation énergétique à l'échelle d'une ville.

Conclusion : Qu'apporte la modélisation ?

Vis-à-vis de la définition de stratégies d'adaptation des villes au réchauffement climatique, la modélisation permettra, outre les intérêts déjà présentés plus haut, de répondre à deux questions cruciales :

« **Certains scénarios d'aménagement sont-ils a priori plus durables que d'autres ?** »

- Vis-à-vis de certains critères
- En s'efforçant de prendre en compte de plus en plus de critères

« **Quelle est la robustesse des divers scénarios d'aménagement vis-à-vis des incertitudes du futur?** »

- Un scénario peut-être **plus efficace** pour la *majeure* partie des facteurs externes possibles, mais **bien pire** pour un futur *relativement* peu probable mais toutefois possible (*ex: réchauffement climatique de 6°C au lieu de 2°C à 4°C*)
- Si jamais, disons en 2050, l'on se rend compte que ce futur peu probable est en passe (ou a des chances significatives) de se réaliser, **peut-on changer de cap ?** En particulier, peut-on construire maintenant des stratégies d'adaptation et d'aménagement souples, telles que les réalisations passées (celles du futur proche) ne rendent pas les changements futurs impossibles, vains, ou extrêmement coûteux.

Le projet MUSCADE de modélisation intégrée de la ville vise à apporter des réponses à ces questions. Rendez-vous fin 2012 ...

Bibliographie

- [1] Hoornweg, D., L. Sugar, C. L. T. Gomez
Cities and Greenhouse Gas Emissions: Moving Forward, Environment and Urbanization
Online early publication
- [2] Hallegatte, S. J. Corfee-Morlot
Understanding climate change impacts and vulnerability at city scale
Special Issue of Climatic Change, Vol. 104, n°1, 2011, pp. 1-12.
- [3] Lafore J.-P. et coauteurs,
The Méso-NH atmospheric simulation system. Part I : Adiabatic formulation and control simulation.
Ann. Geophys., 1998, vol 16, pp. 90-109.
- [4] Masson V,
A Physically-based scheme for the Urban Energy Budget in atmospheric models.
Boundary-Layer Meteorol., 2000, vol 94, pp 357-397.
- [5] Viguié V. et S. Hallegatte,
Les villes aujourd'hui, quelle vulnérabilité au changement climatique ?
2010, dans « *Villes et adaptation au changement climatique* ». Rapport de L'Onerc.
- [6] Viguié V. et S. Hallegatte,
"The impact of a carbon tax on Paris metropolitan area and its population."
2011, soumis à *Environmental and Resource Economics*
- [7] Viguié V. et S. Hallegatte,
"Scenarios for Paris development in the XXIst century: a prospective exercise on the impact of a carbon tax."
2011, en préparation