COMMISSARIAT GÉNÉRAL AU DÉVELOPPEMENT DURABLE

# RéférenceS

Septembre 2012

# Modélisation urbaine : de la représentation au projet

Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie

Direction de la recherche et de l'innovation

www.developpement-durable.gouv.fr

**Collection « RéférenceS » de la Direction de la recherche et de l'innovation (DRI)**
**du Commissariat Général au Développement Durable (CGDD)**

| | |
|---|---|
| Titre du document : | La modélisation de la ville : de la représentation au projet |
| Directeur de la publication : | Laurent Tapadinhas |
| Rédactrice en chef : | Sylvie Dreyfus |
| Direction scientifique : | Gérard Hégron |
| Coordination éditoriale : | Gérard Hégron et Thibault Prévost |
| Secrétaire du GIS Modélisation urbaine : | Olivier Haxaire |
| Conception graphique et mise en page : | DVB Communication |
| Date de publication : | septembre 2012 |
| Crédits de photo de couverture : | Souheil Soubra et Julien Soula,<br>Centre scientifique et technique du bâtiment (CSTB) |


Ce document n'engage que ses auteurs et non les institutions auxquelles ils appartiennent.
L'objet de cette diffusion est de stimuler le débat et d'appeler des commentaires et des critiques.

# | Modélisation urbaine :
# de la représentation au projet |

# Préface

*Imaginer* la ville de demain et la *donner à voir* pour permettre qu'on s'en empare et qu'on la mette en débat … Oui, mais avec quels outils appréhender sa complexité intrinsèque, prédire les trajectoires possibles et en identifier les bifurcations ? Quelles méthodes de représentation développer et mettre en œuvre pour mieux penser la ville dans l'immédiat et la réaliser demain ? Telles sont les questions auxquelles tentent de répondre les chercheurs rassemblés autour d'un nouveau groupement d'intérêt scientifique, le GIS Modélisation Urbaine, dont la publication de ces actes constitue en quelque sorte la première pierre.

Rassemblant une soixantaine d'acteurs – laboratoires de recherche, établissements d'enseignement supérieur, bureaux d'études et grandes entreprises, organisations professionnelles – et couvrant un large spectre de disciplines – ingénierie de la construction, architecture et urbanisme, physique et économie de l'environnement, sciences humaines et sociales –, le GIS Modélisation Urbaine[*] a l'ambition de constituer dans notre pays une communauté structurée de chercheurs et de praticiens, désireux de faire émerger, au travers de diverses représentations modélisées, une part de la ville de demain.

La création de ce GIS embrasse un champ aussi vaste que pluriel, celui de la ville sous toutes ses facettes, dans toute sa complexité. Elle s'appuie sur un ensemble de connaissances et d'initiatives dont la genèse remonte, pour certaines, à quelques décennies déjà, mais qui, aujourd'hui encore, demeurent inachevées.

Les articles qui suivent ont été, pour la plupart, rédigés dans le cadre du colloque « Modélisation urbaine », qui s'est tenu à l'École des Ponts ParisTech en février 2011. Ils illustrent une partie des réflexions, des échanges et des travaux qui inspirent et animent aujourd'hui la communauté des « modélisateurs » de la ville en France. On trouvera dans ce volume, d'une part, des états de l'art sur les problématiques et pratiques inhérentes à la modélisation urbaine et, d'autre part, des articles courts, fenêtres ouvertes sur des recherches en cours ou sur des applications en gestation pour des modèles éprouvés. Le tour d'horizon proposé ne saurait être exhaustif. Il offre néanmoins une vision éclairante de la maturation scientifique de certains travaux de modélisation.

L'essentiel reste à construire. C'est ce à quoi entend s'employer le GIS Modélisation Urbaine, depuis son lancement officiel en 2011, avec le soutien du ministère du Développement durable. Pour préparer l'avenir, le GIS doit répondre à un certain nombre d'enjeux, qu'il a placés au centre de sa charte. J'en retiendrai particulièrement trois.

Le premier est celui de la cohérence, de la structuration et du décloisonnement. Le support même des travaux du GIS, la ville, requiert un dialogue nourri, structuré et renouvelé entre acteurs scientifiques et institutionnels œuvrant sur le champ de l'urbain. Si la nécessité du recours à la pluridisciplinarité est reconnue depuis longtemps dans les sciences développées pour la ville, les travaux de modélisation restent, aujourd'hui encore, compartimentés entre disciplines souvent difficiles à rapprocher de façon pérenne. Le GIS Modélisation Urbaine se fixe pour objectif une pluridisciplinarité réellement vécue et non simplement revendiquée. La diversité des compétences que le groupement mobilise comme la souplesse de sa structure sont des atouts majeurs pour concourir au décloisonnement recherché, qui est la condition d'une évolution novatrice et durable des cultures et des pratiques scientifiques.

Le deuxième enjeu est celui de la confrontation des modèles au terrain. Certaines recherches ont parfois tendance à négliger le fait que les modèles sont avant tout des outils pour décrire, comprendre et anticiper les phénomènes qui se déroulent dans le monde réel et ne doivent jamais substituer totalement leurs simplifications à sa complexité : les progrès respectifs de la modélisation et de l'observation doivent pouvoir se répondre. Le GIS Modélisation Urbaine y veillera particulièrement,

---

[*] Le siège du groupement est situé à Marne-la-Vallée, au sein du pôle de compétitivité Advancity.
La composition du GIS et sa charte de fonctionnement sont disponibles à l'adresse suivante :
http://www.urban-modelling.org

en s'assurant, dans les travaux qu'il fédèrera, d'un juste équilibre entre recherche et pratique, entre développement de concepts et collecte de données. Ainsi, des applications doivent à terme permettre de concrétiser certains résultats de recherche, tandis que la recherche pourra se nourrir des observations recueillies sur le terrain.

Enfin, un enjeu crucial pour nos sociétés est celui de l'innovation au service de la transition vers des modes de vie urbains soutenables. Parce que la modélisation offre des libertés que n'autorise pas la seule pratique, parce qu'elle peut susciter de nouvelles (re)présentations de la ville à même d'accompagner, voire de stimuler des ruptures indispensables, elle doit nous aider à réinterroger nos pratiques et à imaginer la ville autrement. Le GIS Modélisation Urbaine contribuera sans nul doute à cette mutation, en proposant des approches audacieuses et en inventant d'autres façons de concevoir et de vivre la ville, sans jamais pour autant oublier qu'elle doit être pensée pour une société humaine vivante. Il s'affirmera ainsi comme un véritable acteur du changement.

Formons le vœu que la richesse des présentes contributions augure du lancement, dans le cadre de ce nouveau groupement d'intérêt scientifique, d'une série d'actions novatrices, concourant de façon décisive à la constitution d'une compétence nationale dans le champ de la modélisation urbaine.

Dominique DRON

Commissaire générale au développement durable

# | Sommaire |

**Introduction** p. 9
*Gérard Hégron, Olivier Haxaire*

## Première partie : États de l'art

A - Environnement construit et phénomènes physiques p. 15

- **Modélisation des interactions ville-climat-énergie** p. 16
  *Marjorie Musy, Isabelle Calmet, Emmanuel Bozonnet, Fabrice Rodriguez*

- **Ambiances sonores urbaines et interaction ville-bâtiment** p. 34
  *Judicaël Picaut, Gwénaël Guillaume, Guillaume Dutilleux*

B - Représentations et dynamiques spatiales p. 51

- **Vers une cartographie sémantique des modèles urbains : des individus aux systèmes de villes** p. 52
  *Arnaud Banos, Lena Sanders*

- **Saisies et représentations de l'espace urbain** p. 65
  *Anne Ruas, Julien Perret, Mickael Brasebin*

- **Villes et réseaux : entre des processus top-down et bottom-up** p. 75
  *Céline Rozenblat*

C - Normalisation p. 91

- **Interopérabilité et intégration des données et modèles urbains : standards, normes et tendances pour les SIG** p. 92
  *Emmanuel Devys, Gilles Gesquière*

D - Sociologie, économie et risques p. 107

- **La modélisation urbaine au service de l'analyse économique des politiques climatiques** p. 108
  *Mathieu Saujot, Patrick Criqui, Benoit Lefèvre, Philippe Menanteau*

- **Simuler pour évaluer l'espace des possibles : applications aux stratégies résidentielles et aux politiques de mobilité** p. 121
  *Emre Korsu, Marie Hélène Massot, Jean-Pierre Orfeuil, Laurent Proulhac*

- **La modélisation des risques naturels géologiques – influence du contexte urbain** p. 133
  *Emilie Vanoudheusden*

E - La nature et le vivant en ville p. 149

- **De la conservation de la nature au projet de ville "écologique"** p. 150
  *Philippe Clergeau*

F - La modélisation intégrée de la ville p. 155

- **Les modèles d'usage du sol et transport : où la géographie et l'économie se rejoignent** p. 156
  *Fabien Leurent*

- **Modélisation urbaine et stratégies d'adaptation au changement climatique pour anticiper la demande et la production énergétique (MUSCADE)** p. 174
  *Valéry Masson, Vincent Viguié, Kamel Zibouche, Luc Adolphe, Nathalie Long, Laurence Nolorgues*

## Seconde Partie : Modèles urbains et applications

A - Transport et mobilité p. 187

- **Les régularités de la mobilité quotidienne : le cas des résidents Franciliens d'après l'EGT 2001-2002** p. 188
  *Fabien Leurent, Mahdi Samadzad*

- **Capacité des véhicules, attente à quai et choix d'itinéraire en transport collectif urbain - modélisation pour la planification du réseau TC** p. 192
  *Fabien Leurent, Ektoras Chandakas*

- **Affectation dynamique du trafic sur un réseau de transport routier** p. 196
  *Vincent Aguiléra, Fabien Leurent*

- **Contraintes de capacité pour l'affectation du trafic routier dans les aires urbaines denses** p. 200
  *Tibye Saumtally, Jean-Patrick Lebacque, Habib Haj-Salem*

- **Zonage de territoire et affectation de trafic sur réseau** p. 204
  *Vincent Benezech, Fabien Leurent*

- **Analyse de sensibilité des modèles de déplacements aux courbes débit-vitesse** p. 207
  *Eugénie Brutti-Mairesse, Sonia Teillac*

- **Politiques de mobilité et dynamiques urbaines : les nouveaux enjeux de l'accessibilité pour la modélisation** p. 211
  *Yves Crozet, Aurélie Mercier, Nicolas Ovtracht*

- **Diagnostic économique d'un réseau de transports en commun complexe sur une grande agglomération : le cas de l'agglomération francilienne** p. 216
  *François Combes, Rob van Nes*

- **Étalement des emplois et déplacements domicile-travail dans un modèle urbain monocentrique** p. 219
  *Vincent Breteau, Fabien Leurent*

- **Accessibilité et prix immobiliers : le cas du Grand Lyon** p. 223
  *Pierre-Yves Péguy, Nicolas Ovtracht*

B - Phénomènes physiques et environnements urbains p. 227

- **Modélisation de la propagation acoustique en milieu urbain : approches ondulatoires** p. 228
  *Christophe Ayrault, Jean-Baptiste Doc, Simon Félix, Bertrand Lihoreau, Miguel Molerón, Vincent Pagneux, Adrien Pelat, Judicaël Picaut, Olivier Richoux*

- **Approche simplifiée de la réalisation de cartographies sonores de grandes agglomérations à l'aide d'un logiciel SIG** p. 232
  *Judicaël Picaut, Nicolas Fortin*

- **Evaluation du potentiel solaire urbain à l'échelle de la France** p. 236
  *Elie Ghanassia, Marie-Hélène Laurent, Mindjid Maïzia, Benoit Beckers*

- **Définition d'un modèle géométrique urbain pour la simulation du potentiel solaire** p. 239
*Diana Rodríguez, Aurélie Prévost, Nathalie Molines, Benoit Beckers*

- **Bilans hydrique et énergétique sur une zone urbaine hétérogène : mesures et simulations** p. 242
*Insaf Bagga, Isabelle Calmet, Fabrice Rodriguez, Jean-Michel Rosant*

- **Etude de l'influence de l'hétérogénéité morphologique du tissu urbain sur la dynamique de l'atmosphère : une approche de modélisation adaptée à l'échelle de la ville** p. 246
*Magdalena Maché, Jean-Francois Sini et Isabelle Calmet*

- **Modèle numérique pour la caractérisation du confort thermique dans les éco-quartiers : méthodologie et validation sur une configuration de rue canyon** p. 250
*Khaled Athamena, Jean François Sini, Sabre Maeva, Jean Michel Rosant*

- **Caractérisation des ambiances dans les grands ensembles : entre modélisation architecturale, sensible et physique** p. 254
*Amar Bensalma, Marjorie Musy, Nathalie Simonnot*

- **Modélisation et simulation microclimatique couplée des aménagements urbains et du comportement thermique des bâtiments** p. 258
*Laurent Malys, Julien Bouyer*

- **Développement d'un code CFD de simulation atmosphérique prenant en compte le rayonnement atmosphérique pour des géométries urbaines complexes** p. 261
*Yongfeng Qu, Maya Milliez, Luc Musson-Genon, Bertrand Carissimo*

- **Impact des technologies de contrôle des émissions du trafic routier sur la qualité de l'air à Paris** p. 265
*Yelva Roustan, Marie Pausader, Christian Seigneur*

C - Ville et énergie p. 271

- **Modélisation de la demande énergétique des bâtiments à l'échelle d'un quartier** p. 272
*Adrien Gros, Emmanuel Bozonnet, Christian Inard*

- **Méthodologies de conception climatique de quartiers urbains pour l'efficacité énergétique des bâtiments** p. 276
*Yuan Huang, Marjorie Musy, Gérard Hégron, Hong Chen, Baofeng Li*

- **Du bâtiment à la ville : l'intégration des données énergétiques dans la conception architecturale située** p. 282
*Laëtitia Arantes, Olivier Baverel, Pascal Rollet, Daniel Quenard*

D - Morphologies, dynamiques urbaines et représentations p. 287

- **Modélisation 3D urbaine automatique par photogrammétrie 3D haute résolution** p. 288
*Jean-Philippe Pons, Renaud Keriven, Olivier Tournaire, Souheil Soubra*

- **Reconnaissance automatique de structure viaire urbaine** p. 291
*Xavier Marsault*

- **Explorer la ville polycentrique avec un modèle multi-agents** p. 295
*Rémi Lemoy, Charles Raux, Pablo Jensen*

- **Belgrand : un grand équipement pour l'utilisation des bases de données dans le domaine de la ville et de la mobilité** p. 298
*Jean-Paul Hubert, Olivier Bonin, Martin Henriquez*

- **Modélisation conceptuelle de l'espace urbain : une approche multi-perspective** p. 301
  *Walid Chaker, Fabien Leurent*

E - Approches de modélisation intégrée p. 305

- **Couplage de simulations environnementales au sein d'une maquette numérique urbaine** p. 306
  *Bruno Hilaire, Ludovic Leclercq, Julien Maillard, Julien Soula, Dirk Van-Maercke, Kamel Zibouche*

- **Une méthode de diagnostic et de conception pour l'aménagement d'interfaces villes-ports intérieurs, basée sur l'analyse spatiale** p. 309
  *Kristel Mazy*

- **Le projet de recherche URSULA : un exemple d'approche intégrée de la modélisation urbaine** p. 314
  *Laurence Pattacini*

- **Analyse de cycle de vie et aide à la décision : cas des bâtiments parisiens** p. 321
  *Charlotte Tardieu, Cédissia About-de Chastenet, Morgane Colombert, Youssef Diab, Christophe Gobin, Grégory Herfray, Thibaut Jarrin, Bruno Peuportier, Maxime Trocmé*

# Introduction

*Gérard Hégron (IFSTTAR) et Olivier Haxaire (Advancity)*

## La création du groupement d'intérêt scientifique « Modélisation urbaine »

En ce début de 21e siècle, nous sommes confrontés à une situation et des transformations sans précédents dans l'histoire de la planète. L'urbanisation des territoires a atteint un niveau inédit qui ne cesse de s'élever, notamment dans les pays émergents et les pays du Sud. Les changements globaux, appelant chacun des solutions nouvelles et interdépendantes, sont nombreux : changements climatiques, explosion démographique et migrations, raréfaction et appauvrissement des terres arables, épuisement de certaines ressources naturelles et fossiles, pollution endémique des milieux, diminution de la biodiversité, crises économiques, etc. Les villes ont dépassé leurs limites administratives et étendent leurs influences et leurs impacts sur l'ensemble des territoires alentour et forment les nœuds d'un réseau couvrant l'ensemble de la planète. Les nuisances sonores, la pollution de l'air, la dégradation des conditions de vie urbaines suscitent une forte demande sociale pour l'amélioration du cadre de vie et des services, notamment en matière de mobilité. La densification du bâti, des réseaux et de la population rend par ailleurs les systèmes urbains vulnérables aux aléas et aux changements globaux.

Les villes sont des systèmes ouverts, c'est-à-dire des systèmes qui interagissent en permanence avec leur environnement, dont les éléments constitutifs sont également en interaction et par conséquent interdépendants. Pour gérer cette complexité, les décideurs, les concepteurs et les gestionnaires de la ville ont besoin de méthodologies, d'outils de représentation et d'évaluation pour comprendre les phénomènes qui sont à l'œuvre, pour comparer des scénarios possibles ou probables, pour faire des choix et pour agir. La modélisation de la ville intégrant les approches systémiques et interdisciplinaires est une démarche qui vise à apporter des réponses à la gestion de cette complexité et de l'incertain. L'autre particularité de cette période contemporaine est que ces questions aigües se posent de façon concomitante aux praticiens et aux chercheurs favorisant ainsi la mise en œuvre d'un processus de coproduction des problématiques urbaines et de leurs résolutions.

L'idée de créer un groupement d'intérêt scientifique à l'échelle nationale sur la modélisation urbaine est née de ce constat et s'est ainsi concrétisée sous l'impulsion du MEDDE. Le GIS s'est donné pour objet de faire converger les besoins entre les mondes de la recherche, de l'ingénierie, de la maîtrise d'ouvrage et de la maîtrise d'œuvre dans le champ de la modélisation urbaine, depuis la gouvernance et la conception des villes jusqu'à leur exploitation. Il a pour vocation de promouvoir une approche plus intégrée de la modélisation urbaine en abordant les différentes échelles spatiales et temporelles, en intégrant un développement des villes plus durable, en étudiant différentes typologies de villes, et en explorant des domaines novateurs comme, par exemple, la modélisation des flux entrants et sortants de la ville.

Le périmètre de la modélisation urbaine est très large. Aucune restriction n'est faite sur les domaines abordés car l'un des objectifs est de les répertorier et de les faire dialoguer. Nous pouvons distinguer quatre grands champs thématiques :

- Environnement construit et phénomènes physiques : construction (bâtiments, infrastructures et éco-construction), réseaux techniques, physique urbaine ;
- Représentations et dynamiques spatiales : morphologies urbaines, dynamique spatiale et réseaux de villes, transports et mobilité ;
- Anthropologie, sociologie, économie et risques : psychologie (qualité de vie, perception du milieu urbain, …), ergonomie (accessibilité physique, pénibilité, …), modes de vie et pratiques sociales, économie et gestion urbaine, sociologie (réseaux sociaux, intégration, exclusion, etc.), risques et cindynique ;
- La nature et le vivant en ville : biosphère, écosystème, biodiversité, franges urbaines (espace économique, nutrition, etc.), services éco-systémiques, évolution des relations nature/citadins.

Cette liste de thématiques n'a pas la prétention d'être exhaustive. On peut cependant relever que de nouvelles approches plus transversales tentent d'intégrer différents systèmes urbains en interaction proposant une modélisation dite « intégrée » de phénomènes couplés comme, par exemple, la combinaison des phénomènes physiques et anthropiques pour l'évaluation de consommations énergétiques.

## Objectifs du présent ouvrage

Pour démarrer les activités du GIS Modélisation urbaine, l'idée première fut d'établir un certain bilan de la situation lors d'un colloque dont l'objectif était d'effectuer un tour d'horizon suffisamment représentatif de la modélisation de la ville et de ses usages au sein des processus de gouvernance et d'aménagement urbain. Les actes de ce colloque intitulé « La modélisation de la ville : du modèle au projet urbain » qui s'est tenu les 23 et 24 février 2011 à l'École des Ponts ParisTech constituent la matière première du présent ouvrage. Nous y trouvons des états de l'art (articles longs) qui fournissent un état des lieux de la modélisation dans les quatre grands champs scientifiques cités plus haut où les auteurs font ressortir les éléments saillants des savoirs et de leurs applications ainsi que les tendances et évolutions actuelles, notamment les approches intégrées. Ces états de l'art sont enrichis par de courts articles qui présentent un grand nombre d'exemples de modèles ou d'études de cas d'utilisation de modèles afin de délivrer une image instantanée de ce qui se fait actuellement en France.

Avant de vous inviter à parcourir les pages de cet ouvrage, il convient de faire quelques propos liminaires sur les modèles urbains et leurs usages.

## De la modélisation et des modèles

Lorsque nous parlons de modèles, nous ne faisons pas seulement référence aux modèles et simulations numériques propres au monde de l'ingénierie, mais aussi aux représentations symboliques, formelles et théoriques. Les uns sont utiles pour guider les modes d'observation de la ville (acquisition de données pertinentes), pour comprendre un (sous-)système urbain, ses éléments constitutifs, son organisation et sa dynamique. Les autres sont profitables pour concevoir, pour gérer et pour décider. La ville, où se conjuguent phénomènes naturels et anthropiques, est avant tout un système ouvert dont on ne peut intégrer la complexité que par partie et qu'il est parfois difficile de fermer par des hypothèses simplificatrices. L'évaluation d'une politique ou d'un projet d'aménagement urbain n'est donc pas synonyme de prévision mais plutôt d'étude comparative de scénarios envisageables.

## De la ville modèle aux modèles de la ville

La première tentation fut, et reste parfois encore, de vouloir concevoir la ville modèle, où le concepteur tel un démiurge dessine la forme et l'organisation sociale et économique de la ville à partir d'une vision idéaliste et utopique, voire totalitaire, de la cité. Le parcours du pavillon central de l'*Urban Best Practice Area* de l'exposition universelle de Shanghaï s'ouvrait sur un rappel historique des représentations symboliques de la ville idéale qui façonnent le présent de nos villes.

Parmi ces représentations de la ville idéale, nous pensons notamment à celles de l'ouvrage Utopia[1] de Thomas Moore (1516) qui signifie « lieu qui n'est nulle part » (*ou-topos* en grec), mais aussi « lieu de bonheur » (*eu-topos* en grec), où l'auteur tente une esquisse de la société parfaite du socialisme scientifique.

Nous pensons également à des utopies développées par des architectes et urbanistes comme Le Corbusier qui a conçu trois plans de villes idéales : la ville contemporaine de trois millions d'habitants, la ville radieuse et, plus tard, la ville linéaire. Il cherche à définir une structure urbaine rationnelle que le nouveau monde industriel pourrait intégrer harmonieusement. L'univers du Corbusier s'articule autour d'une autorité planificatrice investie des pleins pouvoirs. Nous retrouvons l'esprit de cette démarche dans la Charte d'Athènes qui a constitué l'aboutissement du IV$^{e}$ Congrès

[1] Titre complet « De optimo rei publicae statu, deque nova insula Utopia » c'est-à-dire « Sur le meilleur état des affaires publiques, et sur la nouvelle île d'Utopie ».

international d'architecture moderne (CIAM), tenu à Athènes en 1933 sous l'égide du Corbusier. Le thème en était « la ville fonctionnelle » dont le principal concept sous-jacent était la création de zones indépendantes pour les quatre « fonctions » de la ville : la vie, le travail, les loisirs et les infrastructures de transport.

La tentation pourrait être aujourd'hui de vouloir créer le concept de « ville durable modèle ». Mais la Charte d'Aalborg adoptée par les participants à la conférence européenne sur les villes durables, tenue à Aalborg en 1994, prônant une densité et une mixité des fonctions urbaines au service du développement durable, est là pour nous rassurer.

Nous ne discuterons pas ici du statut philosophique et historique des utopies, mais nous partageons l'avis de Mario Polèse, chercheur en économie urbaine à l'Institut national de recherche scientifique de Montréal, formulant que "la ville modèle n'existe pas". Les villes sont en effet le résultat d'un ensemble de facteurs combinés :

- elles naissent et se développent dans des contextes historiques, géographiques, culturels, sociaux, économiques et politiques variés qui conditionnent leurs morphologies et leurs organisations ;
- elles se transforment au gré de l'évolution des pratiques sociales, des technologies et des dynamiques économiques et géopolitiques, et d'aléas naturels.

La ville est devenue l'œuvre, non plus d'une autorité suprême auquel Le Corbusier dédia sa ville radieuse, mais celle d'un ensemble d'acteurs associant la maîtrise d'ouvrage, la maîtrise d'œuvre, les architectes et urbanistes, sans oublier les habitants. Nous ne faisons donc pas appel à des villes modèles mais bien à des représentations ou modèles multiples de la ville qui nous permettent :

- de comprendre les phénomènes qui sont à l'œuvre aux différentes échelles spatiales (de l'îlot urbain au quartier, à la ville et au réseau de villes) et temporelles (du court terme au long terme) ;
- d'éclairer les choix structurants des politiques d'aménagement à long terme ;
- de planifier l'aménagement ou le renouvellement de zones urbaines ou d'infrastructures ;
- de les concevoir, de les construire et de les gérer ;
- et d'assurer le développement économique et social de la ville.

## Différents types de modèles

Nous nous appuyons sur différents types de modèles fonction de la nature des objets et sujets étudiés. Dans le cadre des environnements naturels et construits, nous faisons le plus souvent appel à des modèles qui décrivent les causes des phénomènes physiques qui sont à l'œuvre. Leur complexité naît des interactions qui existent entre les différents milieux, les différentes échelles et également entre l'environnement physique et sa perception par les habitants dès lors que l'on veut caractériser ou qualifier la qualité de vie.

Dans le cadre des dynamiques spatiales, sociales ou économiques, nous partons le plus souvent de l'observation des effets observés qui permettent d'établir des liens de corrélation ou au mieux de causalités entre les phénomènes observés (modèles phénoménologiques). Lorsque le système étudié est constitué d'un grand nombre de paramètres ou bien d'entités en interaction (système complexe), nous nous trouvons généralement dans l'impossibilité de mettre le système en équations. Le résultat n'est donc plus prédictible directement à partir de la connaissance des règles qui le régissent. Nous sommes alors amenés à effectuer une simulation du système étudié pour observer son comportement.

La visualisation (représentation visuelle) des données observées, calculées ou simulées est également très largement utilisée pour l'analyse et l'interprétation spatiale et temporelle des phénomènes étudiés, pour l'aide à la conception ou pour l'étude comparative de scénarios. Nous abordons ici le domaine de la sémiologie graphique qui concerne, par exemple, l'étude de la pertinence des représentations de l'espace (notamment cartographiques). Il s'agit bien ici d'un autre mode de modélisation (représentation graphique ou symbolique) de l'information qui doit faire sens commun pour l'ensemble des acteurs concernés. Il est amusant de constater qu'autrefois, l'image était composée selon un ordre symbolique. A la Renaissance, avec l'introduction de modèles

géométriques de la perception visuelle (règles de la perspective), nous sommes passés d'une scène symbolique à une vision naturelle, dite parfois réaliste ou objective, du monde. Aujourd'hui, nous opérons le trajet inverse, nous partons d'un modèle théorique de données dont nous cherchons une représentation visuelle symbolique à des fins d'analyse ou de communication.

## De l'usage des modèles

Comme nous l'avons exprimé précédemment sous différentes formes, tout système urbain est beaucoup plus que la somme de ses parties qui sont en interaction dynamique. Toute politique d'aménagement ou tout projet urbain requiert, par conséquent, une approche systémique au sein de laquelle les modèles peuvent jouer un rôle essentiel d'éclaireurs pour vérifier la validité des hypothèses ou des idées premières formulées par les décideurs ou les aménageurs. Nous devons pour ce faire répondre à quelques questions préalables :

- Existe-t-il des liens de causalité entre les phénomènes observés dans les différents éléments constitutifs du système urbain en question ?
- Quels phénomènes ou réalités sommes-nous capables de modéliser et d'évaluer ?
- Sommes-nous en mesure de prévoir ou simplement de comparer des solutions possibles ou des stratégies ?
- Enfin, à quelles phases des processus de gouvernance, de conception, de gestion de la ville les modèles sont-ils les plus utiles ? On dit souvent « penser globalement et agir localement », mais la question n'est-elle pas de savoir quelle est l'échelle pertinente pour agir puis quel levier doit-on actionner pour produire les meilleurs effets ?

Dans le cadre de la gouvernance et de l'aménagement urbain, nous savons pertinemment que toute décision naît le plus souvent d'un compromis entre des considérations politiques, environnementales, sociales et économiques. Dans ce contexte, quel est alors le statut effectif du modèle :

- une aide pour se poser les bonnes questions, pour éviter des dysfonctionnements importants ?
- un outil de représentation, de dialogue et de communication entre les acteurs du projet ?
- au mieux, un outil pour faire le meilleur choix entre différentes solutions ou scénarios ?

C'est sans doute un peu tout cela à la fois. Les architectes ou les politiques craignent parfois de se voir confisquer leur pouvoir de création ou respectivement de décision par le verdict du modèle, mais la complexité croissante des situations peut de moins en moins être résolue par le sens commun.

Aussi, nous espérons que le tour d'horizon proposé par ces actes du colloque « Modélisation urbaine : de la représentation au projet » permettra d'illustrer la complexité inhérente au concept de ville durable et aux changements globaux auxquels on doit faire face, d'informer les praticiens sur l'existence et la maturité de certains outils qui leur seraient très utiles dans l'exercice de leur profession et de montrer la nécessité d'un changement radical de culture urbanistique au sein de laquelle l'usage des modèles doit jouer pleinement son rôle.

**Première partie**

# États de l’art

# - A -

# Environnement construit et phénomènes physiques

# Modélisation des interactions ville-climat-énergie

Marjorie Musy
Laboratoire CERMA, UMR CNRS 1563, ENSA Nantes
Isabelle Calmet
Laboratoire de Mécanique des Fluides, UMR 6598 CNRS, Ecole Centrale de Nantes
Emmanuel Bozonnet
LEPTIAB, Université de La Rochelle
Fabrice Rodriguez
Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux

**Dans le contexte actuel où les conséquences du développement urbain doivent être maîtrisées, la connaissance et la modélisation des phénomènes physiques urbains sont devenues un enjeu important car elles peuvent constituer une aide à la décision pour la prise en compte de l'environnement dans la politique d'aménagement urbain. Le développement des connaissances sur la micro-climatologie urbaine est l'une des composantes clés pour la maîtrise de l'îlot de chaleur urbain, l'étude de la qualité de l'air et du confort des populations, la gestion des risques d'inondation et de pollution de l'eau et la maîtrise des consommations énergétiques. A partir de l'étude de l'interaction entre les phénomènes physiques à différentes échelles urbaines, il est proposé un état de l'art des recherches permettant de mieux appréhender la modélisation climatique urbaine et la modélisation de la consommation énergétique des bâtiments en environnement urbain. L'accent est mis sur les couplages entre ces approches et sur les modèles dont l'application est le cadre général de l'aménagement des zones urbaines et périurbaines et d'éventuelles inflexions du climat.**

## Introduction

L'urbanisation est aujourd'hui montrée du doigt pour ses impacts négatifs. On oppose l'étalement urbain, qui consomme les terres agricoles et conduit à une intensification de la pollution des milieux récepteurs (air, sol et milieux aquatiques) et des risques hydrologiques, à la densification qui, si elle n'est pas correctement organisée, génère une qualité de vie inacceptable pour les citadins. Les décideurs ont un besoin grandissant de connaissance des impacts des formes et usages de la ville.

Les villes sont caractérisées par un microclimat spécifique dont la manifestation principale est le phénomène d'îlot de chaleur urbain (ICU) qui se traduit par des températures plus élevées en ville que dans les alentours. La modification du climat urbain est liée à la forme urbaine, aux matériaux et aux charges anthropiques dissipées dans le tissu urbain. Les dissipations thermiques des bâtiments participent de façon importante à l'amplification du réchauffement urbain et les systèmes de climatisation peuvent représenter une part significative des charges anthropiques, d'autant plus que leur charge augmente avec le réchauffement. Outre les questions de confort en milieu urbain, le phénomène d'ICU pose des questions sanitaires avec parfois des conséquences dramatiques, comme lors de la canicule de l'été 2003 qui a entraîné un surcroît de mortalité estimé à 70 000 morts en Europe dont 20 000 en France. Alors que le GIEC a annoncé en 2007 un réchauffement global de 1,1 à 6,4°C pour la fin du XXIe siècle, il est impératif de mieux connaître et prévoir l'impact de l'urbanisation sur ce phénomène.

La consommation d'énergie finale de la France et la part liée aux secteurs résidentiels et tertiaires se stabilisent depuis 2006 à des valeurs de 162 et 71 MTEp. Ces secteurs représentent 43 % des consommations d'énergie et 23 % des émissions de $CO_2$. Pour l'Europe, le conditionnement des espaces habités est estimé à 57 % de la demande énergétique. On lui associe également 33 % de production de $CO_2$ du secteur bâtiment. Il faut en plus considérer qu'il est une des principales sources anthropiques responsables des phénomènes d'ICU. Le secteur du bâtiment constitue donc une des clés pour le respect de l'engagement pris en 2003 devant la communauté internationale par le chef de l'État Français et le Premier ministre de diviser par un facteur 4 les émissions nationales de gaz à effet de serre du niveau de 1990 d'ici 2050. Techniquement, le facteur 4 est beaucoup plus facile à atteindre dans le bâtiment neuf que dans la rénovation, alors qu'il faut compter avec un stock

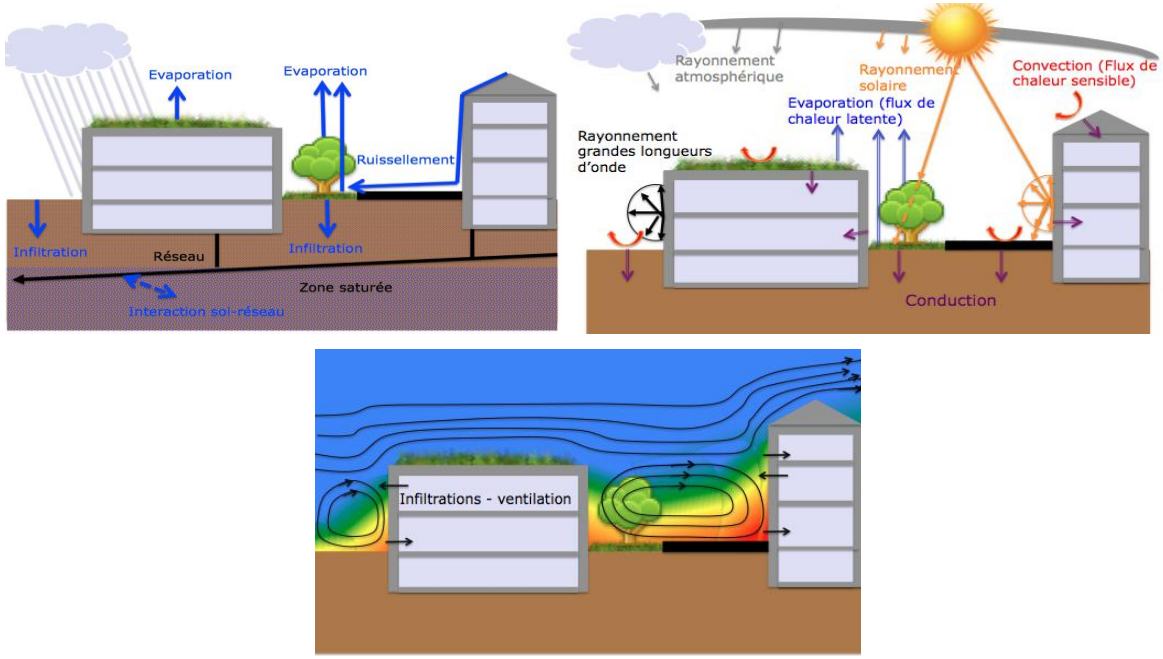
important de bâtiments anciens dont l'amélioration énergétique devra être programmée sur plusieurs années. Pour ces bâtiments, un des leviers consiste à agir sur le contexte climatique local afin de réduire la sollicitation thermique d'été, solution qui présente par ailleurs un caractère équitable et sanitaire. Cependant, l'utilisation de ce levier nécessite une connaissance des relations climat-comportement thermique du bâtiment ainsi que la mise en place d'approches d'évaluation de la consommation énergétique à grande échelle (quartier, agglomération).

Qu'il s'agisse des impacts climatiques ou énergétiques de l'urbanisation, les approches par simulations permettent de tester des hypothèses d'aménagement, en particulier l'utilisation de techniques alternatives, ce que l'expérimentation de terrain ne permet pas toujours. Il est donc nécessaire de disposer de modèles à la fois robustes et capables de simuler des configurations urbaines réalistes.

## Les couplages physiques

Si la représentation des phénomènes physiques urbains est relativement aisée, celle des multiples interactions entre eux l'est moins. Cependant, les processus physiques (thermique, aérodynamique, hydrologie, rayonnement…) impliqués dans le microclimat urbain et le comportement thermique des bâtiments ne peuvent être considérés indépendamment les uns des autres.

**Figure 1** : Bilans thermo-radiatifs et hydriques, et processus aérauliques




Le bilan hydrique (Figure 1) traduit les échanges d'eau entre le sol et ses réseaux enterrés, les surfaces et l'atmosphère en période de temps de pluie ou en temps sec, et prend en compte la variabilité spatiale des caractéristiques de la surface du sol (imper-méabilisation, présence de végétation), des propriétés hydrodynamiques des sols (perméabilité) et de la présence de réseaux enterrés qui constituent des lieux de drainage préférentiels dans le sol. Au flux d'évapotrans-piration entre surface et atmosphère, correspond un flux de chaleur, le flux de chaleur latente.Le bilan énergétique exprime (Figure 1) l'équilibre entre le rayonnement net, le flux de chaleur latente (issu du bilan hydrique), le flux de chaleur sensible (convection au niveau des surfaces) et le flux de chaleur par conduction dans les sols et au travers de l'enveloppe des bâtiments (stockage). Dans ce dernier cas, ce flux de chaleur par conduction dépend du traitement des ambiances intérieures (chauffage/climatisation). Un bilan thermique du bâtiment peut être fait afin d'écrire l'équilibre

entre les flux de chaleur au travers des murs et des toits, les apports solaires, les charges internes (usages, équipements…) et les flux liés à la ventilation et aux infiltrations de l'air à travers l'enveloppe.

Le flux de chaleur sensible au niveau des parois dépend des écoulements et de la température de l'air à proximité de la paroi. Les débits de ventilation et les infiltrations dépendent également de ces écoulements qui conditionnent les niveaux de pression sur les parois.

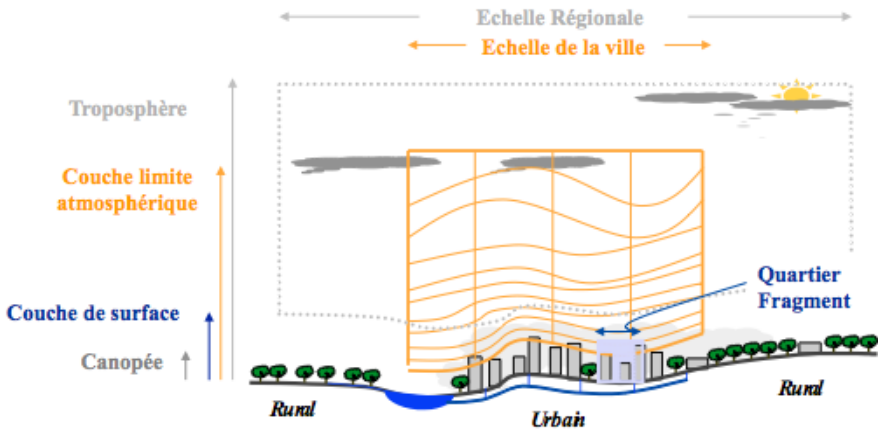
On constate donc qu'il y a dans chacun de ces bilans des flux et variables d'état qui expriment les interactions entre les phénomènes physiques. Cependant, ces interactions sont souvent négligées ou simplifiées, et nous trouvons ainsi quatre grandes familles de modèles : les modèles hydrologiques, les modèles de bilan radiatif, les modèles aérauliques et les modèles de bilan thermique. Tous ont beaucoup évolué, pour s'adapter aux nouvelles hypothèses d'aménagement urbain et représentent les interactions physiques soit en les intégrant directement dans les modèles existants, soit en réalisant des couplages entre modèles spécialisés.

Une des difficultés de mise en œuvre des couplages reste que les échelles de description spatiale ou temporelle des phénomènes ne sont pas toujours les mêmes. Par exemple, la simulation des consommations énergétiques des bâtiments est en général effectuée sur une période d'une année (avec un pas de temps d'une heure et des fichiers météo obtenus par traitement statistique de données trentenaires permettant de définir des normales climatiques [1]) alors que les simulations microclimatiques permettant l'obtention de données très locales sont davantage tournées vers une représentation de conditions climatiques types ou de séquences climatiques de quelques jours. Coupler ces modèles pour obtenir une estimation des consommations énergétiques avec une prise en compte du climat local et de l'effet du bâtiment sur ce climat n'est donc pas si immédiat.

## Modélisation climatique urbaine

Aux différentes échelles de description du climat urbain (Figure 2), correspondent des objectifs différents. Pour étudier l'influence des villes sur l'atmosphère et en particulier le phénomène d'îlot de chaleur urbain, la communauté scientifique a développé des modèles permettant de reproduire les principaux échanges énergétiques et hydriques entre le milieu urbain et l'atmosphère. La dernière décennie a ainsi connu des avancées considérables dans l'urbanisation des modèles atmosphériques [2,3,4,5]. Lorsque l'on s'intéresse au confort de l'usager de la ville, l'échelle considérée est celle de son environnement proche : la rue, la place… Ces études sont généralement menées à l'aide de modèles décrivant explicitement les aménagements urbains (bâtiments, arbres isolés…) et modélisant leur impact local sur l'ensoleillement, le vent, la température et l'humidité de l'air [6,7,8].

**Figure 2 :** Echelles de la micro-climatologie urbaine




Même si l'échelle d'étude est celle qui répond au mieux à la question posée, la connaissance des variables climatiques à l'échelle de la ville peut s'avérer importante dans l'étude des conditions de confort, pour replacer le fragment urbain étudié dans son environnement et extraire des informations sur les modifications engendrées par les formes urbaines et les aménagements locaux. Afin de relier les différentes échelles, des plateformes

de modélisation sont mises en place pour forcer les modèles dédiés à l'échelle du fragment urbain par des conditions météorologiques à haute-résolution issues de modèles à plus grande échelle [9]. Même si les problèmes de transport et dispersion de polluants dans la rue sont à l'origine de ces travaux de couplage [10], on peut présumer du bien-fondé de ces approches multi-échelles pour les études de microclimat local.

A l'inverse, la connaissance des processus qui interviennent à « petite échelle » permet d'améliorer la modélisation des processus physiques qui participent au climat urbain à plus « grande échelle », tout en restant en adéquation avec l'échelle considérée. Ceci a conduit au développement de schémas de « paramétrisation » de la ville de plus en plus sophistiqués, en termes de description spatiale du tissu urbain et de processus physiques représentés. Il n'y a pas à l'heure actuelle de consensus quant au degré de complexité requis pour des applications à méso échelle. En effet, la complexité du modèle allant de pair avec la quantité d'informations nécessaire pour l'alimenter, certains modèles théoriquement plus détaillés peuvent se comporter moins bien, par manque de données, que des modèles simplifiés. En revanche, il paraît important de raffiner suffisamment ces modèles pour prendre en compte l'hétérogénéité du milieu urbain et les interactions fortes entre les différents quartiers, et être ainsi en mesure d'aborder la modélisation du climat urbain en assurant une cohérence entre les différentes échelles.

Nous avons classé les modèles climatiques urbains en deux familles correspondant à deux grandes échelles d'appréhension : ceux qui représentent un fragment urbain (de l'échelle de la rue au quartier), composé de différents types de surfaces (bâti, sol, végétation) représentées explicitement, c'est-à-dire dans leur géométrie et positionnement relatifs et ceux qui représentent une échelle à laquelle les surfaces ne peuvent plus être représentées explicitement.

## *Echelle du fragment urbain*

### Approches « ambiances thermiques »

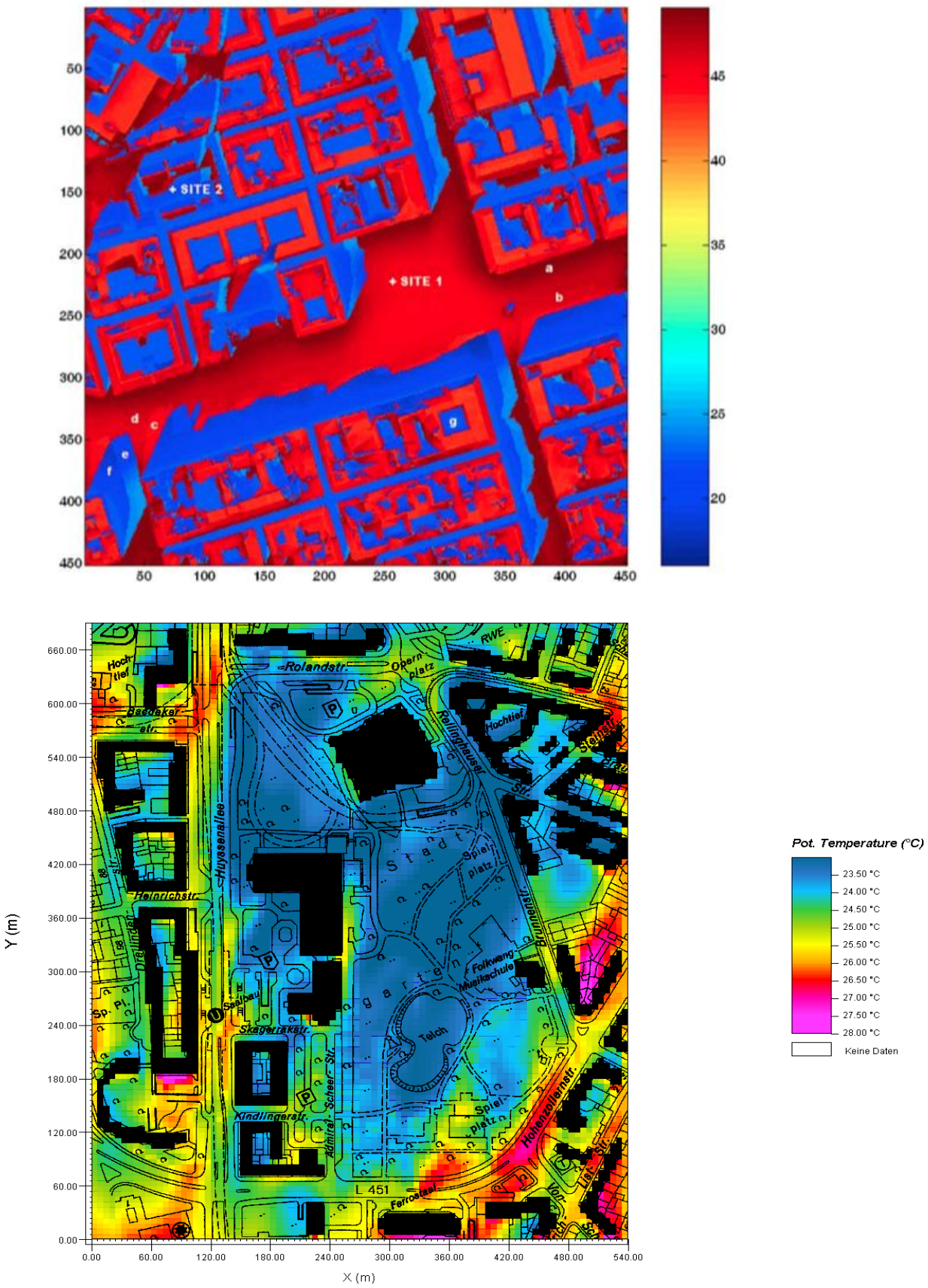
Nous présentons ici les modèles qui ont vocation à étudier les hétérogénéités des facteurs physiques d'ambiance produites par la forme urbaine et les aménagements. Selon leur point de départ (objectif et spécialité d'origine de l'équipe de chercheurs), les modèles représentent en général mieux une partie des flux et ont une approche plus simplifiée sur les autres de manière à aboutir à un bilan complet des différents flux de chaleur et de masse entre surface bâtie, sol, végétation et atmosphère.

On trouve ainsi une famille de modèles qui permettent de calculer les flux solaires dans des géométries urbaines complexes : DART [11], SOLENE [12,13], SOLWEIG (Figure 3) [14]. Ils permettent de calculer la température radiante moyenne, indicateur de confort représentatif en environnement extérieur. Cependant, par exemple, le modèle SOLWEIG s'affranchit du bilan thermique des parois en approximant les températures de surface à partir de la température d'air et en fonction de l'exposition au soleil de la surface considérée au cours du temps. Ce modèle prend donc principalement en charge les phénomènes radiatifs et paramétrise les autres.

On peut également regrouper les modèles qui réalisent les bilans sur l'air environnant (bilans de masse, de chaleur et de quantité de mouvement) comme ENVI-met (Figure 3), SOLENE - microclimat [17] et « coupled simulation » [15,18] qui permettent de calculer les flux radiatifs, les températures de surface, le champ de vitesse du vent, le taux d'humidité et la température de l'air dans une géométrie urbaine même complexe et en présence de végétation. Cette dernière est représentée par un milieu poreux au vent et semi-transparent par rapport au rayonnement solaire, et les processus d'évapotranspiration et de photosynthèse sont exprimés dans les bilans de masse et de chaleur.

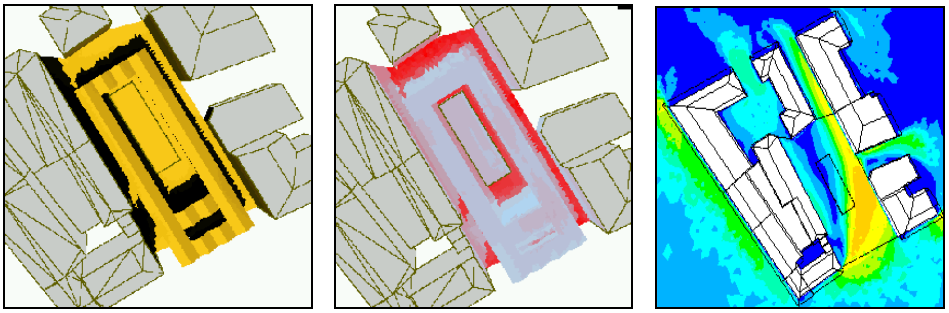
Ces trois modèles, s'ils semblent similaires dans les applications qu'ils permettent, ne le sont pas dans leur mise en œuvre. En effet, les équipes de développement d'ENVI-met et de « coupled simulation » ont opté pour la mise en place d'un modèle complet, ce qui nécessite d'intégrer des modèles pour tous les phénomènes. Cette approche laborieuse se fait au détriment de certains sous-modèles. Par exemple, dans ENVI-met, le rayonnement de grande longueur d'onde est approximé à partir d'une température moyenne de toutes les parois et le stockage de chaleur dans les murs n'est pas pris en compte. Dans « coupled simulation » les géométries traitées doivent pouvoir être décrites dans une trame orthogonale, ce qui est inadapté aux fragments urbains de villes européennes.

**Figure 3 :** Exemple de résultat obtenu avec – en haut : SOLWEIG (Variations de la Température Radiante Moyenne (°C) centre de Göteborg, 15h - 11/10/2005 [15]) – en bas : ENVI-met (température d'air dans et autour d'un parc urbain (°C) [16])



*A contrario,* le couplage d'outils a été retenu par les développeurs de SOLENE-MicroAclimat. Pour l'évaluation du confort dans les espaces extérieurs, Robitu [8] (Figure 4) a réalisé un couplage fort entre SOLENE (pour les aspects radiatifs et thermiques dans les parois et le sol) et FLUENT (pour les aspects aérauliques) : la modification des écoulements par les effets de convection naturelle est prise en compte. Ce couplage fort, lourd en temps de calcul, était acceptable car les problématiques de confort en espace extérieur ne nécessitent pas de périodes de simulation longues. Par la suite, pour des objectifs d'évaluation des consommations énergétiques de bâtiments en milieu urbain, Bouyer [7] a allégé ce couplage avec une prise en compte uniquement du transport et de la diffusion de masse et de chaleur dans l'air, ce qui lui a permis d'étendre les périodes de simulation aux quelques jours nécessaires à la thermique du bâtiment.

**Figure 4 :** Exemple de résultats obtenus avec le couplage de SOLENE-microclimat et de FLUENT (Flux solaire, température de surface, vitesses d'air dans une place arborée [17])



Pour répondre à la nécessité d'évaluation de techniques alternatives d'aménagement, ces modèles doivent évoluer de manière à prendre en compte différents types d'aménagements urbains comme :

- La présence de végétation et les impacts liés à son type [16,18,19], sa localisation [19,20,21] et son mode de gestion (intensive ou extensive) ;
- Les systèmes alternatifs de gestion des eaux pluviales, à l'échelle parcellaire (toiture stockante, puits d'infiltration, cuve de récupération des eaux pluviales) ou du quartier (bassins de rétention, noues) ;
- Les matériaux constructifs spécifiques pour le traitement des îlots de chaleur urbains comme les revêtements sélectifs type « cool paints » en toiture [22] ou en façade [23], ou encore les matériaux actifs dans un système énergétique tels que les panneaux solaires ;
- La forme urbaine (orientation, densité…), sur laquelle un travail spécifique de conception peut être mené avec des objectifs de confort ou de consommation énergétique [24,25].

### Approches couplées hydro-énergétiques

Les approches classiques de modélisation hydrologique, souvent axées sur la représentation hydraulique des écoulements, avec un objectif de simulation des phénomènes exceptionnels (crues urbaines) ou de dimensionnement des ouvrages d'assainissement (réseaux d'assainissement, bassins de rétention), évoluent depuis une dizaine d'années au profit de modèles privilégiant une représentation plus détaillée du cycle de l'eau, en particulier du comportement hydrique du sol et de la surface urbaine. Cette évolution est liée aux nouvelles orientations de la gestion des eaux pluviales en ville, favorisant l'infiltration des eaux pluviales, le stockage local et la restitution vers l'atmosphère par évapotranspiration, à travers les techniques alternatives d'aménagement urbain comme les noues ou les toitures végétales (Figure 5), les matériaux poreux et la création de surfaces en eau au cœur des quartiers. Ces techniques permettent non seulement de réduire les volumes d'eau de pluie ruisselés à l'exutoire, mais participent également à un rafraîchissement de l'atmosphère urbaine [26,27].

Différentes approches de modélisation ont été développées pour affiner cette représentation détaillée du cycle de l'eau en milieu urbain, caractérisé par une forte hétérogénéité de matériaux et de fonctionnements hydriques associés (surfaces minérales, surfaces végétalisées…).

Les modèles hydrologiques utilisés en milieu urbain utilisent au départ une paramétrisation sommaire des flux d'évapotranspiration, et séparent le flux d'évaporation de la surface du sol du flux de transpiration par la végétation. Le flux d'évaporation réelle y est estimé comme une fraction de l'évapotranspiration potentielle

(ETP), proportionnellement au stock d'eau contenu dans le réservoir de surface du sol [28,29]; cette paramétrisation est réalisée sans tenir compte du potentiel effet du réchauffement des surfaces minérales urbaines sur le flux d'évaporation. Le flux de transpiration est estimé sur les parties non imperméabilisées à partir de la connaissance de l'humidité du sol et de l'ETP, selon des paramétrisations inspirées des travaux de modélisation portant sur l'hydrologie rurale [28,30]. Ces paramétrisations « hydrologiques » permettent de s'affranchir de l'utilisation des données et des paramètres microclimatiques (température, humidité, profils de vent….).

**Figure 5 :** Noue (Eco-quartier Bottière-Chénaie à Nantes – Toiture végétalisée à Nantes)

Les approches « hydro-énergétiques » associent la simulation conjointe du bilan énergétique et du bilan hydrologique pour mieux représenter les flux hydriques à la surface. Dans une approche simplifiée, Xiao et al. [31] présentent un modèle hydrologique dans lequel l'évapotranspiration potentielle est estimée à partir d'une modification de l'équation de Penman, en utilisant les données de rayonnement net, de température de l'air, de vitesse du vent à 2m et de pression de vapeur saturante ; l'évapotranspiration réelle est ensuite déduite de cette ETP de la même façon que dans les modèles cités plus haut. Ce modèle est particulièrement utilisé pour tester l'impact de techniques alternatives à l'échelle du quartier et peut aider les aménageurs à comparer leur efficacité vis-à-vis de la modification du bilan hydrique.

Dans des approches plus élaborées, les bilans hydrique et énergétique sont simulés de façon couplée comme dans le modèle WEP (Water and Energy transfer Process [32]) et dans le modèle NICE-URBAN [27]. Cette approche innovante de modélisation couplée permet de simuler l'effet des nouvelles techniques urbaines du point de vue hydrique et énergétique : l'application de ce modèle, évalué à une échelle réduite, montre que l'utilisation de matériaux poreux stockant l'eau (chaussées et/ou enrobés poreux) à la place de matériaux plus classiques (enrobés bitumineux ou béton) permet, tant que ces matériaux conservent une teneur en eau assez élevée, de diminuer non seulement la température de surface des matériaux, mais aussi la température de l'air au-dessus de ces surfaces de quelques degrés par rapport à ces matériaux classiques. Ce type d'analyse n'est pas possible avec les approches de modélisation hydrologique citées plus haut.

Cette évolution des outils de modélisation hydrologique est à rapprocher de l'évolution de modèles de sol qui simulent le bilan énergétique avec une prise en compte simplifiée des processus hydrologiques du milieu urbain comme dans le modèle SM2U [33] ou dans le modèle TEB-ISBA [2,34]. L'évaluation des options d'aménagement alternatives qui permettent d'améliorer le confort des habitants en ville (introduction de la végétation, infiltration et réutilisation des eaux pluviales, utilisation de matériaux perméables, réfléchissants…) ne peut se faire de façon correcte qu'en adoptant ce type d'approche intégrée, en poursuivant et complétant les efforts déjà entrepris en ce sens dans des études plus ciblées sur le fonctionnement hydrologique des zones urbaines.

### *Echelle de la ville*

Le climat urbain résulte des échanges d'énergie (radiative, thermique et hydrique) entre les surfaces et l'atmosphère, et des interactions aérodynamiques entre la couche de canopée et l'atmosphère. L'objectif premier des modèles urbains de bilan énergétique des surfaces est de déterminer les flux de chaleur et d'humidité qui vont conditionner le comportement thermody-namique de l'atmosphère urbaine, à des échelles pouvant aller de la centaine de mètres à quelques kilomètres. A ces échelles,

les différents éléments constituant le milieu urbain ne peuvent être représentés explicitement.

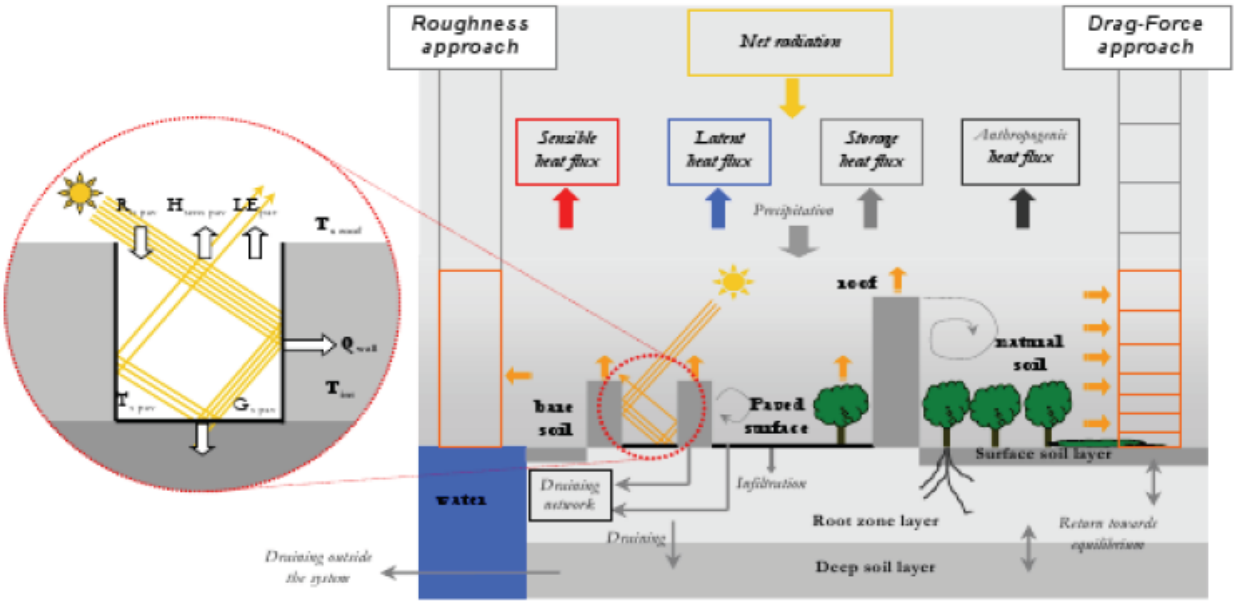
L'étude du climat à l'échelle de la ville, ou à plus grande échelle, nécessite donc de représenter certaines des spécificités du milieu urbain qui vont avoir une influence sur le vent, la température et l'humidité de l'air : la morphologie urbaine, la présence de surfaces imperméables, la prédominance des surfaces bâties par rapport aux surfaces naturelles, les propriétés physiques des surfaces (albédo, émissivité) et des matériaux (conductivité et capacité thermiques).

Qu'ils soient à base empirique [35] ou à base physique, tous les modèles de bilan énergétique des surfaces s'appuient sur un principe commun : le rayonnement net qui résulte du bilan radiatif des surfaces est réparti en flux de chaleur sensible et latente, et en flux de chaleur stockée qui traduit les échanges de chaleur par conduction dans les matériaux et le sol (Figure 6).

Dans les modèles à base physique les plus simples (dits « bulk »), les flux de chaleur sensible et de chaleur latente sont modélisés à l'interface entre la canopée urbaine (dans sa globalité) et l'atmosphère au-dessus (Figure 6, gauche). La canopée est représentée par des propriétés aérodynamiques (longueur de rugosité), radiatives et thermiques moyennes. Ces flux dépendent de la différence de température ou d'humidité entre la canopée et l'atmosphère et d'une résistance aérodynamique qui peut être fonction du vent et de la stabilité atmosphérique dans la couche de surface. Il est cependant possible dans ces modèles simples de distinguer différents types de surfaces (surfaces naturelles, végétation, routes, toits, canyon…) qui contribuent aux flux à l'interface canopée-atmosphère [35,36]. Les modèles à une couche de canopée [34,37] considèrent un tissu urbain simplifié (ensemble de rues canyons, orientées ou non, dans lesquelles on différencie les toits, les rues et les murs). Ils modélisent les échanges entre ces surfaces et l'air dans la rue puis au-dessus des toits par un système de résistances aérodynamiques plus complexe que dans la méthode « bulk » mais basé sur le même principe. Dans ce cas, le vent au milieu du canyon est déterminé par des relations empiriques alors que la température dans le canyon résulte de l'équilibre entre les flux de chaleur à la surface et ceux en haut du canyon. Enfin, dans les modèles de canopée multi-couches, plus élaborés, les flux sont calculés à différents niveaux à l'intérieur de la canopée (Figure 6, droite), ce qui nécessite de connaître les profils de vent et de température jusqu'au sol. Lorsque ces modèles sont directement intégrés à un modèle atmosphérique [3,4], les variables climatiques (et la turbulence) y sont calculées par résolution des équations de la dynamique des fluides et de la thermodynamique, modifiées à l'intérieur de la canopée pour représenter l'effet moyen des bâtiments sur le vent et la turbulence, et les sources/puits de chaleur et d'humidité aux différents niveaux. Ces modèles multi-couches peuvent aussi être « externalisés » : ils sont alors « forcés » par la météorologie au-dessus de la canopée (provenant de mesures ou du modèle atmosphérique), tandis que le vent, la température et l'humidité dans la canopée sont obtenus par la résolution des équations de la couche de surface plus ou moins simplifiées [38,39,40,41]. Les modèles de canopée fournissent donc non seulement les flux à l'interface canopée-atmosphère, mais aussi des températures et humidités de l'air à l'intérieur de la canopée qui, même si elles ne sont pas locales, sont représentatives du tissu urbain considéré.

Des choix ont dû être faits pour modéliser ou prendre en compte les processus physiques qui interviennent dans le bilan d'énergie des surfaces, indépendamment des options prises pour le calcul des flux de chaleur sensible et latente. Certains modélisateurs ont fait le choix de négliger le flux de chaleur latente qui résulte de l'évapotranspiration par la végétation, ne considérant que les spécificités des milieux fortement urbanisés. A l'opposé, la végétation peut être directement intégrée dans le tissu urbain, permettant en outre les interactions directes avec les surfaces bâties comme les phénomènes d'ombrage et l'absorption du rayonnement par la végétation [42]. Dans les approches intermé-diaires, les flux de chaleur latente issus des surfaces naturelles et de la végétation contribuent au flux total en fonction de la densité présente dans le domaine, sans que la végétation n'interagisse directement avec les autres surfaces. Le stockage de chaleur, important en milieu urbain du fait des matériaux et de la forme urbaine, est parfois calculé comme le résidu du bilan d'énergie, ou estimé de façon semi-empirique comme une fraction du rayonnement net [43] en fonction des caractéristiques de la surface, ou encore calculé à l'aide d'une équation de conduction de la chaleur au travers des différentes couches de matériaux. Enfin, les modèles dédiés au milieu urbain prennent en compte le piégeage radiatif dans les rues par le calcul ou la paramétrisation d'une ou plusieurs réflexions ayant lieu entre les différentes surfaces de la rue, diminuant ainsi l'albédo total et les pertes par rayonne-ment infrarouge, et accroissant l'îlot de chaleur.

**Figure 6 :** Exemple de modèle de bilan énergétique des surfaces d'après [4]. A gauche : approche « bulk ». A droite : approche canopée multi-couches.




Il est quasiment impossible d'associer les différents processus modélisés aux types de modèles (bulk ou canopée) décrits plus haut. C'est précisément dans l'objectif de définir certaines lignes directrices de modélisation qu'une action de recherche internationale d'inter-comparaison de ces modèles a été menée récemment. Il ne s'agissait pas d'évaluer un modèle particulier par comparaison à des mesures sur site, mais d'identifier les « classes » d'approches les plus performantes pour représenter les échanges entre canopée urbaine et atmosphère, ainsi que les processus physiques qui ne peuvent être négligés dans la modélisation physique [44,45]. Plusieurs conclusions ont été tirées, sur la base de 2 jeux de données expérimentales et 33 modèles. Sans reprendre de façon exhaustive toutes les conclusions et recommandations, il semble qu'aucun modèle ne soit le plus performant pour tous les flux, ce qui est justifié par la diversité des applications auxquelles ces modèles sont dédiés. Il est important de noter que la prise en compte de la végétation et des surfaces naturelles, présentes même en faible pourcentage, améliore le résultat global du modèle, même s'il s'avère que les flux de chaleur latente associés sont les composantes du bilan les moins bien modélisés. Ceci peut être dû à la méconnaissance de la teneur en eau du sol, ainsi qu'à l'utilisation de modèles de végétation adaptés aux milieux ruraux. Alors qu'une des pistes évoquées pour la régulation du climat urbain porte sur la végétalisation des surfaces urbaines et sur les nouvelles pratiques de gestion des eaux pluviales, des efforts coordonnés doivent être menés avec les hydrologues travaillant sur milieu urbain pour mieux représenter, dans les modèles climatiques, les interactions entre la surface et le sous-sol.

Enfin, les flux de chaleur en milieu urbain ont une composante liée aux activités humaines. Une partie des flux de chaleur anthropiques est indirectement représentée lorsque les échanges de chaleur par conduction dans les matériaux entre l'intérieur et l'extérieur des bâtiments sont modélisés. La prise en compte des flux anthropiques résultant de l'utilisation des systèmes de conditionnement d'air étroitement liée aux conditions climatiques ou de la mise en place de systèmes de ventilation, doit permettre d'améliorer l'estimation des flux de chaleur en milieu urbain. Des modèles simplifiés de bâtiments (qui traduisent le comportement thermique d'un ensemble de bâtiments-types) sont introduits dans certains modèles [40,41,46] afin de prendre en compte les interactions climat-bâtiments, sans lesquelles les études prospectives d'aménagement urbain seraient incomplètes.

## Modélisation du comportement thermique des bâtiments en environnement urbain

En ce qui concerne l'évaluation des consommations énergétiques des bâtiments, trois échelles se distinguent :

- l'échelle du bâtiment, pour laquelle les approches sont basées sur l' « isolement » d'un bâtiment où sont réalisés des bilans de masse et de chaleur afin d'évaluer soit la quantité d'énergie nécessaire pour obtenir une température de confort imposée, soit la température dans les différents espaces du bâtiment ;
- l'échelle du bâtiment et de son environnement proche, c'est-à-dire la zone autour du bâtiment qui a une influence sur la consommation d'énergie de ce bâtiment ;
- l'échelle du quartier pour répondre à des applications dans lesquelles il s'agit par exemple d'évaluer l'impact de politiques urbaines sur la consommation énergétique d'un quartier.

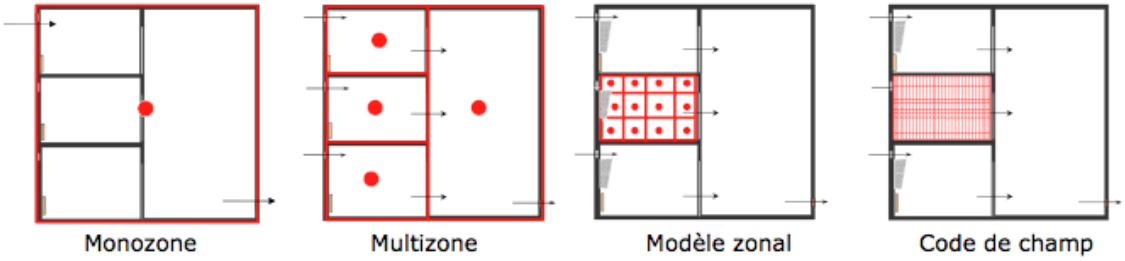
### *Problématique des modèles de thermique du bâtiment en environnement urbain*

À l'échelle du bâtiment et donc des espaces habités, il s'agit avant tout de définir l'ensemble « *enveloppe* et *équipements techniques* » qui assure des conditions d'ambiance thermique confortables pour les occupants. La modélisation permet en outre d'estimer les grandeurs d'état et les flux utiles pour caractériser cette ambiance et le degré de confort, d'inconfort, ou d'autres critères liés à l'utilisation du bâtiment. La modélisation doit donc permettre de coupler les phénomènes de transferts de masse et de chaleur à différents niveaux : à celui de l'occupant, celui du bâti (cloisons, parois et équipement) et celui de l'environnement extérieur. En milieu urbain la problématique est particulière, car les charges climatiques extérieures aux bâtiments sont fortement variables en fonction des effets microclimatiques locaux.

Les échanges thermiques et hydriques entre les occupants et les ambiances intérieures peuvent être approchés par des équations d'équilibre entre le métabolisme et les transferts convectifs, radiatifs, conductifs à la surface du corps ainsi que la perspiration. Cette approche développée par Fanger [47], modélise les échanges en intégrant le taux de vêture, l'activité, la posture, etc. Elle aboutit à un calcul empirique d'un pourcentage d'insatisfaction (PPD [48]). Des études plus détaillées des transferts en régime transitoire et du confort en lien avec la physiologie donnent une estimation plus précise des paramètres, et permettent la prise en compte des usages (passage ou occupation prolongée, etc.). Une approche plus simple consiste à définir des limites ou des intervalles acceptables de température et d'humidité. Les effets de transfert de chaleur sensible peuvent être intégrés par la température opérative telle que définie par le code de la construction (et utilisée dans les calculs réglementaires). Les sorties des modèles de thermique du bâtiment permettent de définir les paramètres climatiques intérieures avec plusieurs niveaux de finesse, adaptés aux objectifs : demande énergétique, comportement du bâti, choix de systèmes de traitement des ambiances.

Les maillages de calcul peuvent être très fins pour, par exemple, résoudre correctement les équations des écoulements dans un local sous les effets thermo-aérauliques (code de champ, Figure 7), ce qui conduit à des temps de calcul prohibitifs pour de grands volumes et des scénarios climatiques longs (une saison par exemple) discrétisés en pas de temps de l'ordre de l'heure. L'approche des modèles zonaux (Figure 7) tente de remédier à ces temps de calculs en augmentant la taille des cellules élémentaires du maillage mais reste dévolue à l'étude de quelques espaces [49]. Pour l'étude globale d'un bâtiment comprenant de nombreuses zones d'occupation différentes, des systèmes et une exposition aux charges extérieures variables, les approches mono ou multizones (Figure 7) sont pertinentes et retenues par de nombreux outils de simulation thermique dynamique du bâtiment (Energyplus, TRNSYS, Comfie, etc.). Dans cette approche, chaque volume d'air est relié à l'enveloppe par les éléments de surfaces sur lesquels sont réalisés les bilans de transfert par conduction dans les parois, convection, rayonnements solaire et infrarouge lointain.

**Figure 7 :** Approches de modélisation thermique du bâtiment




Ces modèles permettant d'estimer la demande énergétique de chauffage deviennent plus difficiles à mettre en œuvre pour des bâtiments à basse consommation et pour l'évaluation du confort d'été, en particulier dans le contexte urbain. En effet, d'une part, les bâtiments fortement isolés sont très sensibles aux apports de chaleur (ensoleillement, occupation, etc.) ; d'autre part, la conception des enveloppes en confort d'été est très sensible aux conditions extérieures, surtout si elles utilisent des solutions de rafraîchissement passif comme la ventilation naturelle [50].

### *Impact du microclimat sur les consommations énergétiques et le confort dans les bâtiments*

Alors que les modèles de thermique dynamique du bâtiment se perfectionnent, que les bâtiments étudiés sont de plus en plus performants, la prise en compte de conditions climatiques locales et des effets de masque devient indispensable pour une évaluation correcte des consommations énergétiques de bâtiments en milieu urbain.

Il s'agit d'évaluer l'impact de l'environnement sur les différents flux à l'interface bâti-environnement :

- flux de chaleur par convection (modifié par la vitesse de l'air à proximité des parois et les variations locales de la température extérieure) ;
- flux solaire (direct, diffus, réfléchi) ;
- flux de chaleur par rayonnement infrarouge échangé avec la voûte céleste et les surfaces environnantes ;
- flux dus à la ventilation et aux infiltrations.

Les modèles physiques qui traitent à la fois de thermique du bâtiment et de thermique de l'environnement urbain sont rares. Deux approches sont possibles : l'évaluation de l'impact de l'environnement (masques) ou l'évaluation des interactions entre le bâtiment et son environnement.

La première approche est celle sur laquelle reposent SUNtool et CitySim [51,52], qui prennent en compte les effets de masque solaires et lumineux de l'environnement urbain pour le calcul de la consommation énergétique des bâtiments. C'est également l'option prise par l'équipe de recherche en thermique du bâtiment de l'Université de Séville dans le projet Européen « Greencode » qui par le développement du modèle de rue canyon « GreenCanyon », s'est dotée d'un outil d'estimation de l'influence de l'environnement sur le comportement énergétique des bâtiments [53].

La seconde approche nécessite de résoudre des problématiques d'échelle. En effet, il est difficile de représenter précisément à la fois l'environnement urbain, les bâtiments et leurs usages. Ainsi, l'étude des interactions passe soit par une réduction de la zone de l'environnement urbain étudiée, comme l'étude d'un bâtiment dans une rue canyon [54], soit par une simplification du modèle thermique du bâtiment [7]. Dans les deux cas, pour le moment, seul un bâtiment fait l'objet du bilan thermique.

Ce couplage complet bâtiment-environnement présente cependant l'intérêt de permettre l'évaluation non seulement de l'impact de l'environnement sur le comportement thermique du bâtiment, mais aussi l'impact des usages du bâtiment sur le microclimat urbain [15,55]. Cette dernière prise en compte devrait permettre une meilleure estimation des charges anthropiques liées à la maîtrise des ambiances intérieures [56]. L'utilisation et le couplage de modèles aux différentes échelles permet cette approche sans redévelopper un modèle complet, ce que fait par exemple Asawa [57] avec le couplage d'un modèle énergétique des équipements du bâtiment (éclairage, eau chaude sanitaire, systèmes de chauffage, ventilation et climatisation), d'un modèle d'enveloppe (transferts thermo-aérauliques, charges internes et externes), et d'un modèle de bilan global urbain (rayonnement solaire et grande longueur d'onde, flux latents et sensibles, conduction). Cette simulation

couplée lui permet notamment de différencier la contribution de chaque bâtiment sur le microclimat.

Évidemment, la contribution anthropique à la modification du microclimat urbain provient également de différents autres paramètres [56] : le trafic automobile, l'industrie et le métabolisme humain (pour une part inférieure à 1%). Au contraire de la contribution provenant des ambiances intérieures des bâtiments, ces paramètres liés au comportement des populations et caractéristiques des différentes villes peuvent être renseignés *a priori* dans les modèles de simulation cités ici pour tenir compte de leur contribution. Ils peuvent donc être issus de bases de données ou de résultats d'autres modèles.

### *L'évaluation des consommations énergétiques à l'échelle du quartier*

Pour répondre aux besoins des acteurs de terrain en matière d'évaluation des politiques énergétiques sur un territoire, il est nécessaire de modéliser le comportement énergétique des bâtiments à grande échelle. Les modèles doivent alors être sensibles aux leviers utilisés dans ces politiques : choix d'énergie, opérations de réhabilitation, évolution des comportements… Quand il s'agit d'évaluer la consommation énergétique d'un quartier existant, il est difficile de réaliser des simulations de thermique dynamique d'un grand nombre de bâtiments sur des périodes temporelles longues (année, périodes de chauffe), ceci pour des raisons de disponibilité des données (usages, composition du bâti) et de capacité de calcul. On peut classer les approches d'évaluation de la consommation énergétique à l'échelle du quartier en trois familles : les modèles thermiques, les modèles paramétriques et les modèles statistiques.

Les modèles de thermique dynamique sont basés sur une modélisation simplifiée du comportement thermo-aéraulique des bâtiments. Dans le cas de CitySim [52], la modélisation thermique est soit monozone soit multizone. Ce qui distingue ce modèle des modèles dédiés à l'évaluation du confort et de la consommation énergétique d'un bâtiment, c'est la globalisation de l'ensemble des vitrages d'une part et des parois opaques d'autre part, alors que les modèles thermiques classiques décomposent généralement une enceinte en plusieurs faces correspondant aux différentes orientations. Au contraire, dans SUNtool [51], la modélisation des bâtiments est restée très détaillée, ce qui limite certainement sa capacité à prendre en compte un grand nombre de bâtiments.

D'autres approches de modélisation proposent de croiser approches statistiques et approches physiques (cf. état de l'art de Swan et Ugursal ou Kavgic et *al.,* [58,59]). Il s'agit d'un compromis de simplification du modèle thermique en fonction de la disponibilité de l'information sur le bâti et ses usages. Dans ces approches, des analyses préalables de sensibilité de modèles thermiques détaillés aux variations des données d'entrées ont été faites afin de cibler les données sources indispensables à une modélisation simplifiée correcte. Le calcul des consommations peut alors être fait à l'aide de modèles simplifiés basés sur ces paramètres. Pour renseigner ces paramètres, différents types de données sont croisés : enquêtes, relevés sur le quartier… Ces croisements de données sont facilités par les SIG [60, 61]. Les bâtiments sont alors classés en fonction des paramètres retenus. La discrétisation typologique repose sur la définition de classes de bâtiments aux comportements thermiques assimilés comme semblables [62], en général basées sur des périodes de construction (les réglementations thermiques locales peuvent être les bornes de ces classes), les modes constructifs et les usages. La principale difficulté de la connaissance de la composition des bâtiments et de ses usages est ainsi contournée par la mise en place des typologies. Reste cependant à les établir pour chaque site, car elles sont difficilement transposables d'une région (voire d'une ville) à l'autre, notamment pour des périodes de construction antérieures à l'industrialisation du bâti et aux réglementations thermiques. Les formes des constructions et surtout les matériaux utilisés sont souvent liés à des pratiques et productions locales.

Les approches statistiques partent des ratios nationaux de consommation énergétique qui sont corrigés de données locales liées à la météo ou à des usages particuliers. Elles reposent également sur des classements typologiques des bâtiments.

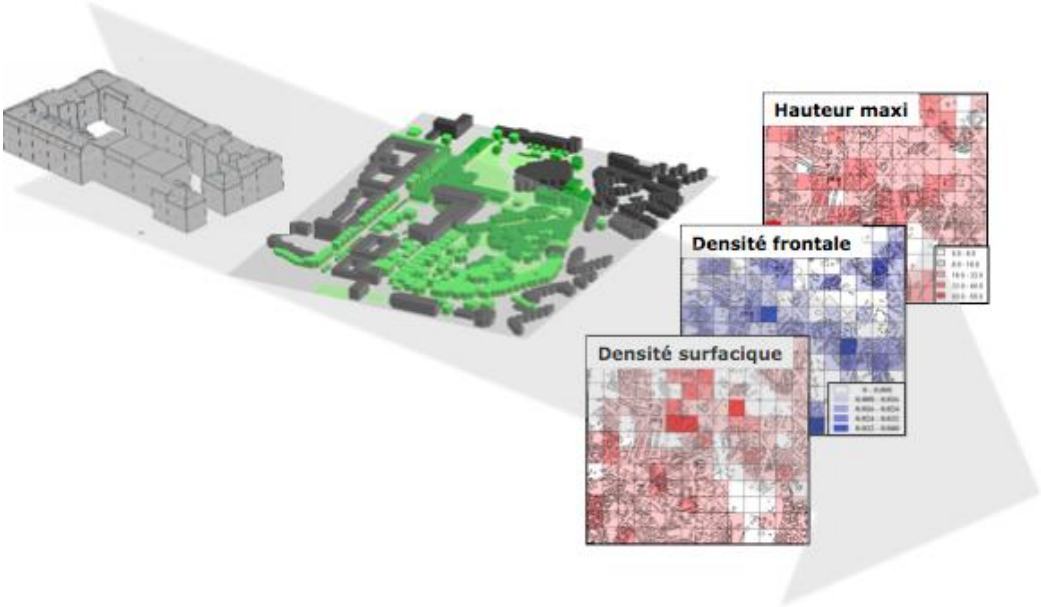
Indépendamment de leurs objectifs initiaux, ces modèles permettraient l'évaluation des charges anthropiques liées au chauffage et à la climatisation nécessaire aux modèles climatiques.

## La question de la représentation de la ville dans ces modèles

Suivant les objectifs poursuivis, et suivant les échelles d'appréhension des phénomènes, la représentation de la ville n'est pas la même. S'il est possible de représenter d'une manière

explicite la géométrie d'une ville à l'aide des banques de données urbaines ou de données satellitaires, la représentation de la géométrie dans les modèles est souvent faite à une résolution moindre, en raison de la taille du grain de modélisation (ou de l'élément unitaire de modélisation, en général la maille) ou de la limitation des moyens de calcul. Qu'on arrive à expliciter la ville, ou qu'on la représente par des paramètres moyens (Figure 8), une difficulté subsiste, l'acquisition de la donnée urbaine et sa transformation en paramètres « utiles » aux modèles. Un effort important doit donc être fait entre experts de l'acquisition et de la manipulation de données et experts de la modélisation physique pour rendre l'information disponible utilisable.

**Figure 8 :** De gauche à droite : un îlot dans CitySim [52] ; un quartier dans ENVI-met [16] ; caractéristiques morphologiques moyennes d'une ville à partir de BDTopo IGN (Maché 2011)[1]




## La question de la représentation des usages

Les bâtiments neufs sont conçus pour un usage en général bien défini, mais les villes le sont rarement dans un tel niveau de maîtrise. Les quartiers, nouveaux ou anciens, vivent des variations saisonnières (présence de feuillage…) ou sur des temporalités moins prévisibles (constructions, destructions, réhabilitations, changement d'affectation…). Leur usage est également lié à leur intégration urbaine (réseaux de transport, d'énergie, équipements collectifs…). Les charges anthropiques à affecter à un quartier, que ce soit la part liée au chauffage et à la climatisation du bâti ou aux autres usages, restent donc difficiles à évaluer. L'affinement de ces entrées peut se faire par l'utilisation, en pré-process de sorties, d'autres modèles, comme l'envisagent Robinson et *al.* [52] avec l'utilisation de MATSIM (http://www.matsim.org/) qui donne accès aux flux de transport. Cette succession de modèles alourdit fortement les simulations. Il est donc nécessaire de déterminer si l'apport en qualité de résultats (micro-climatologie ou consommation énergétiqe) justifie cet investissement.

## Perspectives

Cette revue, sans doute partielle, met en évidence une grande diversité des approches de modélisation qui partent d'objectifs initiaux différents. Les problématiques actuelles de développement durable et la nécessité d'approches intégrées (climatique, thermique, hydrique, acoustique…) semblent cependant faire converger les modèles vers des objectifs d'évaluation des dispositifs dont on pense qu'ils seront à même d'atténuer l'effet d'îlot de chaleur urbain ou de participer à la réduction des émissions de gaz à effet de serre.

[1] Communication privée

Mais, avant de mener de telles projections, le passage par des phases de validation des modèles développés est indispensable. Dans cet objectif, des campagnes de mesures ponctuelles ou de suivi de long terme de certains processus participant au microclimat urbain ont été menées. Le bassin versant périurbain de Rezé (44) a été instrumenté pendant 10 ans par l'IFSTTAR (Nantes) pour un suivi hydrologique, et les données collectées ont servi à l'évaluation de modèles hydrologiques [29], et à la validation et à l'amélioration de la composante hydrique de modèles de bilan énergétique des surfaces tels que TEB ou SM2U [63]. Lors de campagnes expérimentales plus récentes (CLU-Escompte, CAPITOUL), des moyens de mesures ont été mis en œuvre pour caractériser les échanges entre la canopée urbaine et l'atmosphère, et de façon plus détaillée, les températures des différentes surfaces obtenues par télédétection dans l'infrarouge thermique [64]. Depuis 2008, des mesures hydrologiques et météorologiques sont menées en parallèle sur le Secteur Atelier Pluridisciplinaire nantais de l'IRSTV (renommé ONEVU – Observatoire Nantais des EnVironnements Urbains), pour approfondir les connaissances sur les interactions sous-sol – surface – atmosphère en milieu urbain hétérogène et permettre des évaluations croisées des modèles d'hydrologie urbaine et des modèles de climat à l'échelle du quartier.

Les modèles de climat à l'échelle d'un fragment urbain peuvent être évalués sur des configurations urbaines simples telles qu'une rue canyon [65]. Cependant, pour des fragments urbains réels, qui sont constitués d'une grande diversité de surfaces (bâties ou non bâties), le processus de validation nécessite d'abord la connaissance d'un grand nombre de données relatives aux usages des bâtiments (ainsi qu'à tous les usages producteurs de charges anthropiques) et aux propriétés physiques des enveloppes de bâtiments ou des sols. Plus que la mise en œuvre de méthodes expérimentales permettant d'acquérir les données nécessaires à la validation des modèles, il semble que le principal obstacle réside dans la connaissance fine de ces données d'entrée.

## Conclusion

Les modèles de microclimat urbain deviennent de plus en plus complets, avec une description de plus en plus détaillée de la composition urbaine. Cependant, dès que l'on aborde des échelles urbaines, il s'agit de trouver un compromis entre la précision de la modélisation, les capacités de calcul, la disponibilité de la donnée et l'effort nécessaire pour la fournir au modèle. Cette cohérence, en lien avec les objectifs poursuivis, doit rester à la base de la méthodologie de modélisation. On peut imaginer en effet, avec l'augmentation des puissances de calculs, l'articulation des outils de simulation avec les bases de données urbaines qui leur fournissent la documentation nécessaire pour représenter d'une manière de plus en plus détaillée les caractéristiques du microclimat urbain. Ceci est certainement très intéressant du point de vue de la connaissance des phénomènes, de leur compréhension, mais aussi pour évaluer les différents impacts des variables urbaines (nature des bâtiments, occupation des sols…), climatiques ou anthropiques.

## Bibliographie


[1] Bertolo L, Bourges B.
Données climatiques utilisées dans les programmes de simulation
*Techniques de l'Ingénieur - 1992*

[2] Lemonsu A., Masson V.
Simulation of a summer urban breeze over Paris
*Boundary-Layer Meteorology - Vol. 104, n°3, 2002 pp. 463-490*

[3] Martilli A., Clappier A., Rotach M.W.
An urban surface exchange parameterisation for mesoscale models
*Boundary-Layer Meteorology - Vol. 104, n°2, 2002. pp. 261-304*

[4] Dupont S., Otte T.L., Ching J.K.S.
Simulation of meteorological fields within and above urban and rural canopies with a mesoscale model
*Bondary-Layer Meteorology - Vol. 113, n°1, 2004. pp. 111-158*

[5] Leroyer S., Calmet I., Mestayer P.G.
Urban boundary layer simulations of sea-breeze over Marseille during the ESCOMPTE experiment
*International Journal of Environment and Pollution - Vol. 40, n°1-3, 2010. pp. 109-122*

[6] Ali-Toudert F.
Dependence of outdoor thermal comfort on street design
*Meteorologischen Institutes - Universität Freiburg, 2005 p. 224*

[7] Bouyer J.
Modélisation et simulation des microclimats urbains - Étude de l'impact de l'aménagement urbain sur les consommations énergétiques des bâtiments
*Thèse de doctorat, Ecole Polytechnique de l'Université de Nantes, 2009*

[8] Robitu M., Musy M., Inard C., Groleau D.
Modeling the influence of vegetation and water pond on urban microclimate
*Solar Energy - Vol. 80, n°4, 2006. pp. 435-447*

[9] Chen F., Kusaka H., Bornstein R., Ching J., et *al.*
The integrated WRF/urban modelling system: Development, evaluation, and applications to urban environmental problems
*International Journal of Climatology - Vol. 31, n°2, 2011. pp. 273-288*

[10] Tewari M., Kusaka H., Chen F., Coirier W.J., Kim S., Wyszogrodzki A.A., Warner T.T.
Impact of coupling a microscale computational fluid dynamics model with a mesoscale model on urban scale contaminant transport and dispersion
*Atmospheric Research - Vol. 96, n°4, 2010 pp. 656-664*

[11] Gastellu-Etchegory J.-P., Zagolski F., Romier J.
A simple anisotropic reflectance model for homogeneous multilayer canopies
*International Journal of Remote Sensing - 1996, 57:22-38*

[12] Miguet F., Groleau D.
Urban bioclimatic indicators for urban planers with the sofware tool SOLENE
*SB07 Sustainable Construction, materials and practices : challenges of the industry for the new millenium, Lisbonne : IOS PRESS - 2007*

[13] Groleau D., Fragnaud F., Rosant J.-M.
Simulation of the radiative behavior of an urban quarter of Marseille with the Solene mode
*ICUC5, Fifth international conference on urban climate. Lodz, 2003*

[14] Lindberg F., Holmer B., Thorsson S
SOLWEIG 1.0 – Modelling spatial variations of 3D radiant fluxes and mean radiant temperature in complex urban settings
*International Journal of Biometeorology - Vol. 52, 2008. pp. 697-713*

[15] Chen H., Ooka R., Huang H., Nakashima M.
Study on the impact of buildings on the outdoor thermal environment based on a coupled simulation of convection, radiation, and conduction
*ASHRAE Transactions - Vol. July, n°1, 2007*

[16] Lahme E., Bruse M.
Microclimatic effects of a small urban park in densely built-up areas: Measurements and model simulations
*ICU5, Fifth international conference on urban climate. Lodz : [s.n.], 2003*

[17] Robitu M.
Etude de l'interaction entre le bâtiment et son environnement urbain : influence sur les conditions de confort en espaces extérieurs
*Thèse de Doctorat. Ecole Polytechnique de l'Université de Nantes, 2005*

[18] Chen H.
Study on mitigation measures for outdoor thermal environment on present urban blocks in Tokyo using coupled simulation
*Building and Environment - Vol. 44, 2009. pp. 2290-2299*

[19] Alexandri E., Jones P.
Developping a one-dimensional heat and mass transfer algorithm for describing the effect of green roofs on the built environment: Comparison with experimental results
*Building and Environment - Vol. 42, n°8, 2007. pp. 2835–2849*

[20] Bruse M., Fleer H.
On the simulation of surface-plant-air interactions inside urban environments
*Environmental Modelling & Software - Vol. 13, 1998. pp. 373-384*

[21] Jesionek K., Bruse M.
Impacts of vegetation on the microclimate: modeling standardized building structures with different greening leve
*ICUC5, Fifth international conference on urban climate. Lodz (Poland) : [s.n.], 2003*

[22] Akbari H., Bretz S., Kurn D.M., Hanford J.
Peak power and cooling energy savings of high-albedo roofs
*Energy and Buildings - Vol. 25, n°2, 1997. pp. 117-126*

[23] Doya M.
Analyse de l'impact des propriétés radiatives de façades pour la performance énergétique de bâtiments d'un environnement urbain dense
*Thèse de Doctorat. Université de La Rochelle, 2010*

[24] Huang Y.
Methodology of Climatic Design of Urban District for Buildings Energy Efficiency
*Thèse de Doctorat. Ecole Centrale de Nantes (France) & Huazhong University (China), 2010*

[25] Hoyano A., Iino A., Ono M., Tanighchi S.
*Analysis* of the influence of urban form and materials on sensible heat flux - A case study of Japan's largest housing development « Tama New Town »
*Atmospheric Environment - Vol. 33, n°24-25, 1999 pp. 3931-3939*

[26] Mitchell V.G., Cleugh H.A., Grimmond C.S.B., Xu J.
Linking urban water balance and energy balance models to analyse urban design options
*Hydrological Processes - Vol. 22, 2008. pp. 2891-2900*

[27] Nakayama T., Fujita T.
Cooling effect of water-holding pavements made of new materials on water and heat budgets in urban areas
*Landscape and Urban Planning - Vol. 96, 2010 pp. 57-67*

[28] Mitchell V.G., Mein R.G., McMahon T.A.
Modelling the urban water cycle
*Environmental Modelling & Software - Vol. 16, 2001 pp. 615-629*

[29] Rodriguez F., Andrieu H., Morena F.
A distributed hydrological model for urbanized areas. Model development and application to urban catchments
*Journal of Hydrology - Vol. 351, n°(3-4), 2008. pp. 268-287*

[30] Feddes R., Hoff H., Bruin M., Dawson T., et *al.*
Modelling root water uptake in hydrological and climate models
*Bulletin of the American Meteorological Society - Vol. 82, n°12, 2001. pp. 2797-2809*

[31] Xiao Q., McPherson E.G., Simpson J.R., Ustin S.L.
*Hydrologic* processes at the urban residential scale
*Hydrological Processes - Vol. 21, 2007 pp. 2174–2188*

[32] Jea Y., Ni G., Kawahara Y., Suetsugi T.
Development of WEP model and its application to an urban watershed
*Hydrological Processes - Vol. 15, 2001 pp. 2175-2194*

[33] Dupont S., Mestayer P.G., Guilloteau E., Berthier E., Andrieu H.
Parameterization of the urban water budget with the submesoscale soil model
*Journal of Applied Meteorology and Climatology - Vol. 45, n°4, 2006 pp. 624-648*

[34] Masson V.
A physically-based scheme for the urban energy budget in atmospheric models
*Boundary Layer Meteorology - Vol. 94, 2000 pp. 357-397*

[35] Grimmond C.S.B., Oke T.R.
Turbulent heat fluxes in urban areas: Observations and a local-scale urban meteorological parameterization scheme (LUMPS)
*Journal of Applied Meteorology - Vol. 41, n°7, 2002 pp. 792-810*

[36] Dupont S., Mestayer P.G.
Parameterization of the urban energy budget with the submesoscale soil model
*Journal of Applied Meteorology and Climatology - Vol. 45, n°12, 2006 pp. 1744-1765*

[37] Kusaka H., Kondo H., Kikegawa Y., Kimura F.
A simple single-layer urban canopy model for atmospheric models: Comparison with multi layer and slab models
*Boundary-Layer Meteorology - Vol. 101, n°3, 2001 pp. 329-358*

[38] Masson V., Seity Y.
Including atmospheric layers in vegetation and urban offline surface schemes
*Journal of Applied Meteorology and Climatology - Vol. 48, n°7, 2009 pp. 1377-1397*

[39] Hamdi R., Masson V.
Inclusion of a drag approach in the Town Energy Balance (TEB) scheme: Offline 1D evaluation in a street canyon
*Journal of Applied Meteorology and Climatology - Vol. 47, n°10, 2008 pp. 2627-2644*

[40] Salamanca F., Martilli A.
A New Building Energy Model coupled with an Urban Canopy Parameterization for urban climate simulations-part II. Validation with one dimension off-line simulations
*Theoretical and Applied Climatology - Vol. 99, n°3-4, 2010 pp. 345-356*

[41] Salamanca F., Krpo A., Martilli A., Clappier A.
A new building energy model coupled with an urban canopy parameterization for urban climate simulations-part I. Formulation, verification, and sensitivity analysis of the model
*Theoretical and Applied Climatology - Vol. 99, n°3-4, 2010 pp. 331-344*

[42] Lee S.-H., Park S.-U.
A vegetated urban canopy model for meteorological and environmental modelling
*Boundary-Layer Meteorology - Vol. 126, n°1, 2008 pp. 73-102*

[43] Grimmond C.S.B., Oke T.R.
Heat storage in urban areas: Local-scale observations and evaluation of a simple model
*Journal of Applied Meteorology - Vol. 38, n°7, 1999 pp. 922-940*

[44] Grimmond C.S.B., Blackett M., Best M.J., Baik J.-J., et *al*
Initial results from Phase 2 of the international urban energy balance model comparison
*International Journal of Climatology - Vol. 31, n°2, 2011. pp. 244-272*

[45] Grimmond C.S.B., Blackett M., Best M.J., Barlow J., et *al.*
The international urban energy balance models comparison project: First results from phase 1
*Journal of Applied Meteorology and Climatology - Vol. 49, n°6, 2010 pp. 1268-1292*

[46] Kikegawa Y., Genchi Y., Yoshikado H., Kondo H.
Development of a numerical simulation system toward comprehensive assessments of urban warming countermeasures including their impacts upon the urban buildings' energy-demands
*Applied Energy - Vol. 76, n°4, 2003 pp. 449-466*

[47] Fanger P.O.
Thermal comfort : analysis and applications in environmental engineering
*Danish Technical Press, [s.l.] : 1970 248 p*

[48] ISO - International Organization for Standardization
ISO7730 : 2005 - Ergonomics of the thermal environment -- Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria
*ISO - International Organization for Standardization : 2005*

[49] Megri A.C., Snyder M., Musy M.
Building zonal thermal and airflow modelling - A review
*International Journal of Ventilation - Vol. 4, n°2, 2005 pp. 177-188*

[50] Georgakis C., Santamouris M.
Wind and Temperature in the Urban Environment
*Natural ventilation in the urban environment - assessment and design : James and James, 2005*

[51] Robinson D., Campbell N., Gaiser W., Kabel K., et *al.*
*SUNtool* - a new modelling paradigm for simulating and optimising urban sustainability
*Solar Energy - Vol. 81, n°9, 2007 pp. 1196-1211*

[52] Robinson D., Haldi F., Kämpf J., Leroux P., Perez D., Rasheed A., Wilke U.
CitySim : Comprehensive micro-simulation of resource flows for sustainable
*IBPSA 2009, Glasgow, 2009*

[53] Sanchez de la Flor.
A new methodology towards determining building performance under modified outdoor conditions
*Building and Environment - Vol. 41, n°9, pp. 1231 – 1238*

[54] Bozonnet E.
Impact des microclimats urbains sur la demande énergétique des bâtiments : Cas de la rue canyon
*Thèse de Doctorat, Université de La Rochelle, 2005*

[55] Bozonnet E., Belarbi R., Allard F.
Thermal Behaviour of buildings: modelling the impact of urban heat island
*Journal of Harbin Institute of Technology - Vol. 14, n°Sup., 2007 pp. 19-22*

[56] Sailor D.J., Lu L.
A top-down methodology for developing diurnal and seasonal anthropogenic heating profiles for urban areas
*Atmospheric Environment- Vol. 38, n°17, 2004 pp. 2737-2748*

[57] Asawa T.
Prediction of sensible heat flux from buildings and urban spaces using detailed geometry model of a substantial urban area - Introduction of a prediction model of anthropogenic heat into an urban heat balance simulation model
*ICUC7, Yokohama, Japan, 2009*

[58] Swan L.G., Ugursal V.I.
Modeling of end-use energy consumption in the residential sector : a review of modelling techniques
*Renewable and Sustainable Energy Reviews - Vol. 13, 2009 pp. 1820-1833*

[59] Kavgic M., Mavrogianni A., Mumovic D., Summerfield A., et *al.*
A review of bottom-up building stock models for energy consumption in the residential sector
*Building and Environment - Vol. 45, 2010 pp. 1683-1697*

[60] Gasden S.J., Rylatt R.M., Lomas K.J.
Methods of predicting urbandomestic energy demand with reduced datasets: a review and a new GIS-based approach
*Building Serv. Eng. Res. Technol. - Vol. 24, 2003 pp. 93-102*

[61] Heiple S., Sailor D.J.
Using building energy simulation and geospatial modeling techniques to determine high resolution building sector energy consumption profiles
*Energy and Buildings - Vol. 40, 2008 pp. 1426-1436*

[62] Graulière P.
Typologie des bâtiments d'habitation en France - Synthèse descaractéristiques des bâtiments d'habitation existants permettant l'évaluation du potentiel d'amélioration énergétique
*Ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement Durable et de la Mer, 2007*

[63] Berthier E., Dupont S., Mestayer P.G., Andrieu H.
Comparison of two evapotranspiration schemes on a sub-urban site
*Journal of Hydrology - Vol. 328, 2006 pp. 635-646*

[64] Hénon A., Mestayer P.G., Groleau D., Voogt J.A.
High resolution thermo-radiative modeling of an urban fragment in Marseilles city center during the UBL-ESCOMPTE campaign
*Building and Environment - Vol. 46, 2011, pp. 1747-1764*

[65] Idczak M., Groleau D., Mestayer P.G., Rosant J.-M., Sini J.-F.
An application of the thermo-radiative model SOLENE for the evaluation of street canyon energy balance
*Building and Environment - Vol. 45, 2010. pp. 1262-1275*

# Ambiances sonores urbaines et interaction ville-bâtiment

Judicaël Picaut, Gwénaël Guillaume
Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux (IFSTTAR)
Guillaume Dutilleux
Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Strasbourg

**Le bruit est un problème sociétal majeur, dont l'impact sanitaire, environnemental et même économique est très important. Plus encore qu'au bruit lui-même, la population et les décideurs publics sont de plus en plus sensibles à la notion de qualité de l'environnement sonore, notamment en milieu urbain. La question qu'il est donc légitime de se poser est de savoir si les outils et méthodes proposés par les laboratoires de recherche, donc à terme par le monde opérationnel, vont bien dans le sens de cette demande. Dans cet article, nous nous focaliserons essentiellement sur la problématique centrale de la démarche, à savoir la modélisation de la propagation du son en milieu urbain. Les aspects « sources sonores », « indicateurs acoustiques » et « perception », même s'ils constituent des sujets de recherche importants, ne seront que très peu abordés. Dans un premier temps, nous reviendrons sur l'ensemble des phénomènes physiques mis en jeu dans le processus de propagation acoustique, notamment en milieu urbain. Dans un second temps, nous balayerons les approches proposées pour modéliser la propagation acoustique, aussi bien les approches opérationnelles que les recherches en cours. Enfin, nous présenterons les perspectives de recherche en la matière, dont certaines sont déjà d'actualité.**

## Introduction

### *Un contexte sociétal important*

Le bruit constitue un problème sociétal majeur, dont l'impact sur la santé est maintenant bien établi (atteinte aux facultés auditives, développement de problèmes cardio-vasculaires, stress, troubles du sommeil, troubles cognitifs notamment en milieu scolaire)[1,2], en particulier en zones urbaines et périurbaines où les sources de bruit sont nombreuses et variées. En 2000, l'institut de sondage IPSOS a ainsi mis en évidence au travers d'une étude portant sur les risques associés au logement sur la santé, que le bruit est la menace environnementale inquiétant le plus les ménages français (30 % de la population interrogée), ce qui place cette gêne juste devant les craintes concernant la pollution de l'air (29 % des sondés). Une étude de l'INSEE cette fois, parue en octobre 2002, indique par ailleurs que dans les agglomérations de plus de 50 000 habitants, les habitants placent le bruit devant l'insécurité quand il s'agit de hiérarchiser les problèmes locaux les plus préoccupants. Enfin, en 2010, l'institut de sondage TNS Sofres a réalisé une enquête relative au vécu des nuisances sonores chez les français. Il en ressort que le bruit est une nuisance pour 2 français sur 3. Cette même enquête a tout particulièrement étudié la situation des habitants des trois plus grandes agglomérations françaises. Pour 25 % d'entre eux, le bruit rend très irritable et est identifié comme cause de fatigue. Le bruit conduit même 20 % des habitants de grandes agglomérations à envisager un déménagement.

En milieu urbain,[3] la circulation est citée comme source principale de bruit que ce soit dans l'habitat individuel ou collectif, ce qui représente en 2007 une dépense évaluée à 788 millions d'euros rien que pour le bruit des transports (remplacement des silencieux des pots d'échappement, murs anti-bruits, recensement et résorption des points noirs « bruit ») et 833 millions d'euros pour les dépenses liées à l'isolation des bâtiments, soit un total d'environ 1,7 milliard (+6 % par an de 2000 à 2007)[4].

[1] Source : Site internet de l'agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (Anses)

[2] Source : Good practice guide on noise exposure and potential health effects, EEA Technical report, No 11/2010, 40p.

[3] Source : enquête Logement 2002 INSEE

[4] Source : service de l'Observation et des Statistiques (SOeS) du Commissariat général au développement durable (CGDD), Rapport de la Commission des comptes et de l'économie de l'environnement (édition 2009).

On pourrait citer encore beaucoup d'autres statistiques sur le sujet, mais toutes iraient dans le même sens, à savoir la mise en évidence de l'importance des enjeux sociétaux, sanitaires, environnementaux et économiques de la lutte contre le bruit, notamment en milieu urbain. Ces enjeux ont d'ailleurs été soulignés dans le rapport de synthèse récent du groupe de travail N°3 du Grenelle de l'Environnement, en charge des problèmes d'environnement et de santé.

### *Un contexte législatif fort en matière de lutte contre les nuisances sonores*

Pour faire face à ces enjeux et apporter des solutions, un certain nombre de lois et décrets ont déjà été mis en place depuis plusieurs années afin de réglementer les nuisances sonores. La loi « Bruit » ou loi « Royal » n°92-1444 du 31 décembre 1992 relative à la lutte contre le bruit tend par exemple à prévenir, réduire et limiter l'émission et la propagation de bruits susceptibles de nuire à la santé des habitants.[5] En matière de bruit de voisinage, le décret[6] n°2006-1099 du 31 août 2006 fixe par exemple des critères acoustiques pour les activités à la fois sportives, culturelles et professionnelles, ou l'arrêté[7] du 30 juin 1999 (autrement appelé « Nouvelle réglementation Acoustique », NRA) relatif aux caractéristiques acoustiques des bâtiments d'habitation contraint les maîtres d'ouvrage à respecter des critères d'isolation acoustique pour toute nouvelle construction. En matière de bruit des transports terrestres, nous pouvons par exemple citer l'article L.571-9 du code de l'environnement qui impose la prise en compte du bruit dans tout projet neuf d'infrastructure routière ou ferroviaire, et lors de la transformation significative d'une voie existante, ainsi que l'article L.571-10 qui institue le classement des infrastructures de transports terrestres en fonction de leurs caractéristiques acoustiques et de leur trafic. Sur la base de ce classement, le Préfet détermine en particulier les niveaux de nuisances sonores à prendre en compte et les prescriptions techniques applicables lors de la construction d'un bâtiment afin d'atténuer l'exposition des occupants à ces nuisances.

Au niveau européen, la directive[8] 2002/49/CE sur l'évaluation et la gestion du bruit dans l'environnement insiste, d'une part, sur la nécessité d'informer les riverains sur les risques et les effets du bruit dans l'environnement, et d'autre part, sur l'adoption de plans d'action en matière de prévention et de réduction du bruit. Cette directive impose notamment aux grandes agglomérations de produire des cartes de bruit et tend également à harmoniser les méthodes de calcul et de mesures au sein de la communauté européenne.

Plus globalement, les objectifs du groupe de travail n°3 du Grenelle de l'Environnement se basent sur un certain nombre d'éléments de ce contexte législatif, de manière à proposer des solutions pour résorber et pour éviter l'apparition de nouveaux points noirs, à améliorer la qualité de l'environnement sonore et à développer l'information et la prévention auprès du public.

### *Du contexte à la problématique de la modélisation des ambiances sonores urbaines*

Si nous nous replaçons une nouvelle fois dans le contexte du Grenelle de l'Environnement, les moyens identifiés pour la réalisation des objectifs du groupe de travail n°3 visent principalement à l'amélioration des connaissances scientifiques, en particulier sur la relation bruit-santé, sur la définition d'indicateurs représentatifs de la gêne sonore et sur l'impact du bruit sur les pathologies non auditives. Plus globalement, ces objectifs nécessitent également de nouvelles recherches et des avancées technologiques en matière de prévention du bruit. Concernant ce dernier point, deux axes sont traditionnellement considérés : la réduction du bruit à la source (véhicules moins bruyants, politique de gestion du trafic) et le développement de dispositifs de protection des habitants contre les nuisances sonores (murs anti-bruits, revêtements de chaussées moins bruyants, isolation acoustique des bâtiments).

Entre ces deux axes majeurs, que l'on pourrait qualifier de « source » et de « réception », se dissimule la problématique de la « propagation » acoustique en milieu extérieur. En effet, que ce soit pour la réalisation de cartes de bruit dans le cadre de la directive européenne, ou pour la détermination de l'impact sonore d'une infrastructure de transport dans le cadre de la loi « Bruit », il est nécessaire de recourir à des outils pour modéliser la propagation acoustique, outils basés sur des modèles de référence (*i.e.* modèles de laboratoire) ou sur des modèles d'ingénierie (*i.e.* modèles simplifiés utilisés en

[5] Source : Ministère en charge de l'écologie et du développement durable. Loi codifiée aux articles L.571.1 à L.571.26
[6] Détail du texte sur le site internet Legifrance
[7] Détail du texte sur le site internet Legifrance
[8] Détail du texte sur le site internet

général par des bureaux d'étude). De ce fait, de nombreux travaux de recherche ont porté et portent encore sur le développement d'approches et de modèles qui puissent représenter au mieux les phénomènes rencontrés lors de la propagation acoustique. De nombreuses méthodes ont ainsi été proposées, notamment en milieu extérieur « ouvert » (*i.e.* très faiblement bâti), mais, comme nous le verrons, aucune ne permet de répondre complètement aux exigences imposées concernant la modélisation de l'environnement sonore en milieu urbain (*i.e.* fortement bâti).

## Propagation acoustique en milieu urbain

La modélisation des champs sonores en acoustique urbaine est à l'origine d'un nombre considérable d'études, d'abord initiées dans le cadre de l'acoustique des salles (dès les années 1900), puis étendues plus tardivement au cas de l'acoustique urbaine (à la fin des années 70). Comme nous le verrons au fil de cet article, l'objectif de ces études est de proposer des modèles de prévision acoustique prenant en compte la complexité des phénomènes physiques propagatifs mis en jeu, ou, de manière plus aboutie, permettant de simuler l'acoustique d'un lieu. Dans cette partie, nous proposons d'abord un rappel sur la nature des phénomènes propagatifs rencontrés, puis nous présentons les différentes approches en matière de modélisation de la propagation acoustique.

### *Nature des phénomènes physiques*

Les phénomènes physiques mis en jeu dans le processus de propagation acoustique sont très divers. Se limitant à la problématique du bâtiment), les principaux phénomènes sont les suivants[9] :

- L'**émission acoustique** : une onde acoustique est produite par la vibration d'un objet (source), vibration qui se transmet de proche en proche dans le milieu de propagation (et non par déplacement de matière). Il s'agit donc d'un phénomène vibratoire, résultant d'un mouvement périodique, défini par une fréquence de pulsation. Dans l'air, la vibration se transmet (à une vitesse définie par la célérité acoustique), grâce à un mouvement longitudinal *(i.e.* dans le sens de la propagation) des molécules d'air. Si la fréquence de l'onde est comprise dans la gamme du spectre [20, 20000] Hz, on parle d'onde acoustique audible (onde sonore). On définit également les sons complexes périodiques et les sons complexes non périodiques (bruit), comme des ensembles de vibrations périodiques ou aléatoires, respectivement. Une vibration dans l'air génère donc localement une variation de vitesse des molécules d'air, ainsi qu'une variation de pression : on parle alors de vitesse acoustique et de pression acoustique, principales variables d'une onde sonore. Les ondes acoustiques peuvent également se propager dans des milieux solides (onde sismique par exemple), soit du fait d'une vibration transversale des particules constituant la matière (mouvement des particules perpendiculaire à la direction de propagation), soit du fait d'une vibration longitudinale (comme l'air). Revenant au contexte de notre article, le sujet qui nous intéresse concerne aussi bien la problématique[10] du bruit (onde aérienne) que celle des vibrations (onde solidienne), l'ensemble étant généré par des sources multiples (sources de transport, sources industrielles, sources des activités « humaines »…).

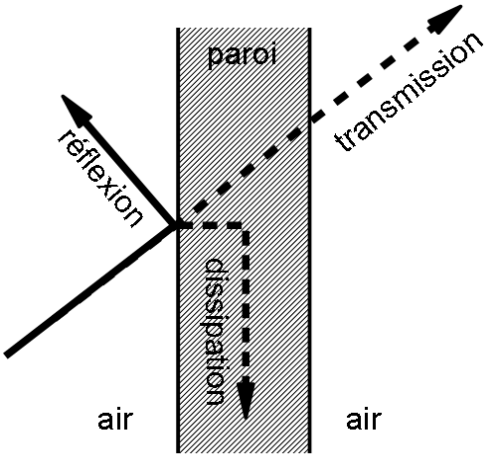
- La **dispersion géométrique** : les caractéristiques initiales d'une onde sonore sont définies par les sources dont elles sont issues. En champ libre, c'est-à-dire dans un domaine de propagation sans obstacle, on considère principalement deux types de source : les sources ponctuelles (un véhicule léger « vu à grande distance » par exemple) définies par un rayonnement sphérique ; et les sources cylindriques (un flot continu de véhicules par exemple) définies par un rayonnement cylindrique. Dans chacun des cas, au fur et à mesure de la propagation acoustique, l'énergie sonore se répartit sur la surface, soit d'une sphère, soit d'un cylindre, centrée sur la source. En s'éloignant de la source (*i.e.* la surface de la sphère ou du cylindre augmentant), on observe une décroissance de l'intensité acoustique, appelée dispersion géométrique, se traduisant par une diminution du niveau sonore par doublement de distance par rapport à la source, de 6 dB pour une onde sphérique, ou de 3 dB pour une onde cylindrique.

[9] Pour une présentation détaillée et accessible de ces phénomènes physiques, le lecteur pourra se reporter au ouvrages suivants : [1-3].

[10] La problématique du bruit aérien est toutefois celle qui est la plus considérée actuellement.

- La **dissipation acoustique** : au cours de son déplacement, l'onde sonore est en partie absorbée par le milieu de propagation, en raison des effets visco-thermiques (dans l'air) ou visco-élastiques (dans un solide).
  - La dissipation des ondes acoustiques dans un milieu solide est fonction des propriétés physiques et mécaniques du matériau constituant le domaine de propagation. Dans la pratique, une « structure » (une paroi, une cloison, une façade, un sol…) est souvent constituée de plusieurs couches de matériaux différents[11], de telle sorte qu'elle favorise ou non le phénomène d'**absorption acoustique** (Figure 1). La capacité de la structure à absorber une onde acoustique est définie par le coefficient d'absorption acoustique (en pression ou en énergie). En pratique, pour des applications en acoustique du bâtiment ou des salles, la mesure du coefficient d'absorption diffère suivant le cas d'application : on parlera ainsi du coefficient d'absorption sous incidence normale (mesure au tube Kundt), ou du coefficient d'absorption en champ diffus (ou coefficient de Sabine) mesuré en salle réverbérante.
  - La dissipation des ondes acoustiques dans l'air est à l'origine du phénomène d'**absorption atmosphérique** l'onde sonore est peu à peu absorbée au cours de sa propagation. Cette absorption augmente avec la fréquence (ce qui explique que les « basses fréquences » se propagent plus loin que les « hautes fréquences »), et varie avec le degré d'hygrométrie et la température de l'air. Ainsi, en général, les ondes sonores se propagent plus loin par temps humide que par temps sec. La capacité de l'air à absorber une onde sonore est définie par le coefficient d'absorption atmosphérique, souvent défini en dB par km (ou par 100 m).
- La **réflexion acoustique** (Figure 1) : ce phénomène intervient en général à l'interface entre deux milieux, le plus souvent l'air et une « structure » (réflexion acoustique par une cloison, une façade, un sol…), et caractérise la part de l'onde acoustique qui est réfléchie par la structure. La réflexion acoustique est définie par le coefficient de réflexion (en pression ou en énergie), complément du coefficient d'absorption (*cf.* ci-dessus). Le coefficient de réflexion dépend donc également des propriétés physiques et mécaniques de la structure considérée et des propriétés de l'air.
- La **transmission acoustique** (Figure 1) : si une structure est à l'interface de part et d'autre avec l'air (une fenêtre, une porte, une cloison…), la part de l'onde qui n'est pas dissipée par le matériau peut également traverser la cloison. Ce phénomène de transmission acoustique est caractérisé par un coefficient de transmission acoustique (en pression ou en énergie), qui dépend là encore des propriétés des matériaux constituant la structure. En acoustique du bâtiment, il est plus courant d'utiliser le coefficient d'affaiblissement (en dB) de la structure ou encore l'une des définitions de l'indice d'affaiblissement ou de l'isolement, au lieu de la définition classique du facteur de transmission.

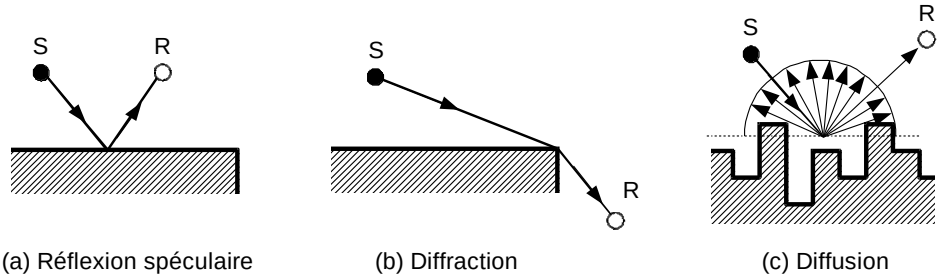
**Figure 1 :** Illustration des phénomènes de réflexion, d'absorption (dissipation) et de transmission acoustique à travers une paroi




[11] La « forme » d'une structure peut également intervenir. C'est le cas par exemple d'un résonateur de Helmholtz (système composé d'une cavité et d'un col, et éventuellement de matériaux absorbants sur les surfaces du résonateur), utilisé en acoustique des salles pour « absorber » certaines fréquences.

- La **diffraction acoustique** (Figure 2b) : ce phénomène se présente lorsqu'une onde sonore rencontre un obstacle de dimension finie ou qui présente des ouvertures. C'est par exemple le cas en présence d'une paroi contenant une ouverture (fenêtre ouverte), ou d'arrêtes verticales ou horizontales sur le bord d'un bâtiment ou d'un écran acoustique. Le phénomène de diffraction est fonction de la longueur d'onde incidente, ainsi que de la forme et des dimensions caractéristiques de l'objet diffractant.

**Figure 2 :** Illustration des phénomènes de réflexion spéculaire, de diffraction par une arête et de diffusion par une surface irrégulière




(a) Réflexion spéculaire (b) Diffraction (c) Diffusion

- La **diffusion acoustique** par des surfaces : la direction des ondes sonores réfléchies dépend de l'état de surface de la surface en question (présence d'irrégularités, de cavité ; parois courbes…). Si la surface est totalement plane, l'onde sonore est réfléchie dans la **direction spéculaire** (Figure 2a). Si la surface est très irrégulière, les effets de réflexion spéculaire et de diffraction acoustique se produisent simultanément générant de la diffusion acoustique (Figure 2c). En effet, si la longueur d'onde est grande devant les irrégularités (Figure 3a), la surface se comporte comme si elle était parfaitement plane. Si la longueur d'onde est de l'ordre de grandeur des irrégularités (Figure 3b), alors il peut y avoir diffraction par l'irrégularité. Enfin, si la longueur d'onde est très petite devant la taille caracté-ristique des irrégularités (Figure 3c), il y a alors réflexion spéculaire sur une surface de l'irrégularité.

En milieu urbain, ce phénomène intervient notamment sur les façades des bâtiments, normalement constituées de nombreuses irrégularités avec parfois une certaine périodicité (fenêtres, pierres de tailles, modénature…) Ainsi, une onde incidente pourra, en fonction de la taille et de la distribution des irrégularités localisées dans la zone active de réflexion (Figure 4a), subir différents phénomènes de réflexion suivant la longueur d'onde et en fonction de la direction d'incidence (Figure 4b).

**Figure 3 :** Diffusion par une surface irrégulière en fonction de la longueur d'onde incidente et de la taille des irrégularités de surface

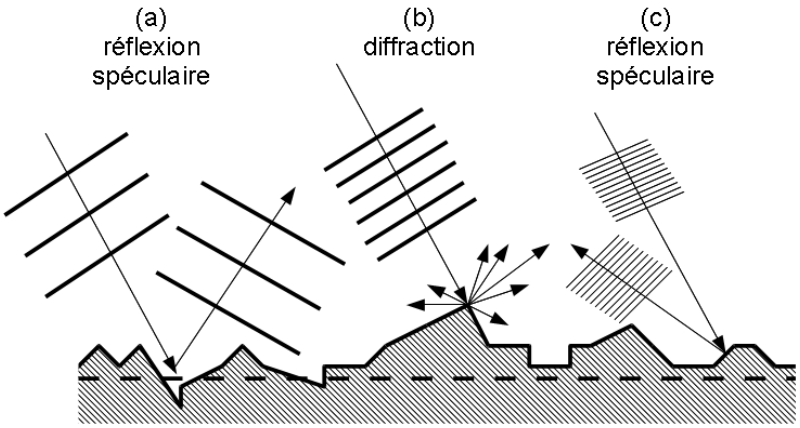
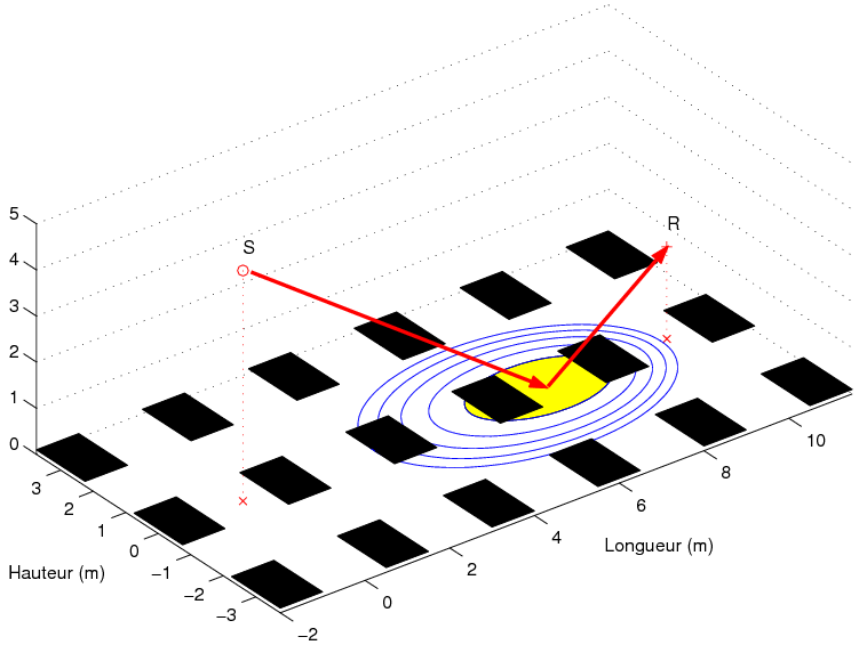
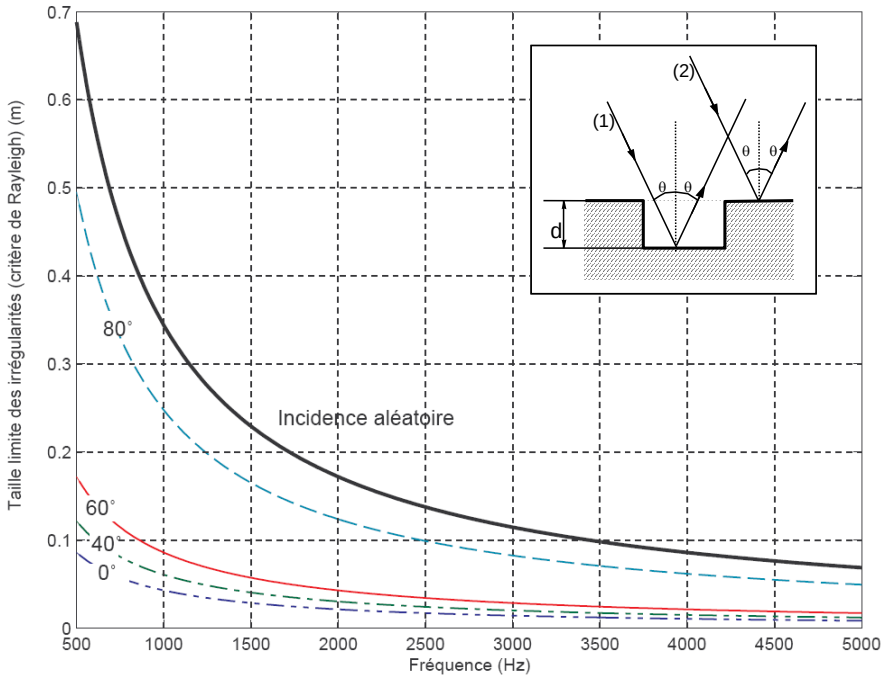


**Figure 4 :** Représentation de la zone active de réflexion d'une façade urbaine et définition de limite entre la réflexion spéculaire et la diffusion

(a) Illustration de la zone active de réflexion (en jaune) d'une façade (principe des zones de Fresnel) en fonction de la position de la source et du récepteur, à 1000 Hz.

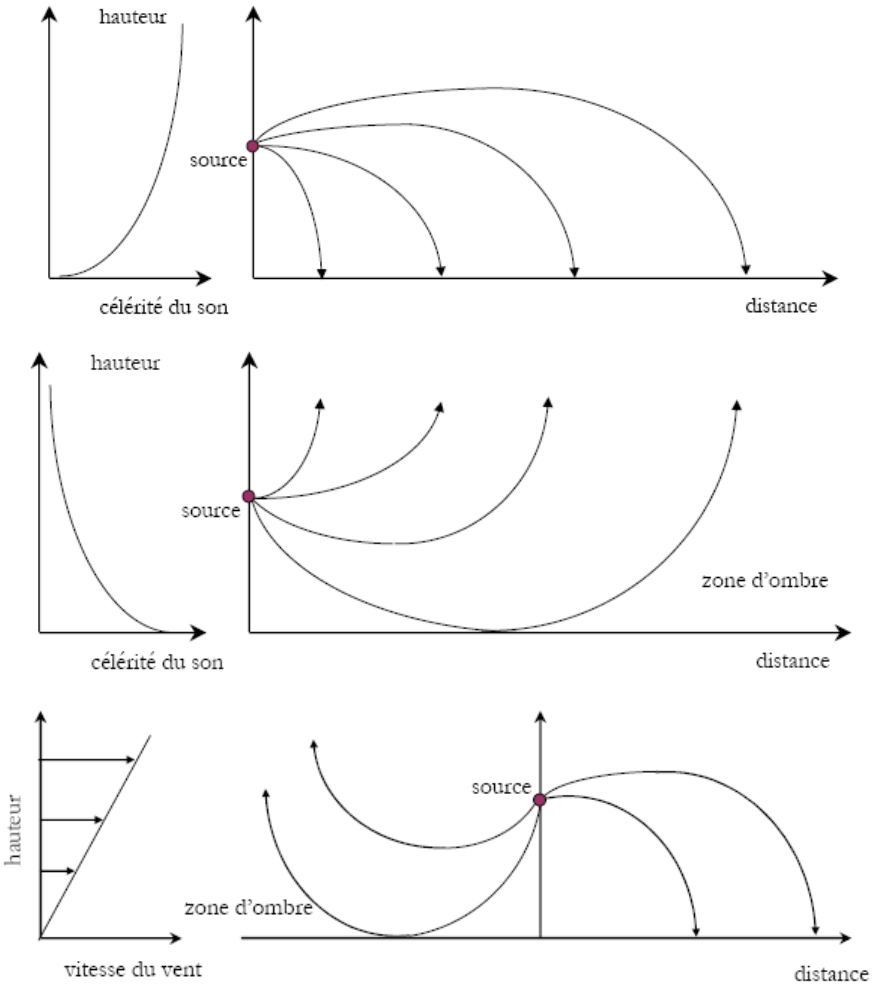



(b) Limite entre réflexion spéculaire et diffusion acoustique (critère de Rayleigh), en fonction de la fréquence de l'onde sonore incidente et de la taille *d* des irrégularités de façade, pour plusieurs angles d'incidence θ (0°, 40°, 60°, 80°) et en incidence aléatoire. La zone située au dessus (respectivement au dessous) d'une courbe correspond à des réflexions diffuses (respectivement spéculaires).



- La **diffusion acoustique** par des objets : si le domaine de propagation est encombré (c'est par exemple le cas en milieu industriel, lorsque qu'un local est rempli de nombreuses machines et caisses disposées sur le sol, ou en milieu urbain avec des voitures en circulation et stationnement ou du mobilier urbain), une onde sonore peut subir des réflexions et diffractions multiples, produisant là encore un processus de diffusion (du même type, par exemple, que la diffusion de la lumière dans le brouillard).
- La **réfraction acoustique** : en milieu extérieur, la propagation acoustique peut être influencée par des conditions micro-météorologiques, régies par des lois thermiques (transfert de chaleur) et aérodynamiques (profils de vent), pouvant par ailleurs donner lieu à une interaction très forte avec le sol (topographie, température de surface et de sous-sol, hygrométrie, cultures, forêts, obstacles, bâti...). Plus précisément, les échanges thermiques entre le sol et la couche basse de l'atmosphère conduisent à une variation de la température de l'air en fonction de la hauteur au dessus du sol, et donc a une variation de la vitesse du son. Par ailleurs, en raison de l'état de rugosité de surface du sol, le vent présente une vitesse plus élevée en hauteur qu'au niveau du sol. Finalement, l'évolution de la célérité du son en fonction de l'altitude génère un phénomène de réfraction acoustique : les ondes sonores sont amenées à avoir des trajets non plus rectilignes, comme ce serait le cas avec des conditions atmosphériques homogènes, mais incurvés, soit vers le sol (gradient de célérité vertical positif, *i.e.* des conditions « favorables » à la propagation), soit vers le ciel (gradient de célérité vertical négatif, *i.e.* des conditions « défavorables » à la propagation).

**Figure 5 :** Illustration des effets de réfraction. De haut en bas : gradient vertical positif de température (sans vent), gradient vertical négatif de température (sans vent), gradient vertical de température (sans effets thermiques)



### *La modélisation de la propagation acoustique*

Dans ce paragraphe, nous citons très succinctement les différentes approches développées pour modéliser la propagation en milieu ouvert, et en particulier en milieu urbain. L'objectif n'est pas ici de faire une liste exhaustive des modèles, mais de montrer les principales limites des approches existantes, souvent soulignées par de nombreux chercheurs, notamment dans le contexte urbain. Pour un état de l'art précis, le lecteur pourra se reporter à des documents de référence, en particulier aux ouvrages de Attenborough *et al* [4], Salomons [5], Ostashev [6] et à l'article de Bérengier *et al* [7], concernant la propagation acoustique en milieu ouvert, ainsi qu'à l'ouvrage de Kang [8] et au mémoire de Picaut [9] concernant la propagation acoustique en milieu urbain.

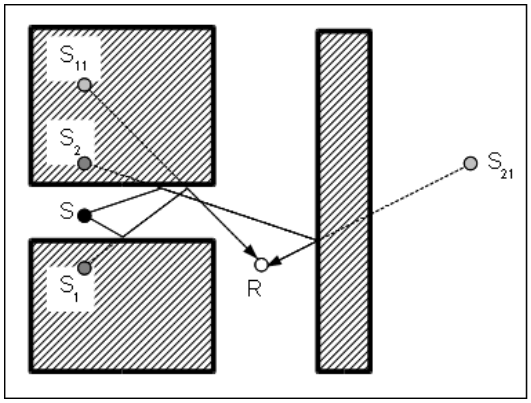
Plusieurs types d'approches ont été développés. Certaines méthodes sont basées sur des concepts énergétiques et éventuellement géométriques, plus simples à mettre en œuvre dans le domaine opérationnel, et pour lesquelles les phénomènes physiques sont simplifiés. À l'inverse, d'autres méthodes reposent sur le caractère ondulatoire de la propagation, avec une modélisation soit dans le domaine fréquentiel, soit dans le domaine temporel. Ces dernières méthodes sont toutefois plus difficiles à mettre en œuvre et leurs utilisations sont en général limitées aux seuls laboratoires de recherche.

#### Méthodes énergétiques et géométriques

La **théorie statistique de la réverbération** (également appelée « théorie de Sabine », ou encore « théorie des champs diffus »), dont les fondements datent des travaux de Sabine [10], est couramment employée en acoustique des salles. Cette méthode énergétique décompose la densité d'énergie totale du champ sonore en deux parties : le champ direct, résultant du rayonnement direct de la source, et le champ réverbéré résultant des multiples réflexions du son sur les parois du domaine. Par construction, la théorie classique de la réverbération impose l'uniformité de la réverbération et l'absence de flux d'énergie dans l'ensemble du milieu de propagation. Autrement dit, l'énergie sonore et la durée de réverbération (décroissance d'énergie au cours du temps) sont uniformes en tout point du domaine étudié. Ces considérations permettent d'exprimer le temps de réverbération et l'énergie du champ réverbéré, sous forme d'expressions analytiques simples, parmi lesquelles les formules de Sabine et d'Eyring bien connues. Malheureusement, cette hypothèse dite de champ diffus n'est pas vérifiée en pratique, dès lors que la forme du milieu de propagation n'est plus homogène (rues, couloirs, locaux plats) et que l'absorption acoustique devient importante et non-uniforme. Par ailleurs, la théorie de la réverbération s'applique très mal aux géométries présentant des ouvertures, et en particulier au cas du milieu urbain. Pour autant, les premières approches en matière de modélisation de la propagation du son en milieu urbain se sont basées sur ce concept de champ diffus, mais les applications sont restées très limitées en raison d'un manque de pertinence flagrant.

La **méthode des sources-images** [10], issue de l'acoustique géométrique, permet de calculer la densité d'énergie sonore dans un milieu de forme complexe, en se basant sur une analogie avec les rayons lumineux (Figure 6). Il s'agit là encore d'une approche énergétique, fondée sur la construction de sources virtuelles, images de sources réelles, simulant l'effet des réflexions successives de l'énergie sonore sur les parois de l'enceinte. La contribution énergétique de chaque source-image en un point donné est celle habituellement rencontrée dans le cas de la propagation en champ libre, pondérée par le coefficient d'absorption des parois considérées. Cette approche, principalement numérique qui est employée dans certains outils du commerce comme CadnaA®, est néanmoins réductrice dans la mesure où les réflexions sur les parois du domaine sont traitées intégralement de manière spéculaire (angle de réflexion égal à l'angle d'incidence), alors que de nombreux auteurs ont montré l'importance des effets des réflexions diffuses dans le calcul du champ sonore et dans les procédures liées à l'auralisation [11], en acoustique architecturale comme en acoustique urbaine.

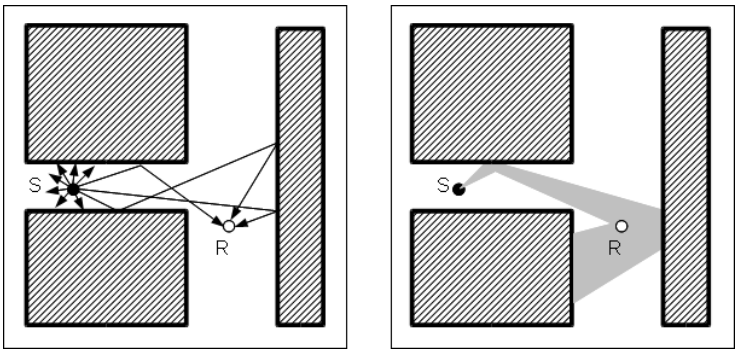
**Figure 6 :** Illustration de méthodes des sources-images (représentation de la source réelle S et des sources-images d'ordre 1 et 2)




La **méthode du tracé de rayons** [12], très démocratisée, a donné naissance à de nombreux logiciels commerciaux de prévision du champ sonore en milieu extérieur et notamment pour la réalisation de cartes de bruit (Mithra® et Mithra-SIG®, SoundPLAN®…). Cette approche énergétique, reposant également sur les hypothèses de l'acoustique géométrique, suppose que l'énergie sonore est distribuée sur un certain nombre de rayons rectilignes émis à partir d'une source sonore et déviés lors de leur rencontre avec les parois du milieu de propagation (Figure 7). Le calcul de l'énergie sonore au niveau d'un volume récepteur est réalisé par comptage du nombre de rayons qui le traversent. Le problème majeur réside dans la définition de la taille de ce volume, le plus souvent une sphère. En effet, il doit être représentatif d'un récepteur réel mais doit également permettre de comptabiliser suffisamment de rayons sonores pour déterminer le niveau d'énergie de manière précise, ce qui en pratique nécessite de tirer un grand nombre de rayons sonores, et ce d'autant plus que le milieu de propagation est de forme complexe et constitué de volumes « couplés ». Pour tenter de résoudre ce problème, le logiciel Mithra utilise par exemple une méthode de tracé de rayons « inverse », qui part du récepteur vers la source. Le tracé de rayons inverse peut cependant échouer dans certaines configurations. La notion de « rayons sonores » a également été étendue pour donner naissances à des méthodes de tracé de faisceaux sonores [13] (Figure 7) ou de particules sonores [14].

Au-delà de ces méthodes « classiques » qui ont donné lieu à la plupart des outils actuels de prévision des niveaux sonores en acoustique architecturale et urbaine, on peut également citer d'autres méthodes plus complexes, comme des **méthodes statistiques** basées sur des équations de transport ou de diffusion de l'énergie sonore [9], ou encore les **méthodes de radiosité** fondées sur une analogie avec l'éclairage [8], voire des **méthodes hybrides** résultant du couplage de plusieurs méthodes entre elles (tracé de rayons et sources-images, ou tracé de rayons et radiosité par exemple)… Néanmoins, dans la plupart des cas, ces méthodes sont trop complexes à mettre en œuvre et cumulent les limitations propres à chaque modèle.

**Figure 7 :** Illustration de méthodes des rayons (à gauche) et des faisceaux sonores (à droite)

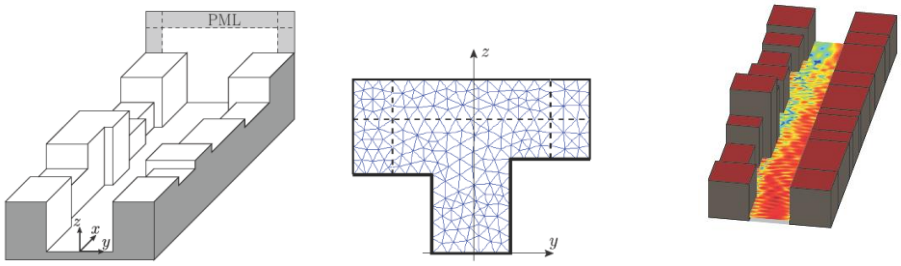


**Méthodes « ondulatoires » fréquentielles**

Comme nous l'avons présenté précédemment, la propagation acoustique en milieu extérieur est soumise à de nombreux phénomènes propagatifs définis par un comportement ondulatoire (*i.e.* relation de phase entre les composantes du champ sonore). Il est bien connu que les effets de sol (impédances homogènes et discontinues), les effets de réflexion acoustique sur les objets (bâti, sol, mobilier urbain…), les effets de diffraction par les arêtes des obstacles (bâti) ou les irrégularités de surface (façades), les effets météorologiques (gradient de célérité du son, turbulences atmosphériques) interagissent les uns avec les autres. Ces interférences génèrent une distribution du champ sonore qui ne peut pas, en principe, être modélisée par une approche énergétique ou géométrique, mais qui nécessite des approches ondulatoires. En évoquant la notion d'approche ondulatoire, il vient immédiatement à l'esprit l'**équation d'onde dans le domaine temporel** ou **l'équation d'Helmholtz dans le domaine fréquentiel**. Toutefois, la résolution analytique directe de ces équations, dans des domaines de propagation aussi complexes qu'en milieu extérieur, n'est évidemment pas possible, et a laissé place à des méthodes numériques fréquentielles et temporelles.

Une approche alternative a été récemment proposée par Pelat [15], pour modéliser la propagation du son en milieu dans une rue, en se basant sur une **formulation multimodale de la propagation acoustique**, elle-même inspirée de la théorie des « guides d'onde ». Le principe de base de cette méthode consiste à considérer la rue comme un guide d'ondes ouvert par le haut (Figure 8). La pression acoustique dans le plan vertical d'émission acoustique est d'abord obtenue par une méthode numérique classique FEM (cf. ci-après), tandis que le champ sonore résultant est ensuite propagé dans la rue en introduisant les modes propres et valeurs propres numériques obtenus dans une formulation multimodale classique. Cette approche très prometteuse permettrait ainsi de modéliser la propagation acoustique dans des cas complexes (rues de section variable, façade avec prise en compte de modèles d'impédance, profils de célérité acoustique).

**Figure 8 :** Approche mixte FEM-modale de la propagation acoustique [15]




La **méthode des éléments finis** (FEM) consiste par exemple à résoudre l'équation de propagation des ondes acoustiques (équation de Helmholtz) exprimée sous sa forme discrète en subdivisant les dimensions spatiales et le temps en « éléments » [16]. La **méthode des éléments de frontière** (BEM) repose quant à elle sur la résolution de l'équation intégrale des problèmes aux limites [17]. Les effets de la topographie du site, et la présence d'un sol d'épaisseur finie avec des discontinuités d'impédance ou d'éventuels écrans anti-bruits, peuvent être pris en compte. Ces approches ne sont pas limitées en soi à la modélisation dans le domaine fréquentiel, mais le coût numérique d'une dépendance temporelle les rend rapidement inexploitables. Ces méthodes sont néanmoins bien adaptées pour étudier la propagation acoustique dans des milieux de géométries complexes car elles permettent de modéliser la majorité des phénomènes propagatifs, hormis les effets des hétérogénéités de l'atmosphère.

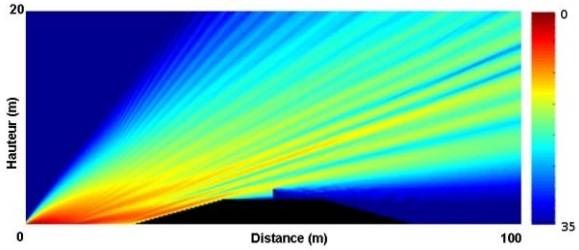



**Figure 9 :** Approche fréquentielle basée sur l'équation parabolique : propagation au dessus d'un site non-plan, en présence d'un écran acoustique et en milieu hétérogène (source B. Gauvreau, IFSTTAR)

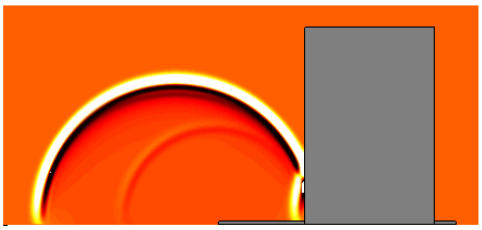
Les **méthodes basées sur l'équation parabolique** (PE) ont également été largement employées pour la modélisation de la propagation acoustique en milieu extérieur 2D dans une atmosphère en mouvement turbulent, et présentant des topographies et des géométries complexes [5] (Figure 9). Cette méthode est toutefois valable uniquement en champ lointain, pour de faibles angles d'ouverture de la source. Il faut préciser que de nouveaux travaux ont permis de lever une limitation majeure de cette approche, à savoir l'absence de prise en compte de la rétro-propagation des ondes sonores, ce qui en interdisait l'utilisation en milieu « diffus » comme le milieu urbain (*i.e.* les ondes sonores arrivent simultanément de toutes les directions en raison des nombreuses réflexions). Les travaux récents de Lihoreau ont ainsi permis d'étendre l'approche grâce à une reformulation des équations de base de l'approche, et ce, en 3D [18].

Globalement, les méthodes « fréquentielles » que nous venons de présenter, bien que considérées encore aujourd'hui comme des approches de référence, sont limitées par des considérations numériques, ce qui les restreint à des applications en deux dimensions, mono-fréquentielles (*i.e.* un calcul par fréquence), et « basses-fréquences » du fait d'une résolution spatiale très (trop) fine en plus haute fréquence par rapport aux distances de propagation considérées. Par ailleurs, les approches utilisées ne permettent pas d'avoir une description temporelle de la propagation acoustique. Or, si on se replace dans un contexte de prévision du bruit en milieu extérieur, les nuisances sonores sont souvent perçues à travers des notions d'émergence d'une source sonore par rapport au bruit de fond ambiant, émergence souvent liée au caractère mobile et dynamique des sources. Par ailleurs, des travaux récents sur la problématique des indicateurs de gêne en milieu urbain, ont bien montré la nécessité de disposer d'indicateurs dynamiques, liés aux fluctuations temporelles du trafic routier [19].

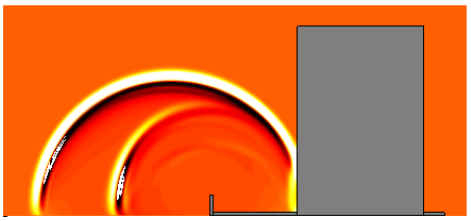
Enfin, pour être complet, les conditions météorologiques comme les effets de sol fluctuent également dans le temps, à des échelles de temps toutefois différentes. Ces fluctuations « naturelles » sont à la l'origine d'une très grande fluctuation et variabilité des niveaux sonores notamment à longue distance et probablement en milieu urbain. Depuis maintenant quelques années, les efforts des chercheurs se sont donc orientés vers une nouvelle génération de modèles de référence, basée sur une résolution temporelle des phénomènes propagatifs.

**Figure 10 :** Approche temporelle par la méthode TLM de la propagation acoustique : représentation d'un front d'onde (à un instant t) avec et sans écran acoustique à proximité d'un bâtiment réfléchissant

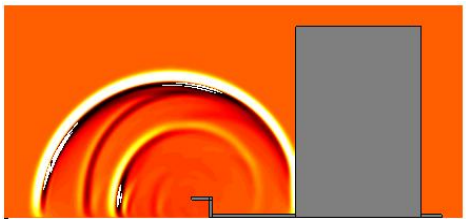
(a) sans écran, surfaces réfléchissantes



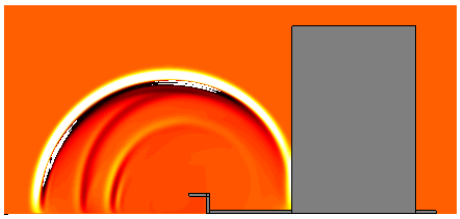
(b) avec écran droit réfléchissant



(c) avec écran en « L » réfléchissant



(d) avec écran en « L » absorbant (végétalisé)



**Méthodes « ondulatoires » temporelles**

À la différence des méthodes fréquentielles, les méthodes temporelles sont évidemment particulièrement adaptées à la modélisation de la propagation du son dans des milieux variant dans le temps. À titre d'exemple, la méthode des différences finies dans le domaine temporel (FDTD) appliquée aux équations d'Euler linéarisées a fait l'objet de nombreux travaux et permet de tenir compte de l'ensemble des phénomènes propagatifs cités

auparavant concernant la propagation du son en milieu extérieur [20]. Quelques applications en acoustique urbaine ont également été proposées en FDTD, comme l'étude de l'effet du vent sur la propagation du son en milieu urbain idéalisé. D'autres se sont intéressés à la propagation du son au-dessus de toits végétalisés. Comme toutes les méthodes temporelles, la FDTD reste également limitée par le coût numérique, du fait du compromis entre la finesse du pas spatial, du pas temporel et des distances de propagation considérées en milieu extérieur. Des algorithmes optimisés permettent toutefois de minimiser ce coût en considérant des schémas aux différences finies d'ordre élevé.

Plus récemment, quelques auteurs ont proposé une méthode temporelle alternative et originale, la **méthode des lignes de transmission** (TLM) [21] (Figure 10). Cette méthode numérique, basée sur une représentation discrète des phénomènes ondulatoires, semble particulièrement adaptée à la modélisation de la propagation du son dans des milieux hétérogènes, de topographies et de géométries complexes, et permettrait, comme le montrent de récents travaux, de prendre en compte la plupart des phénomènes influant sur la propagation acoustique en milieu extérieur.

**Approches opérationnelles**

Revenant au contexte réglementaire dont nous avons parlé plus haut, à savoir la réalisation de cartes de bruit ou encore la mise en évidence de points noirs « bruit », il a bien fallu, à un moment donné, faire le choix d'une méthode dite opérationnelle. Pour des raisons historiques (les approches de base de ces méthodes opérationnelles ont été choisies dès la fin des années 80), et aujourd'hui encore pour des raisons pratiques (utilisation de modèles simples à destination de bureaux d'étude, limitation des durées de calcul…), l'utilisation de méthodes fréquentielles et encore moins temporelles, a été complètement « bannie » des approches opérationnelles, au profit de méthodes énergétiques basées sur le concept de rayon sonore, dont nous avons parlé plus haut.

Ainsi, en France, le calcul est basé sur la Nouvelle Méthode de Prévision du Bruit (NMPB, NF S31-133) [22], qui présente quelques similitudes avec la norme internationale ISO 9613-2. Bien qu'initialement développée pour fournir une méthode de calcul de la propagation du bruit routier en milieu extérieur relativement ouvert (faible densité de bâtiments), ces méthodes sont également utilisées pour la prévision acoustique en milieu urbain, donc présentant une forte densité de bâtiments. Cette extension est toutefois discutable compte-tenu de la spécificité de certains phénomènes en milieu urbain (effets météorologiques par exemple).

Par construction, ces méthodes reposent sur les notions de rayons sonores et de sources-images telles qu'elles ont été décrites plus haut. Il s'agit donc essentiellement de méthodes énergétiques et géométriques, applicables en trois dimensions, mais bien souvent limitées à 2 dimensions. Il est important de préciser que ces méthodes n'intègrent pas de dépendance temporelle : les niveaux sonores sont calculés pour des sources sonores en régime établi ou permanent. Sans rentrer dans les détails, ces méthodes permettent de prendre en compte le rayonnement direct entre la source sonore et le récepteur, lorsque celui-ci existe, les trajets réfléchis sur des parois planes verticales, en considérant l'hypothèse de réflexion spéculaire, les trajets diffractés par les arêtes horizontales et verticales. Pour chacun des trajets, il faut alors considérer la divergence géométrique, l'absorption atmosphérique, les effets de sol, résultant de l'interférence entre l'onde sonore réfléchie par la surface du sol et le rayonnement direct, et fonction de la nature plus ou moins absorbante des sols. Enfin, et de manière à prendre en compte les effets météorologiques sur la propagation du son, la NMPB calcule un niveau sonore de long terme pour chaque trajet à partir d'un calcul en conditions homogènes et un calcul en conditions « favorables ».

## Perspectives de recherche

### *Quelle influence de la micro-météorologie sur les prévisions acoustiques en zones urbaines ?*

Comme nous venons juste de le faire remarquer, les méthodes actuelles pour la prévision du bruit en milieu urbain ou pour la cartographie sonore en zones urbaines reposent sur les mêmes principes que ceux utilisés en zones périurbaines (méthode NMPB par exemple). Ainsi, certains effets météorologiques observés en champ libre (sans obstacle) ont été intégrés dans la plupart de ces approches opérationnelles, notamment sous forme d'un profil vertical de célérité.

Cependant, les effets micro-météorologiques en milieu urbain sont très différents de ceux rencontrés en milieu ouvert ou faiblement bâti. La pertinence des approches classiques est donc discutable : il est nécessaire aujourd'hui d'évaluer l'influence réelle des effets micro-météorologiques sur la propagation acoustique spécifiquement en milieu urbain. Cette étude[12] pourra d'abord être envisagée à partir de campagnes expérimentales mêlant des mesures acoustiques et micro-météorologiques simul-tanées, en laboratoire et sur site, afin d'estimer l'importance des différents effets micro-météorologiques spécifiques au milieu urbain (thermique, aérodynamique). Ce travail permettra alors d'évaluer la nécessité d'intégrer ou non ces effets spécifiques dans les méthodes de calcul actuelles. Si les effets observés sont importants, il sera sans-doute nécessaire d'intégrer des modèles météorologiques, comme ceux développés par Météo-France, directement dans les outils de modélisation acoustique, en considérant par ailleurs les fluctuations temporelles à différentes échelles[13]. Le couplage de modèles acoustiques et météorologiques élaborés semble effectivement la solution la plus pertinente. En raison de l'augmentation des ressources numériques nécessaires à ce type d'approche, il est probable que son utilisation se limitera dans un premier temps aux seuls laboratoires de recherche.

**Figure 11a :** Campagne de mesure acoustique et météo, sur maquette, pour l'évaluation des effets météorologiques sur la propagation acoustique dans une rue (projet EM2PAU, IFSTTAR)

[12] Une étude expérimentale, financée par la Région des Pays de La Loire, est actuellement en cours sur ce sujet (collaboration IFSTTAR, Université du Maine, École Centrale de Nantes).

[13] Des travaux de ce type sont actuellement en cours à l'IFSTTAR, en collaboration avec le Centre National de Recherches Météorologiques de Météo-France (CNRM), et proposent d'intégrer un modèle micro-météorologique dans l'approche acoustique TLM.

## *Végétation et végétalisation : quel impact sur la propagation acoustique en milieu urbain ?*

Les réflexions actuelles concernant les questions environnementales et énergétiques mèneront dans le futur à des aménagements urbains ou interurbains qui feront une part importante à la végétation et à la végétalisation. Les exemples de la plupart des projets récemment proposés pour quelques grandes « villes de demain » en sont une illustration éloquente, tant au niveau paysager (parcs, etc.) qu'urbanistique (façades et toitures végétalisées, etc.). Cependant, l'influence de la végétation sur la propagation acoustique (propagation en milieu boisé, en présence de toitures ou façades végétalisées, par exemple) est actuellement très mal connue. Comme pour les effets météorologiques, il semble là encore important de déterminer cette influence, afin d'en évaluer l'utilisation qui pourrait être faite de ce type d'aménagement pour réduire les nuisances sonores en milieu urbain (développement de protections végétalisées innovantes). Des travaux de recherche se sont d'ailleurs engagés très récemment sur ce sujet (projet ANR Veg-DUD pîloté par l'IRSTV[14], projet européen HOSANNA auquel contribue le CSTB[15]). En complément, une réflexion plus générale sur la notion de « zones calmes », souvent associées à des espaces végétalisés (parcs en centre-ville), devra être en menée.

**Figure 11b :** Exemple de toiture végétalisée en milieu urbain (Chicago City Hall Green Roof, auteur : TonyTheTiger, licence : GFDL/CC-by-sa-3.0°

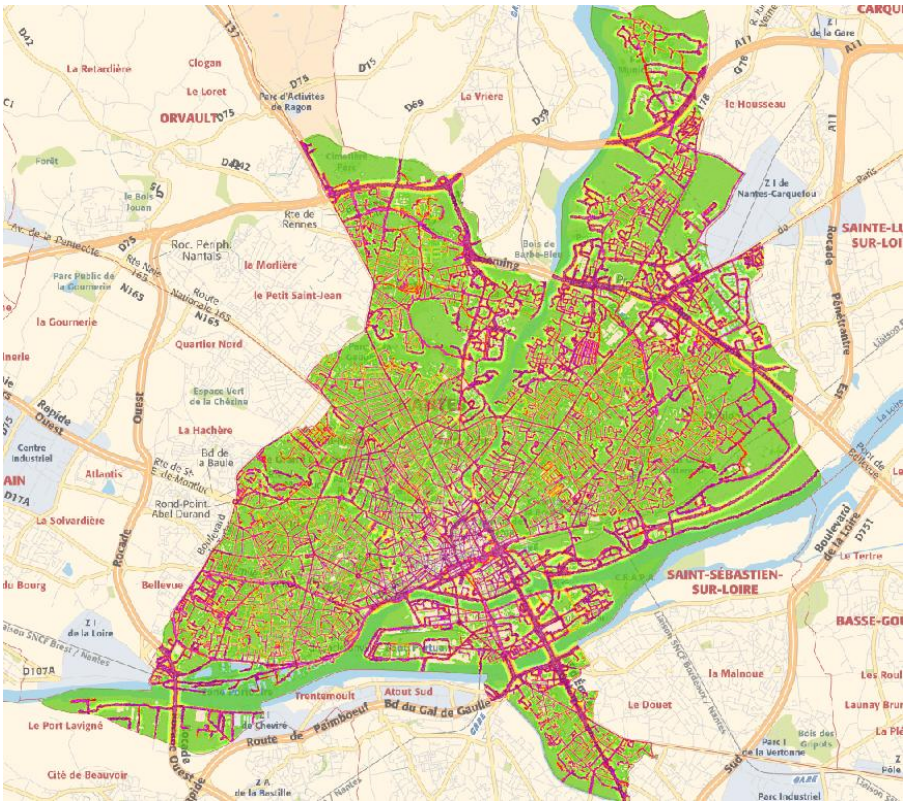
[14] Institut de Recherche en Sciences et Techniques de la Ville, FR CNRS 2488.

[15] Centre Scientifique et Technique du Bâtiment.

### *Impacts sur le bruit des stratégies de déplacement en milieu urbain*

La mobilité est au cœur des enjeux pour rendre les villes durables, aussi bien d'un point de vue économique et social, qu'environnemental. Les déplacements urbains sont une des sources majeures de pollution, sous forme de rejets de gaz à effets de serre, mais également sous forme de nuisances sonores. Concernant ce dernier aspect, la cartographie sonore des villes, telle qu'elle est préconisée par la directive européenne 2002/49/CE, peut apporter un début de réponse, à un instant donné. Dès lors qu'il s'agit de tester différents scénarii de plans de déplacement urbain (PDU), avec une prise en compte plus précise des différents moyens de transports (véhicules légers, bus, tramways, deux-roues motorisés…) et des trafics associés, les méthodes de calculs actuelles ne sont plus adaptées, notamment en raison des temps de calcul que cela supposerait, et d'une prise en compte des trafics peu réaliste. Deux axes de recherche peuvent être envisagés simultanément. Il conviendrait tout d'abord de développer des approches opérationnelles plus rapides à mettre en œuvre afin de pouvoir tester plusieurs scénarii d'un projet. Ce travail peut consister à simplifier les approches existantes, au détriment toutefois de la qualité des résultats[16]. Toutefois, la solution d'avenir consiste certainement à développer de nouvelles approches, plus pertinentes, couplant des modèles dynamiques de trafic à des modèles acoustiques temporels (énergétiques, ondula-toires). C'est d'ailleurs dans cette voie que se sont engagés ensemble plusieurs laboratoires dans le cadre du projet de recherche CITEDYNE, pîloté par le CSTB.

**Figure 12 :** Réalisation d'une carte de bruit par une approche simplifiée (champ direct et champ réfléchi à l'ordre 1) sur la commune de Nantes (65x10$^6$ m², 1.7 millions de points de calcul, 346 millions de points sources, durée du calcul : 1h20) - Projet ARN Eval-DPU (IRSTV)




[16] Ce type d'approche est actuellement envisagé dans le cadre du projet ANR Eval-PDU pluridisciplinaire sur l'évaluation des plans de déplacement urbains, piloté par l'IRSTV. Concernant la problématique acoustique, le travail porte plus spécifiquement sur le développement d'un outil de simulation acoustique sous SIG, couplé à un modèle de trafic stationnaire.

### *De la prévision du niveau de bruit équivalent à la simulation de l'environnement sonore*

Le contexte réglementaire dont nous avons déjà parlé à plusieurs reprises, incite essentiellement à la détermination ou à la mesure de niveaux sonores, au travers d'indicateurs réglementaires (*i.e.* des indicateurs dits « objectifs »). Or, la perception de la qualité de l'environnement sonore (ou du confort sonore, ou de l'ambiance sonore, ou à l'inverse de la gêne sonore) ne se limite pas à la seule observation d'un niveau sonore. Il est aujourd'hui devenu indispensable de produire des outils qui permettent d'aller jusqu'à une prévision de la qualité de l'environnement sonore. Deux axes sont envisageables. Le premier, qui fait déjà l'objet de travaux depuis plusieurs années, consiste à développer de nouveaux indicateurs, proposant une corrélation plus pertinente avec la notion de qualité ou de gêne. Ce travail passe par la réalisation d'études mêlant des questionnaires d'enquête, et des écoutes en laboratoires, afin de contribuer au développement d'indicateurs objectifs. Le second axe, novateur tout en restant dans l'esprit des évolutions technologiques récentes, consisterait à développer des outils de modélisation numérique permettant de simuler l'environnement sonore d'un lieu[17], et d'en modifier les différentes composantes. Des développements de cette nature ont déjà été réalisés en s'appuyant sur les méthodes de tracés de rayons. L'avenir repose certainement sur l'utilisation de modèles temporels ondulatoires (tel que la TLM, intrinsèquement adaptée à la simulation de l'environnement sonore), là encore, associés à des modèles de sources sonores dynamiques.

### *De la propagation aérienne du bruit des transports au problème vibratoire*

Les nuisances sonores (bruit aérien) sont clairement celles citées en premier lieu dans tous les sondages et enquêtes récentes. Pour autant, depuis maintenant quelques années, la problématique des nuisances vibratoires (associées aux « véhicules de transports ») est pointée du doigt, notamment en raison de l'évolution des modes de transports urbains laissant de plus en plus de place aux véhicules « lourds » (bus, tramway, tram-bus, etc., en plus du « traditionnel » métro) guidés ou non. La source de gêne étant unique, il conviendrait de proposer des modèles de sources (bruit aérien et vibration) plus globaux.

### *De l'extérieur à l'intérieur des bâtiments, et réciproquement*

Dans le même esprit « d'approche globale » que nous venons d'évoquer pour mêler bruit aérien et vibration, il conviendrait également de proposer une approche globale à l'échelle de la problématique « environnementale ». En effet, historiquement, les outils de prévision acoustique ont été développés à trois échelles différentes (la ville, le bâtiment, un local), avec des approches différentes. Ainsi, dans un premier temps, la détermination des niveaux sonores en façade d'un bâtiment nécessitera l'utilisation d'un outil d'acoustique environne-mentale, prenant en compte la nature du trafic routier, le bâti, la topographie, la météorologie… Dans un second temps, la prévision à l'intérieur même du bâtiment nécessitera un calcul d'acoustique du bâtiment, intégrant la multiplicité des sources de bruit internes et externes, la nature des matériaux de construction… S'il s'agit en plus d'un bâtiment abritant une salle nécessitant des qualités acoustiques spécifiques (salle de spectacle, salle de cours…), le recours à un outil d'acoustique des salles sera indispensable. Ce choix d'échelle est évidemment arbitraire et peu réaliste, dans la mesure où les nuisances sonores ne « connaissent » pas ces limites d'échelle, et que la gêne ou la qualité sonore peut être aussi bien perçue à travers des sources de bruit venant simultanément de l'intérieur ou de l'extérieur d'un domaine. Il est désormais indispensable de proposer des approches globales de prévision du bruit, intégrant la « transmission » acoustique intérieur-extérieur d'un bâtiment. Ce travail peut être envisagé soit en développant effectivement un modèle global (comme cela pourrait être le cas avec une approche ondulatoire), soit en couplant de manière opérationnelle des approches spécifiques existantes.

## Conclusion

Durant cette dernière décennie, les outils de prévision dans le domaine de l'acoustique environnementale ont évolué de manière considérable, en parallèle à l'amélioration des connaissances sur les phénomènes physiques mis en jeu dans le processus de propagation acoustique. Même si de nombreux objets sont encore à l'étude (météorologie urbaine,

[17] Ce type d'approche est déjà proposé en acoustique des salles pour évaluer la qualité acoustique d'une salle de spectacle (auralisation [11]). Toutefois, dans le domaine de l'acoustique environnementale, compte tenu de la nature des sources (multiples, dynamiques et mobiles) et de l'échelle spatiale considérée, cette approche « acoustique des salles » ne semble pas pertinente pour répondre à la problématique posée.

végétalisation, propagation acoustique au-dessus d'une étendue d'eau…), la tendance des approches est à la globalisation et à la généralisation, à savoir le développement d'outils couplant des modèles météorologiques, des modèles dynamiques de trafic, des modèles temporels de propagation acoustique, l'ensemble permettant soit de produire des indicateurs acoustiques corrélés aux notions de qualité de l'environnement sonore ou de gêne, soit de simuler l'environnement sonore. Par ailleurs, et notamment en milieu urbain, le « bruit » est de plus en plus considéré comme une composante de « confort » parmi d'autres, comme le confort thermique dans le bâtiment, la pollution de l'air (émission de polluants par les véhicules) dans les rues, la mobilité à l'échelle de la ville… En résumé, l'avenir des recherches en matière d'acoustique urbaine passe par l'utilisation intensive des Sciences et Technologies de l'Information et de la Communication, à travers le calcul intensif, les approches multi-modèles et le développement de simulations réalistes, avec un objectif, la modélisation numérique de la ville, et un point commun, la ville numérique.

## Bibliographie


[1] Fischetti A.
Initiation à l'acoustique
*Éditions Belin, Collection Sup Sciences - Septembre 2009*

[2] Hamayon L.
Comprendre simplement l'acoustique des bâtiments
*Éditions du Moniteur - Seconde édition, Novembre 2010*

[3] Navi P.
Propriétés acoustiques des matériaux
*Presses polytechniques et universitaires romandes – 2006*

[4] Attenborough K., Li M.K., Horoshenkov K.
Predicting Outdoor Sound
*Spon Press Edition - Août 2006*

[5] Salomons E. M.
Computational Atmospheric Acoustics
*Kluwer Academic Publishers - Novembre 2001*

[6] Ostashev V., Attenborough K.
Acoustics in Moving Inhomogeneous Media
*Spon Press Edition - Décembre 1997*

[7] Bérengier M.
Propagation acoustique à grande distance : effets de sol et effets météorologiques
*Techniques de l'Ingénieur - Avril 2009*

[8] Kang J.
Urban Sound Environment
*Spon Press Edition - Septembre 2006*

[9] Picaut J.
Mémoire d'Habilitation à Diriger des Recherches
*Université du Maine - Novembre 2006*

[10] Kuttruff H.
Room Acoustics
*Taylor & Francis Ltd - Mai 2009*

[11] Vorländer M.
Auralization
*Springer - Octobre 2007*

[12] Kulowski A.
Algorithmic representation of the ray tracing technique
*Applied Acoustics - Vol. 18, 1985, pp. 449-469*

[13] Tsingos N.
Simulation de champs sonores de haute qualité pour des applications graphiques interactives
*Thèse de doctorat de l'Université Joseph Fourier - Décembre 1998*

[14] Picaut J.
Application numérique du concept de particules sonores à la modélisation des champs sonores en acoustique architecturale
*Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées*
*Vol. 258-259, Octobre-Novembre-Décembre 2005, pp. 59-88*

[15] Pelat A.
Approche modale de la propagation acoustique dans les guides d'ondes ouverts
*Thèse de doctorat de l'Université du Maine - Décembre 2009*

[16] Marburg S., Nolte B., Nolte M.
Computational Acoustics of Noise Propagation in Fluids - Finite and Boundary Element Methods
*Springer-Verlag Berlin and Heidelberg GmbH & Co. K - Mars 2008*

[17] Ciskowski R.D., Brebbia C.A.
Boundary element methods in acoustics
*Computational Mechanics Publication, Elsevier Applied Science – 1991*

[18] Lihoreau B.
A 3D parabolic equation code for street canyon propagation
*Proceedings of Euronoise 2009 - Octobre 2009*

[19] Can A.
Thèse de doctorat de l'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon
*Représentation du trafic et caractérisation dynamique du bruit en milieu urbain - Décembre 2008*

[20] Salomons E.M., Blumrich R., Heimann D.
Eulerian time-domain model for sound propagation over a finite-impedance ground surface comparison with frequency-domain models
*Acta Acustica united with Acustica - Vol. 88, 2002, pp. 483-492*

[21] Guillaume G.
Application de la méthode TLM à la modélisation de la propagation acoustique en milieu urbain
*Thèse de doctorat de l'Université du Maine - Octobre 2009*

[22] Association Française de Normalisation
NF S 31-133 : Acoustique - Bruit dans l'environnement - Calcul de niveaux sonores
*AFNOR Éditions - Février 2011*

# - B -

## Représentations et dynamiques spatiales

# Vers une cartographie sémantique des modèles urbains : des individus aux systèmes de villes

Arnaud Banos et Lena Sanders
UMR Géographie-cités

**Les modèles portant sur la dynamique des espaces urbains du point de vue des phénomènes sociaux qui s'y déroulent sont nombreux et variés, tant dans les objets thématiques qu'ils visent à représenter et expliquer, que dans les concepts mobilisés et la formalisation choisie. Aussi, plutôt que de rechercher l'exhaustivité, l'objectif est de proposer une grille de lecture qui donne un aperçu, dans une perspective comparative, des types de modèles qui existent dans ce champ et des échelles qu'ils concernent. Cette grille est issue du croisement de deux dimensions : (1) l'une relative à l'appréhension du phénomène empirique qu'il s'agit de modéliser à travers le niveau d'abstraction choisi, phénomène particulier ou fait stylisé ; (2) l'autre au dispositif que le modélisateur met en place pour y parvenir, à travers le niveau de simplification du modèle, KISS ou KIDS. Le croisement de ces deux dimensions produit quatre cas de référence qui sont utilisés pour présenter trois grandes familles de modèles développés en géographie urbaine, chacune correspondant à un niveau géographique différent, celui des individus, de l'espace intraurbain, et du système interurbain.**

## Introduction

Les modèles portant sur la dynamique des espaces urbains du point de vue des phénomènes économiques et sociaux qui s'y déroulent sont nombreux et variés, tant dans les objets thématiques qu'ils visent à représenter et expliquer, que dans les concepts mobilisés et les formalisations choisies. Aussi, loin de viser l'exhaustivité, nous avons choisi d'une part de nous concentrer sur les modèles dynamiques et d'autre part de proposer une grille de lecture qui permette de donner un aperçu des différents types de modèles qui existent dans ce champ. Avant de présenter cette grille, nous exposons les objets et les échelles auxquelles s'intéressent les modélisateurs en géographie urbaine et les questionnements associés.

On peut distinguer (en simplifiant) quatre familles d'objets géographiques, correspondant chacune à un niveau d'observation :

- les individus, qui pratiquent l'espace urbain au quotidien, s'y déplacent, migrent, correspondent au niveau *micro-géographique* ;
- les unités spatiales composant la ville (îlots, quartiers), forment le niveau *méso-géographique* dans une perspective intra-urbaine ; on s'intéresse aux configurations de l'espace urbain, à l'existence de ségrégation spatiale, à l'évolution de ces formes spatiales, au jeu des échanges entre les différentes unités spatiales de la ville, à la dynamique du système spatial qu'elles forment ;
- les villes d'une région, d'un pays, forment le niveau méso-géographique dans une perspective inter-urbaine : on s'intéresse alors aux différenciations entre les villes et aux interactions qu'elles entretiennent ;
- le système des villes représente le niveau macro-géographique dans une perspective inter-urbaine : on s'intéresse aux configurations hiérarchiques et spatiales de l'ensemble des villes formant ce système, et à leurs dynamiques.

Dans certains cas, le niveau du questionnement correspond au niveau où opèrent les forces motrices du changement, *i.e.* celui où sont formalisées les règles et les équations du modèle (par exemple le niveau des individus dans les modèles de microsimulation et celui des unités spatiales dans les modèles dynamiques par systèmes d'équations différentielles). Dans d'autres situations, plusieurs niveaux sont impliqués. C'est le cas des modèles d'émergence reposant sur l'hypothèse que les interactions opérant au niveau des entités élémentaires font émerger des structures identifiables à un niveau d'organisation supérieur sans que celles-ci aient été nécessairement planifiées ou prévues. Il s'agit de modèles interactionnistes, typiquement systèmes multi-agents et automates cellulaires. Les entités élémentaires composant le niveau micro, qualifiés d'agents (individus, véhicules, ménages,

entreprises…), sont situées dans un environnement au sein duquel elles interagissent localement. De ces interactions peuvent alors émerger des états macroscopiques singuliers, non réductibles aux seules propriétés des entités élémentaires. Ces modèles ont connu un large essor dans les sciences sociales au cours de la dernière décennie (Amblard, Phan, 2006) [3].

## Une grille de lecture pour les modèles urbains dynamiques et spatiaux

Pour présenter les modèles développés par les géographes sur les espaces urbains, nous avons choisi de construire une grille de lecture organisée en fonction de deux dimensions, l'une relative à la manière dont on appréhende le phénomène empirique qu'il s'agit de modéliser, l'autre au dispositif que le modélisateur met en place pour y parvenir :

### *Le niveau d'abstraction du phénomène empirique que l'on cherche à modéliser : phénomène particulier ou fait stylisé.*

Un exemple permet d'illustrer cette dichotomie. Supposons que l'on s'intéresse à la ségrégation résidentielle et que l'on veuille expliquer la forme spatiale que prend cette ségrégation. Deux approches sont possibles en fonction de l'objectif visé :

**1 -** expliquer la répartition intra-urbaine des populations favorisées et défavorisées dans une ville donnée, par exemple Londres ou Montpellier, en identifiant les éléments de l'espace urbain qui jouent un rôle structurant dans les inégalités spatiales observées ;
**2 -** expliquer un fait stylisé, c'est-à-dire une organisation spatiale type, récurrente dans plusieurs cas empiriques. Ce peut être par exemple l'existence systématique d'une forte auto-corrélation dans la répartition de la population en fonction de ses revenus.

Dans le premier cas il s'agit de décrire comment et en fonction de quelles logiques territoriales les inégalités sont agencées dans l'espace et le rôle du contexte est central. Dans le deuxième cas, on est à la recherche de mécanismes universels qui génèrent systématiquement une organisation ségrégée en des lieux différents (Sanders, 2006) [41]. Entre ces deux extrêmes il y a place pour divers cas intermédiaires et la science progresse par des aller-retour entre les deux approches : la multiplication et comparaison des observations empiriques permettent de construire un fait stylisé (modèle-type), dont on vérifie ensuite le caractère universel à partir d'autres cas empiriques, et dont on recherche la logique de production.

Ce premier axe rend ainsi compte du positionnement du modélisateur relativement à l'observé auquel il s'intéresse : une organisation spatiale précise, observée en un lieu donné à un moment donné, ou une organisation-type, simplifiée, de ce que l'on observe de manière répétée dans le temps et/ou l'espace. D'un côté on a les modèles reposant sur des informations complètes et fines au niveau spatial, de l'autre les modèles dits « concept driven », en général plus parcimonieux sur le plan des variables mobilisées.

### *Le niveau de simplification du modèle : KISS ou KIDS*

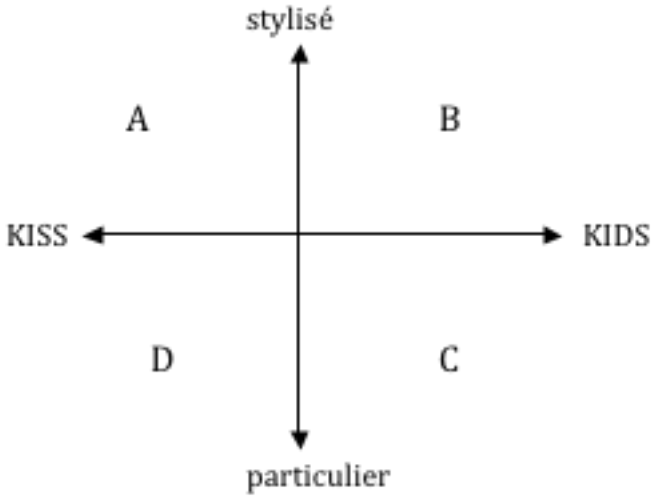
Modéliser et simuler un système complexe est une tâche à l'évidence complexe… et pourtant, des simplifications peuvent et doivent être faites. Le prix Nobel d'économie 1978 Herbert Simon aimait rappeler qu'il n'est pas nécessaire de connaître l'intégralité du comportement des constituants élémentaires de la matière, dans ses niveaux les plus fins, pour construire des ponts ou des avions (Axelrod, 1969) [4]. Par ailleurs, un modèle complexe aura peu de chance d'être maîtrisé par ses utilisateurs et même ses concepteurs. C'est dans cet esprit que Robert Axelrod à proposé l'approche KISS comme approche générique de modélisation à base d'agents : Keep it Simple, Stupid ! Même si un phénomène est complexe, sa modélisation doit reposer sur des principes simples. D'après Axelrod, la complexité d'un modèle à base d'agents doit résider dans les résultats issus de sa simulation, non dans ses hypothèses (Simon, 1997]) [47]. L'enjeu est alors de construire le modèle le plus simple possible capable de reproduire, par ses résultats de simulation, la complexité du phénomène modélisé. Epstein et Axtel [3] et plus récemment Epstein [24] font de ce principe de simplification extrême un des fondements de leur « manifeste générativiste » : « expliquer » un phénomène social observé revient à le « générer » par simulation.

L'injonction de simplification des processus élémentaires qui est faite dans l'approche KISS est cependant discutable. Pour Edmonds et Moss, tous les phénomènes ne sont pas réductibles à des modèles simples et les dérives auxquelles a pu conduire cette quête systématique de simplification, notamment dans les sciences sociales, ne sont pas justifiées. Ils proposent alors une approche concurrente,

dénommée KIDS : Keep It Descriptive, Stupid ! (Edmonds, Moss, 2005) [23]. En un sens, si l'approche KISS privilégie la reproduction de structures macroscopiques observées, l'approche KIDS se focalise d'avantage quant à elle sur les mécanismes sous-jacents. Edmonds et Moss suggèrent que nul modèle entièrement KISS ou KIDS ne saurait être suffisant et que le plus souvent c'est une combinaison des deux qu'il faut viser.

Le croisement des deux dimensions ainsi proposées, « reproduction d'un fait stylisé /particulier » et « élaboration d'un modèle KISS/KIDS », permet de distinguer quatre cas de référence (Figure 1).

**Figure 1 :** Une grille de lecture à deux entrées




Une rapide incursion du côté du modèle gravitaire et des théories de l'interaction spatiale permet d'illustrer le mode de lecture de ce diagramme. Selon la loi de la gravitation universelle de Newton, deux corps s'attirent avec une force proportionnelle à leurs masses et inversement proportionnelle au carré de la distance qui les sépare. L'analogie avec les interactions inter-urbaines a été réalisée assez tôt, de manière relativement évidente : si la « masse » d'une ville peut être approchée par sa population par exemple, alors on doit pouvoir prédire les flux de population entre deux villes à partir de leurs populations respectives et de la distance géographique les séparant. Cet énoncé, simple et stylisé, nous place dans le quadrant A du diagramme. L'ajustement statistique du modèle mathématique afférant aux données empiriques nous entraîne vers le quadrant D. En revanche, l'enrichissement de ce modèle « pauvre sur le plan théorique »[1], par exemple par l'introduction « d'opportunités intermédiaires » ou « d'effets de barrières » (Pumain, Saint-Julien, 2001) [40], relève du quadrant B, et l'ajustement empirique des modèles ainsi spécifiés amène un positionnement dans le quadrant C. Dans la suite, cette grille d'analyse est utilisée pour présenter les grandes familles de modèles développés en géographie urbaine.

## Individus, piétons, flux : des modèles particulaires à la time-geography

Une première famille de modèles porte sur les déplacements des individus dans l'espace urbain. Il s'agit de formaliser des parcours, des trajectoires, à partir de règles portant sur les comportements individuels, en s'intéressant aux conséquences sur les déplacements des autres individus et sur l'organisation de l'espace. Suivant la nature des règles introduites et de la relation entre les niveaux micro- et macro-géographiques, les modèles développés dans la littérature sont différemment positionnés dans la grille d'analyse de la Figure 1. Les trois exemples utilisés illustrent l'éventail des possibles à partir d'un processus standard, la « marche aléatoire »[2].

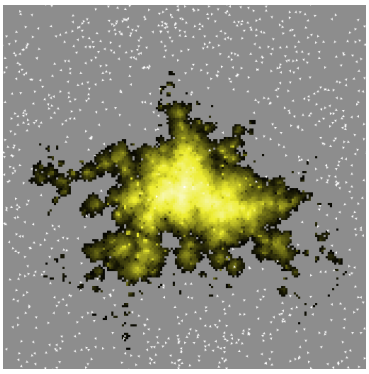
[1] Selon Denise Pumain, dans l'article « Modèle gravitaire » de l'encyclopédie électronique Hypergéo.

[2] De manière très générale, « une marche aléatoire est un modèle mathématique d'un système possédant une dynamique discrète composée d'une succession de pas effectués au hasard » (Wikipédia) Pour une description détaillée, voir (Pelcé 2000) [35].

### *Marche aléatoire et morphogénèse urbaine (quadrant « A »)*

La marche aléatoire est une caractéristique essentielle des agents browniens, très largement utilisés en modélisation spatiale, pour simuler des phénomènes de croissance urbaine par exemple. Très en vogue dans les années 1990, le modèle d'agrégation limitée par diffusion (ou modèle DLA, pour Diffusion-Limited Agregation) a ainsi fait l'objet d'applications répétées en géographie (Batty, 1991 [10] ; Batty et Longley, 1994 [12] ; Le Bras, 1996 [34] ; Schweitzer et Steinbrink, 1997 [46]). Proposé par les physiciens Witten et Sander en 1981, ce modèle issu de travaux menés en cristallogenèse permet de simuler la croissance de surfaces ou de volumes par arrivées successives et agrégation de particules décrivant une marche aléatoire.

**Figure 2 :** Croissance urbaine simulée par un modèle DLA avec le prototype SMArtUrb



Capable de produire des formes complexes (agrégats fractals) à partir d'un processus de croissance très simple, ce modèle s'inscrit sans ambigüité dans le quadrant « A » de la Figure 1 lorsqu'il est appliqué tel quel à la croissance urbaine[3]. Le statut « KISS » du modèle de base provient, au delà de son indéniable capacité à reproduire - sous certaines conditions - des structures spatiales proches de celles observées, de son ontologie ambigüe. Les particules, modélisées sous forme d'agents browniens, peuvent ainsi difficilement être interprétées comme des individus (par exemple des colons pendant la conquête de l'Ouest) se déplaçant au hasard dans un espace et décidant de s'installer à côté de la première maison rencontrée. Cette analogie relativement trompeuse masque au contraire le caractère extrêmement abstrait de ce modèle, dans lequel la forme finale de l'agrégat est contrainte par le processus de diffusion des particules et reflète essentiellement le processus de croissance retenu (Pelcé, 2000) [35], dont rien n'indique qu'il puisse correspondre à un processus de croissance urbaine, même pour ses composantes les plus volatiles telles que les quartiers d'habitats spontanés (Barros et Sobreira, 2002) [9]. On notera que la simple introduction de contraintes locales (espaces non constructibles par exemple), afin de produire des résultats plus proches de configurations observées, tendrait à faire basculer ce modèle dans le quadrant « D ». Seul un travail de fond sur les processus permettrait de faire basculer le modèle en « B » puis en « C ».

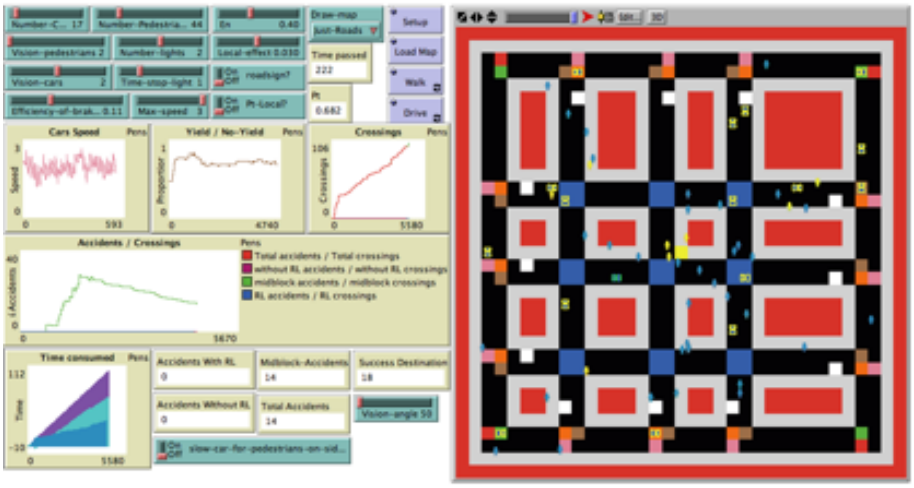
Cette capacité à reproduire des structures macroscopiques observées à partir de processus microscopiques relativement approximatifs – voire assez éloignés des processus observés – est une des caractéristiques des modèles KISS. Elle fait à la fois leur force et leur faiblesse et le recours à ce type de modèle dépend largement du contexte et des objectifs de la modélisation. Un autre exemple d'application du modèle de la marche aléatoire, moins délibérément ancré dans une approche KISS, permettra d'illustrer les possibilités de rapprochement de ce genre d'approche avec les modèles KIDS, plus soucieux de la teneur des micro-processus impliqués.

### *Marche aléatoire et accidentologie routière (quadrant « B »)*

Le modèle SAMU, développé par (Banos et al., 2005) [7], puis étendu par (Godara et al., 2007) [27], est dédié à l'exploration des interactions piétons-véhicules, dans un environnement urbain simplifié. Dans ce modèle à base d'agents, les accidents de la circulation émergent des interactions entre deux types d'agents (des piétons et des voitures), qui se partagent le même espace.

[3] Ce modèle a fait l'objet de tentatives d'importations plus ou moins réussies dans d'autres disciplines ou domaines d'application, dans le cadre d'analogies physicalistes parfois délicates. Pour un parallèle intéressant avec la botanique, voir (Varenne 2007) [51].

**Figure 3 :** SAMU, un « laboratoire virtuel » dédié aux interactions piétons-véhicules en milieu urbain



Les voitures sillonnent les rues au hasard, en respectant les principales règles du code de la route (sens de circulation, feux de signalisation, priorités à droite). Les piétons se déplacent quant à eux selon un principe de descente de gradient, localement perturbé par la présence d'obstacles (bâtiments), de passages piétons (attracteurs locaux) et de routes. Ces processus minimalistes sont enrichis par un modèle comportemental plus subtil. Le comportement de traversée est ainsi modélisé au moyen d'un jeu de coordination, dans lequel l'incitation à agir des uns est une fonction croissante de l'action des autres (Taillard, 2006) [48]. L'introduction d'un paramètre aléatoire (bruit) permet d'obtenir de manière endogène des variations intéressantes de comportement, sous forme de périodes d'équilibre ponctuées de brèves périodes de changements : les piétons ajustent ainsi en partie leur comportement de traversée sur un comportement moyen observé, lui même fluctuant. En dépit de sa relative simplicité, l'analyse des sorties de ce prototype au moyen d'un modèle de risque agrégé révèle une bonne proximité avec les estimateurs empiriques classiques (Lassarre et *al*., 2007) [33].

A la différence du modèle DLA précédent, SAMU se caractérise à la fois par l'introduction de contraintes liées au phénomène étudié (par exemple le code de la route ici) et par un volet « comportemental » plus étoffé, ce qui le place dans le quadrant « B » de la Figure 1. Toutefois, la formalisation du comportement individuel de traversée au moyen d'un jeu de coordination n'a pas été validée empiriquement et peut être vue là aussi comme relevant, dans une certaine mesure au moins, de l'analogie. On voit donc que la frontière entre KISS et KIDS est relativement floue. Un dernier exemple permettra de préciser le positionnement relatif de ces deux approches.

## *Au-delà de la marche aléatoire (quadrant « C »)*

La modélisation et la simulation des mobilités géographiques sont depuis longtemps au cœur des préoccupations urbaines. Nombreuses sont les disciplines qui ont intégré cette composante dans leur domaine d'activité. Un cadre conceptuel commun s'est rapidement imposé (la maximisation de l'utilité), chaque discipline l'enrichissant selon ses points de vue privilégiés. L'apparition des technologies agents dans ce contexte multi-disciplinaire a été favorisée par le développement précoce des approches individus-centrées et activités-centrées, moins réductrices que les approches agrégées. Elle a naturellement débouché sur une complexification significative des modèles produits, dont la simulation a été rendue possible grâce à l'évolution spectaculaire de la puissance de calcul, y compris à l'échelle d'agglomérations entières – par exemple TRANSIM (Barrett et *al.,* 2004) [8] – éventuellement en couplage avec des modèles d'occupation du sol – par exemple URBANSIM (Waddell, 2002) [52]. C'est dans ce paysage particulièrement fertile et dynamique que le modèle MIRO s'inscrit, avec un ancrage conceptuel particulier, celui de la Time Geography.

Définie par T. Hägerstrand (Hagerstrand, 1970 [29] ; Chardonnel, 2001 [16]) dans les années 1970, la Time Geography replace les individus dans un contexte social spatialement et temporellement ancré. Leur liberté d'action n'est pas totale : de nombreuses contraintes d'occupation d'espace et de temps interviennent

et interfèrent avec leurs actions. Dans le modèle MIRO, les agents sont capables d'ordonner dans le temps les activités en fonction des plages horaires disponibles et en fonction de l'accessibilité aux lieux des activités. La création de ces emplois du temps spatialisés individualisés, est réalisée de manière itérative, au cours de la simulation : les agents cherchent à réaliser leur programme sur la journée en tenant compte des heures d'ouverture des bâtiments (travail, loisirs,…) et du trafic ambiant. A la fin de chaque journée, ils modifient si besoin est leur programme pour le lendemain en fonction de l'expérience de la journée. On est ici très loin du niveau d'abstraction du modèle DLA de croissance urbaine, mais également de celui retenu pour le modèle SAMU. Les processus microscopiques modélisés sont extrêmement détaillés, très proches des processus observés et le modèle est calibré empiriquement, ce qui positionne MIRO dans le quadrant « C ». Le prix à payer pour un tel investissement est une complexification extrême du modèle, dont il devient très difficile – sinon impossible – de maîtriser complètement le comportement. Des stratégies multi-dimensionnelles et multi-échelles doivent alors être mises en œuvre, afin d'explorer les multiples facettes de ce type de modèle KIDS (Banos et *al.,* 2010) [6].

## Utilisation du sol : simulation par automate cellulaire

Les automates cellulaires (AC), formalisme issu de l'intelligence artificielle, ont ouvert un large champ de modélisation de la dynamique de l'utilisation du sol, notamment en milieu urbain. Très tôt les géographes ont fait le parallèle entre le jeu de la vie de Conway (1967) et l'évolution de l'espace urbain, et ont évoqué des "cellular worlds" (Couclelis, 1985) [20] et une "cellular geography" (Tobler, 1979) [49], et considéré les AC comme des outils intrinsèquement géographiques. L'analogie entre grille et cellules représentant l'automate cellulaire et l'espace géographique est en effet assez « naturelle ». De plus, les règles de transition faisant dépendre l'état d'une cellule au temps *t* de son état et de celui de ses voisines au temps *t-1* trouvent un écho dans la première loi de la géographie telle que l'a énoncée Tobler (1970) [50] : « *Everything is related to everything else, but near things are more related than distant things* ». Aussi, l'utilisation des AC pour modéliser l'évolution de l'utilisation du sol est-elle fréquente à partir des années 1980-1990. Dans certaines applications, l'utilisation du sol est interprétée de façon stricte, en tant que type de couverture du sol (par exemple bâti/non bâti) alors que dans d'autres l'état de la cellule est défini par le type d'entité qui s'y trouve (individu ou population de tel revenu ou caractère ethnique par exemple). Dans le quadrant A de la Figure 1 on peut placer les modèles les plus proches du jeu de la vie d'un point de vue formel, considérant des voisinages restreints et des règles de transition très simples[4]. La démarche consiste alors à réfléchir aux différents phénomènes s'en rapprochant, au moins d'un point de vue conceptuel : la croissance urbaine, un processus de ségrégation, une épidémie, un feu de forêt, un ruissellement pluvial en sont autant d'exemples classiques. Le modèle de Schelling (1978) est un exemple phare du « KISS stylisé ». Chaque cellule peut prendre deux états possibles, rouge et bleu par exemple, en fonction des caractéristiques de celui qui l'occupe[5] (riche ou pauvre, étranger ou non). La part des cellules voisines ayant le même état qu'une cellule donnée détermine si celle-ci change d'état ou non, par comparaison avec un paramètre fixé globalement, interprété comme un seuil de « tolérance ». Partant d'une situation initiale aléatoire, Schelling a montré que même pour des seuils de tolérance élevés, les simulations conduisent progressivement à une organisation spatiale très ségrégée, avec des concentrations de cellules bleues (respectivement rouges) dans l'espace. Il en ressort que la ségrégation spatiale peut émerger même lorsque les préférences individuelles ne privilégient pas le regroupement entre individus de même caractéristique.

Le passage aux modèles du quadrant B relève de différents types de complexification : - une augmentation du nombre d'états possibles des cellules, permettant un affinement de la propriété considérée avec un plus grand nombre de modalités (Clark et Fossett, 2008 [17] ; Dubos-Paillard et *al.,* 2003 [22] ; White et Engelen, 1992 [54]) ou la combinaison de plusieurs critères (caractère ethnique et revenus pour l'exemple de Schelling, Kirman et Vinkovi, 2006 [44]) ; - une extension du voisinage pris en compte dans la formulation de

[4] Ces règles sont : - si une cellule vivante est entourée de deux ou trois cellules vivantes, elle perdure ; - si une cellule vivante est entourée d'une seule cellule vivante, elle meurt (par isolement) ; - si une cellule vivante est entourée de quatre cellules vivantes ou plus, elle meurt (par congestion) ; - si une cellule morte est entourée de trois cellules vivantes elle prend vie.

[5] Peut aussi être formalisé avec SMA, pour une comparaison des deux modes de formalisation voir (Daudé, Langlois 2009) [21].

la règle de transition (White et Engelen introduisent huit niveaux de portée, avec des effets différenciés sur le changement d'état de l'utilisation du sol dans la cellule considérée[6]) ; une modification géométrique du voisinage, en considérant des zones de tailles et de formes différentes (Badariotti et *al.,* 2006) [5].

Les applications figurant dans le quadrant C sont particulièrement nombreuses et une part non négligeable de celles-ci sont développées dans un cadre opérationnel d'aménagement. Ce fait n'est pas un hasard : si certains de ces modèles, à force d'adaptation à des conditions locales d'application, fonctionnent avec des boîtes noires, ils sont opérationnels dans la mesure où ils sont capables de reproduire efficacement les évolutions observées et constituent un outil de réflexion du type « what…. if », même si les interactions entre les règles sont devenues trop nombreuses pour être visibles.

Enfin, il existe également des cas que l'on peut considérer comme hybrides. Dans leur modèle rendant compte des évolutions des populations israéliennes juives, musulmanes et chrétiennes à Yaffo (Benenson et *al.,* 2009) [14] combinent ainsi une construction des voisinages respectueuse du bâti observé (et s'écartant donc significativement de cellules géométriques) et une certaine stylisation des décisions migratoires des agents-individus (en fonction d'un indice de dissonnance combinant des préférences/répulsions pour des voisins de même religion que soi, et pour un type architectural entre deux possibles).

## Croissance urbaine, systèmes de villes : des équations différentielles aux modèles agents

Les différentiels de croissance des villes (certaines se développent alors que d'autres déclinent ou stagnent), la configuration spatiale du semis des villes (plus ou moins polycentrique, plus ou moins christallérienne), la distribution statistique de leur taille, ont donné lieu à un champ de modélisation précoce et vaste. Les modèles qui ont été développés en géographie urbaine pour comprendre ces phénomènes se sont d'abord appuyés sur des formalismes mathématiques (équations différentielles) et statistiques (loi rang-taille par exemple), puis sur des modèles informatiques issus de l'intelligence artificielle distribuée (automates cellulaires et systèmes multi-agents notamment). Les concepts d'auto-organisation, puis d'émergence, constituent les supports de ces modèles. Contrairement aux modèles présentés dans les §2 et §3 où les hypothèses concernant le changement étaient formulées au niveau des entités élémentaires des individus et des parcelles, ces hypothèses sont ici directement formalisées au niveau des entités villes.

Suivant les applications et développements qui en ont été faits, ces modèles s'inscrivent, comme dans les exemples précédents, dans différents quadrants de la grille. Deux exemples correspondant respectivement à des modèles formalisés avec les mathématiques et les systèmes multi-agents, permettent d'illustrer ce qu'implique le passage d'un quadrant à l'autre.

[6] Une activité industrielle joue par exemple sur une activité résidentielle un rôle répulsif à différentes portées, alors que l'effet d'une activité commerciale est spatialement plus restreint.

### *Exemple de passage du quadrant A à B puis de B à C avec des modèles candidats à l'explication de la croissance urbaine :*

Quand on s'intéresse à l'évolution des quantités de population ou d'emplois dans les différents quartiers d'une ville ou les différents pôles d'une région métropolitaine, le formalisme le plus classiquement employé est celui des systèmes d'équations différentielles. Le modèle logistique, exprimant une phase de croissance exponentielle suivie d'un ralentissement lorsque l'effectif de la population se rapproche de la « capacité maximale » de l'espace considéré, se situe dans le quadrant A des modèles stylisés et KISS. Il s'agit d'un modèle classique de croissance d'une population dans un contexte de ressources limitées, simple et descriptif mais correspondant à une formulation universelle, valable pour des populations de nature diverse (biologique, économique, démographique). On se restreindra ici au cas de populations humaines, et le facteur limitant fait donc référence aux ressources nécessaires au développement des sociétés humaines.

Le passage du quadrant A au quadrant B accompagne le passage d'un modèle formalisant la simple existence d'un effet limitant (*i.e.* l'existence de contraintes, de barrières à la croissance), fixe, dont il s'agit de déterminer la valeur (travaux de Verhulst 1840), à une formulation explicitant le fonctionnement et la dynamique de ce facteur limitant, lui donnant une portée explicative, avec des équations à plus forte signification sémantique. Dans le

modèle de Peter Allen, le facteur limitant est la résultante du jeu de compétition opérant entre différentes unités spatiales pour attirer population et activités. Pour une zone j donnée, il est ainsi fonction de l'attractivité de cette zone relativement *à* l'ensemble des autres, et le terme exprimant cette attractivité a une formulation complexe qui est illustrée dans la Figure 4. Sans expliciter complètement cette équation, on intuite que la formulation proposée se situe directement dans la filiation de l'équation logistique, avec une capacité maximale complexe, évolutive, reposant sur la combinaison de plusieurs facteurs, exprimant des effets d'agglomération, de saturation, de compétition pour l'espace (à travers l'interaction avec les autres activités), et d'accessibilité. Ce modèle a été appliqué à des données fictives (un semis aléatoire uniforme) pour montrer comment un système territorial évoluait de façon auto-organisée loin de l'équilibre (Allen et Sanglier, 1988 [2], Allen, 1997 [1]). Il a aussi été appliqué pour modéliser les redistributions des populations et activités dans plusieurs agglomérations françaises et ces applications ont donné lieu à des opérations de calibrage pour estimer les valeurs des paramètres permettant de reproduire les trajectoires observées dans différents contextes urbains (Pumain et *al.,* 1990) [40]. Ce faisant, on passe alors du quadrant B à C.

**Figure 4 :** Exemple d'équation de type logistique avec un facteur limitant dynamique et intégrant les possibilités d'interactions entre unités spatiales (sources : Allen 1997 [1], Pumain et *al.* 1989) [40]

$$\frac{d\,S_j^E}{dt} = \varepsilon^E\, S_j^E \left(1 - \frac{S_j^k}{D^E \dfrac{A_j^{co}}{\sum_j A_j^{co}}}\right)$$

avec

$$A_j = \left[\frac{[1 + \rho^E\, S_j^E\,(1 - \psi^E\, S_j^E)]}{1 + \alpha_j^E\, \Phi^E} \cdot \frac{\tau^E}{\tau^E + \sum_{k'} \gamma^{k'}\, X_j^{k'} + \sum_{l'} \gamma^{l'}\, S_j^{l'}}\right]$$

$S_j^E$ : nombre d'emplois de type *E* dans la zone *j* ; $A_j$ : attractivité de la zone *j* ; *co* : paramètre mesurant la sensibilité des entrepreneurs à des différences d'attractivité ; $D^E$ : demande extérieure pour des produits de type *E*

### *Exemple de passage du quadrant B à C avec des modèles agents simulant l'émergence d'un système de villes (du modèle SimPop à EuroSim) :*

L'introduction des systèmes multi-agents dans les SHS au début des années 1990 a permis l'élaboration de modèles reposant sur le même concept d'auto-organisation et d'effets de retroactions non linéaires présents dans le modèle de P. Allen, mais en offrant la possibilité de formaliser les interactions spatiales d'une nouvelle façon (Pumain et *al.,* 2009 [39], Sanders, 2010 [42]). Un premier modèle mis au point dans le cadre d'une collaboration entre géographes et informaticiens est SimPop[7] (Bura et *al.,* 1996 [15], Sanders et *al.,* 1997 [43]). Partant d'une grille théorique repré-sentant une répartition à peu près régulière d'unités de peuplement peu différenciées en taille, dans un contexte où seule l'activité agricole existe, le modèle simule l'émergence progressive d'un système de villes hiérarchisé aux fonctions et aux activités diversifiées (Figure 5).

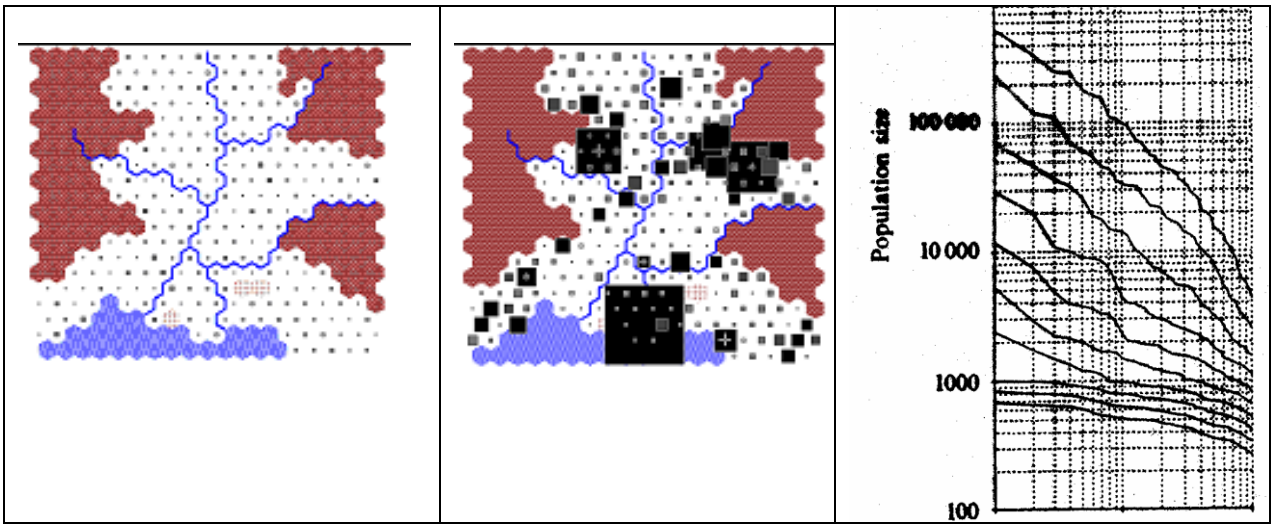
La pente de la droite rang-taille[8] permet de suivre le rythme du processus de hiérarchi-sation (Figure 5c). La structure hiérarchique, observable au niveau du système de peuplement, émerge des interactions entre les entités spatiales élémentaires. Ces interactions expriment des échanges entre les unités de peuplement, échanges de nature économique, chaque entité cherchant à commercialiser sa production et étant pour ce faire en compétition avec les autres entités productrices des mêmes produits. La plupart des applications de SMA partent de situations initiales aléatoires ou régulières (c'est le cas de SimPop), et la simulation permet justement de suivre la genèse d'une structure (spatiale et hiérarchique dans le cas de SimPop) appréhendée sous forme de fait stylisé. On peut aussi s'intéresser à l'évolution et à l'éventuel changement de structure d'un système de ville observé, saisi « en plein vol ». Tel est le cas du modèle EuroSim, modélisant l'évolution des villes europé-

[7] www.simpop.parisgeo.cnrs.fr

[8] Si on représente les villes d'un pays en fonction de leur nombre d'habitants et de leur rang sur un schéma bi-logarithmique, on obtient très régulièrement une courbe se rapprochant d'une droite de pente 1 (Batty 2001 [13], Pumain 2000) [37].

ennes de 1950 à 2050 en fonction de différentes hypothèses sur le contexte démographique et économique européen à l'horizon 2050. Il ne s'agit plus de simplement faire émerger une organisation rang-taille stylisée, mais de tenir compte des ordres de grandeur du système de villes européen. Le modèle EuroSim se place ainsi dans le quadrant C de la Figure 1.

**Figure 5 :** Simulation de l'émergence d'un système de villes hiérarchisé avec le modèle SimPop : (a) situation initiale (année 0); (b) situation finale (année 2000) ; (c) Représentation rang-taille des villes à différentes périodes, de 0 à 2000




(a) (b) (c)

## Conclusion

Les modèles développés pour représenter et comprendre l'évolution de l'espace urbain dans ses dimensions sociales et spatiales sont souvent issus du croisement de deux sources d'inspiration, d'un côté les théories de la complexité (avec les concepts d'auto-organisation, d'émergence,…) et de l'autre les théories géographiques (théories urbaines, time-geography,…). Au-delà de la diversité des objets et niveaux géographiques en jeu, un dénominateur commun à ces modèles est le rôle moteur joué par les interactions, celles entre entités d'un même niveau et/ou celles entre entités de différents niveaux. Les deux dimensions mobilisées dans cette contribution, le degré d'abstraction du phénomène à modéliser (particulier/stylisé) et le niveau de simplicité des mécanismes introduits dans le modèle (KISS/KIDS), ont permis d'une part de mettre en évidence les filiations qui existent entre différentes familles de modèles, et d'autre part d'éclairer la complémentarité entre les différentes approches. Les connaissances apportées par ces différents modèles sont en effet de nature différente mais toutes aussi nécessaires pour réfléchir à l'avenir d'une ville en particulier comme à l'avenir *des* villes en général. Cet avenir dépend d'une combinaison subtile de mécanismes universels et d'effets de contexte et l'enjeu pour le modélisateur-géographe est de formaliser cette combinaison à l'issue d'un parcours raisonné dans la grille d'analyse proposée.

## Bibliographie


[1] Allen P., 1997
Cities and regions as self-organizing systems models of complexity
*Amsterdam, Gordon and Breach Science Publishers, 275p.*

[2] Allen P., Sanglier M., 1979
A Dynamic Model of Growth in a Central Place System
*Geographical Analysis, 11, p. 256-272*

[3] Amblard F., Phan D., 2006
Modélisation et simulation multi-agents; applications pour les sciences de l'homme et de la société
*Paris, Hermes-Lavoisier, 2006, 446p.*

[4] Axelrod R., 1997
The complexity of cooperation : agent-based models of competition and collaboration
*Princeton Studies in Complexity, Princeton, New Jersey, 232 p.*

[5] Badariotti B., Banos A., Moreno M., 2006
Conception d'un automate cellulaire non stationnaire à base de graphe pour modéliser la structure spatiale urbaine : le modèle Remus, Cybergeo
*European Journal of Geography, article 403, http://cybergeo.revues.org/10993*

[6] Banos A., Boffet-Mas A., Chardonnel S., Lang C., Marilleau N., Thevenin T., 2010
Simuler la mobilité urbaine quotidienne : le projet MIRO
*Hermès, pp. 51-88*

[7] Banos A., Godara A., Lassarre S., 2005 : SAMU
Contribution to the study or urban "anthill", Proceedings of the Second Indian International
*On Artificial Intelligence, Pune, India, 20-22 December, pp. 2876-2888 Banos A., Godara A., Lassarre S., 2005 : SAMU*
Contribution to the study or urban "anthill", Proceedings of the Second Indian International
*Conference on Artificial Intelligence, Pune, India, 20-22 December, pp. 2876-2888*

[8] Barrett C.L. et *al.*
*TRANSMIS,* volume *1-4, Los Alamos Unclassified Report, 2004*

[9] Barros J., Sobreira F., 2002
City of Slums: self-organisation across scales, Proceedings of the Fourth International
*Conference on Complex Systems, June 9-14, 2002 in Nashua, NH, paper 16*

[10] Batty M., 1991
Cities as Fractals: Simulating Growth and Form
*dans : T. Crilly, R. A. Earnshaw, and H. Jones (Editors) Fractals and Chaos, Springer-Verlag, New-York, pp. 41-69*

[11] Batty M., 2005
Cities and complexity
*MIT Press, Cambridge, 565 p.*

[12] Batty M., Longley P. A., 1994
Fractal Cities: A Geometry of Form and Function
*Academic Press, London and San Diego, CA, xxii + 394 pp.*

[13] Batty M., 2001
Polynucleated Urban Landscapes
*Urban Studies, vol. 38, 4, 2001, p.635-655*

[14] Benenson I., Hatna E., Or E., 2009
From Scheling to Spatially Explicit Modeling of Urban Ethnic and Economic Residential Dynamics
*Sociological Methods & Research, Volume 37, Number 4, pp.463-497*

[15] Bura S., Guérin-Pace F., Mathian H., Pumain D., Sanders L., 1996
Multi-agents system and the dynamics of a settlement system
*Geographical Analysis, vol 28, n°2, p.161-178*

[16] Chardonnel S., 2001
La time-geography : les individus dans le temps et dans l'espace
*dans : Modèles en Analyse Spatiale, SANDERS L., Hermès Sciences Publications, Paris, p.129-153*

[17] Clark W., Fossett M., 2008
Understanding the social context of the Schelling segregation model
*Proceedings of the National Academy of Sciences, vol. 105, 4109-4114*

[18] Clarke K.C., Gaydos L. & Hopen S., 1997
A self-modifying cellular automaton model of historical urbanization in the San Francisco Bay area
*Environment and Planning B : Planning and Design 1997, vol. 24, p.247-261*

[19] Conte R. 2007, Review of Joshua Epstein 2007
Generative Social Science: Studies in Agent-Based Computational Modeling (Princeton Studies in Complexity)
*Journal of Artificial Societies and Social Simulation,Volume 10, Issue 4*

[20] Couclelis H., 1985
Cellular worlds : a framework for modeling micro-macro dynamics
*Environment and Planning, A, 17, 585-596*

[21] Daude E., Langlois P., 2006
Comparaison de trois implémentations du modèle de Schelling
*dans : F. Amblard, D. Phan (dir.)*
Comparaison de trois implémentations du modèle de Schelling
*Hermès, Paris, 411-441*

[22] Dubos-Paillard E., Guermond Y., Langlois P., 2003
Analyse de l'évolution urbaine par automate cellulaire
*Le modèle SpaCelle, L'Espace géographique, 2003/4 (tome 32)*

[23] Edmonds B., Moss S., 2005
From KISS to KIDS – An 'Anti-simplistic' Modelling Approach, in Multi-Agent and Multi-Agent Based Simulation
*Lecture Notes in Computer Science, Volume 3415/2005, pp.130-144*

[24] Epstein J., 2006
Generative social science: studies in agent-based computational modeling
*Princeton University Press, Princeton, New Jersey, 356 p.*

[25] Epstein J., Axtell R., 1996
Growing artificial societies: social science from the bottom up
*Brookings Institution Press, MIT Press, Washington DC, 208 p.*

[26] Frankhauser P., 1994
La fractalité des structures urbaines
*Anthropos, Paris, 291 p.*

[27] Godara A., Lassarre S., Banos A., 2007
Simulating Pedestrian-Vehicle Interaction in an Urban Network Using Cellular Automata and Multi-Agent Models
*In A. Schadschneider and al. (Editors), Traffic and granular flow'05, Springer, Berlin*

[28] Grauwin E., Bertin R., Lemoy P., Jensen 2009
Competition between collective and individual dynamics
*Proc Natl Acad Sci USA, 106, 20622-20626*

[29] Hagerstrand T., 1970
What about people in regional science ?
*Papers of the Regional Science Association, N°24, p.7-21*

[30] Hassan S., Antunes L., Pavón J., Gilbert N., 2008
Stepping on earth: A roadmap for data-driven Agent-Based modelling
*In Proceedings of the 5th Conference of the European Social Simulation Association (ESSA08), Brescia, Italy, 12 p.*

[31] Kirman A., Vinkovic C., 2006
A Physical Analogue of the Schelling Model
*Proceedings of the National Academy of Sciences, vol. 103, 19261-19265*

[32] Laperriere V., Badariotti D., Banos A., Muller J.P., 2009
Structural validation of an individual-based model for plague epidemics simulation
*Ecological Complexity, Volume 6, Issue 2, Pages 102-112*

[33] Lassarre S., Godara A., 2007
Pedestrian Accident Risk Assessment in Urban Systems Using Virtual Laboratory SAMU
*11th World Conference on Transport Research in Berkeley, 23-28, 2007, 13 p.*

[34] Le Bras H., 1996
La planète au Village
*Editions de l'Aube, Paris, 222 p.*

[35] Pelcé P., 2000
Théorie des formes de croissance : digitations, dendrites et flammes
*EDP Sciences Editions, 394 p.*
[36] Portugali J., 2004
Toward a cognitive approach to urban dynamics
*Environment and Planning B: Planning and Design*, *31 (4), p.589-613*
[37] Pumain D., 2000
Settlement systems in the evolution
*Geografiska Annaler, 82B, 2, p.73-87*
[38] Pumain D., Saint-Julien Th., 2001
Les interactions spatiales. Flux et changements dans l'espace géographique
*Paris, Armand Colin, coll.Cursus, 192 p.*
[39] Pumain D., Sanders L., Bretagnolle A., Glisse B., Mathian H., 2009
The future of urban systems : exploratory models
*dans : Lane, van der Leeuw, West and Pumain (eds.)*
Complexity perspectives on innovation and social change
*Springer, Methodos series, 2009, p.331-359*
[40] Pumain D., Sanders L., Saint-Julien Th., 1989
Villes et Auto-organisation
*Paris, Economica, 191p.*
[41] Sanders L., 2006
Les modèles agent en géographie urbaine
*dans : Amblard F., Phan D. (dir)*
Modélisation et simulation multi-agents; applications pour les Sciences de l'Homme et de la Société
*Hermès-Lavoisier, p.151-168*
[42] Sanders L., 2010
Les villes comme agents: simulation des futurs possibles du système urbain européen
*NPSS (Nouvelles Perspectives en Sciences Sociales*), *Volume 5, numéro 2, 2010, p.153-180*
[43] Sanders L., Pumain D., Mathian H., Guérin-Pace F., Bura S., 1997
SIMPOP : a multi-agents system for the study of urbanism
*Environment and Planning*.B, *vol. 24, p.287-305*
[44] Schelling T.S., 1978
Micromotives and Macrobehaviour
*N.Y Norton and Co.*
[45] Schweitzer F., 2003
Brownian Agents and active particles
*Springer-Verlag, 420 p.*
[46] Schweitzer F., Steinbrink J., 1997
Urban cluster Growth : analysis and computer simulation of urban aggregations
*dans : Schweitzer F. (Editor)*
Self-organization of complex structures : From individual to collective dynamics
*London, Gordon and Breach, pp.501-518*
[47] Simon H., 1969
The sciences of the artificial
*The MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 123 p.*
[48] Taillard P., 2006
Quel degré de rationalité favorise la coordination des agents ?
*Revue d'Economie Politique, Vol. 116, n° 1*
[49] Tobler W.R., 1979
Cellular Geography
*S. Gale & G. Olsson, eds.*
Philosophy in Geography
*Reidel, Dortrecht ; p. 379-386*
[50] Tobler W. R., 1970
A computer movie simulating urban growth in the Detroit region
*Economic Geography, 46, 234–40*

[51] Varenne F., 2007
Du modèle à la simulation informatique
*Vrin, Mathesis, p. 249*

[52] Waddell P., 2002
UrbanSim : Modeling Urban Development for Land Use, Transportation and Environmental Planning
*Journal of the American Planning Association*, *vol. 68, n°3, p.297-314*

[53] Walliser B., 2011
Emergent Phenomenon in Economy
*dans : Emergences, Springer, A paraître*

[54] White R., Engelen G., 1992
Cellular automata and fractal urban form: a cellular modeling approach to the evolution of urban land use patterns
*WP-9264, RIKS, Maastricht,The Netherlands*

# Saisies et représentations de l'espace urbain

Anne Ruas
Laboratoire MACS - IFSTTAR
Julien Perret, Mickael Brasebin
Laboratoire COGIT – Institut National de l'Information Géographique Forestière

**La connaissance de l'espace urbain est un enjeu important pour les défis du XXIe siècle comme, par exemple, la maîtrise de l'extension urbaine ou le réchauffement climatique. Dès lors, la ville devient un sujet d'étude crucial pour de nombreux acteurs comme les urbanistes, géographes, architectes ou climatologues. Si l'on veut mieux étudier la ville, celle-ci doit être modélisée conformément à la manière dont elle est étudiée. Que ce soit pour mesurer les flux de circulation entre villes ou pour évaluer l'ensoleillement de ses bâtiments, il existe de nombreuses manières de représenter l'espace urbain. Dans un premier temps, l'article met en avant les différentes manières d'aborder la représentation de l'espace urbain. Ensuite, il traite des nouvelles possibilités d'acquisition de base de données 3D et de constitution de bases de données spatio-temporelles, qui offrent de nouvelles dimensions pour pouvoir explorer, comprendre et analyser la ville.**

## De l'espace à la représentation

L'espace géographique est d'une grande richesse et complexité. Pour nommer cet espace, le décrire, l'analyser, on le découpe virtuellement en entités selon une classification prédéfinie. Cet exercice n'appartient pas qu'aux seuls géographes, puisque les enfants dès leur plus jeune âge s'exercent à regrouper, classer et nommer. Cet exercice est également indispensable pour la fabrication de cartes ou de bases de données géographiques.

En regardant l'espace géographique, le cartographe se pose deux questions :

1. Qu'est-ce que je représente de l'espace réel (quelle information) ?
2. Comment je représente l'information que je sélectionne ?

Traditionnellement, ce sont les « spécifications » qui décrivent l'écart entre le monde que l'on voit (ou que l'on appréhende) et sa représentation, qu'elle soit numérique ou sous forme papier. On parle souvent de Terrain Nominal pour décrire « *La modélisation du monde réel au travers du filtre des spécifications* ».

À l'heure de l'existence de multiples données numériques décrivant souvent différemment l'espace géographique, on a besoin *d'intégrer* des données, c'est-à-dire les mettre ensemble, afin que le résultat fournisse une représentation cohérente et enrichie de l'espace. C'est, par exemple, l'un des enjeux décrit dans la directive INSPIRE (Infrastructure for Spatial Information in the European Community) qui vise à proposer des données multithèmes et multirésolutions sur l'espace européen. Cette intégration de données n'est en réalité pas simple. En effet, on décrit le monde réel de façon imparfaite (avec imprécision et incomplétude) et on décrit ce que l'on a saisi également de façon imparfaite (avec imprécision, incomplétude et parfois incertitude). Dit autrement, les données géographiques sont imparfaites. Les métadonnées, qui sont des informations décrivant ces données, le sont aussi. Ainsi, lorsqu'on dispose de données géographiques, on ne peut pas savoir parfaitement comment ces données décrivent le monde réel.

Les causes de ces imperfections sont bien connues : les phénomènes géographiques peuvent être par nature difficiles à décrire, à percevoir, à saisir. Lors de la saisie, un ensemble d'imperfections dues à des erreurs d'interprétations, des imprécisions de mesure, d'oublis se glissent dans le processus. De plus, le monde étant en continuelle évolution, une base de données ou une carte ne décrivent qu'un « instantané » de ce monde ou plutôt un ensemble d'instantanés. Toutes les informations présentes sur une carte ou dans une base de données ne sont pas saisies au même instant, la cohérence temporelle n'est pas garantie entre tous les éléments d'une base de données.

Les instituts de cartographie mettent au point des spécifications qui décrivent le contenu idéal de leurs cartes et bases de données puis des processus et protocoles de saisie les plus précis possible afin de produire de l'information

de la meilleure qualité possible en fonction des objectifs fixés.

On utilise des représentations du monde, plus ou moins détaillées et précises. Parmi les objets que l'on représente, la ville est incontestablement un sujet d'intérêt majeur puisqu'elle est le lieu privilégié de vie, d'interactions et d'échanges que ce soit avec les campagnes alentours ou les autres villes. Il y a ainsi de multiples représentations de la ville, à différents niveaux de détail qui répondent à des problématiques différentes.

Au plus simple, la ville est représentée par un point ou une petite surface, duquel émerge des réseaux qui traduisent des flux entre cette ville et son environnement (d'autres villes ou sa campagne). On parlera de bourg ou village lorsqu'une ville n'échange qu'avec sa campagne (essentiellement pour se nourrir) et de ville lorsqu'il y a échange avec d'autres villes. Les réseaux d'échanges sont généralement les réseaux de communication tels que les routes, chemins, rivières, mais on peut cartographier des flux d'information tels que les échanges Internet. Ce type de représentation (Figure 1) est le plus simple et le plus répandu. La ville est située, son importance se perçoit par la taille du rond ou du polygone et par le nombre d'arcs qui y convergent. On trouve ce type de représentation sur les cartes au 1 : 1M, 1 : 250 000 et même 1 : 100 000 comme l'illustre la Figure 2. Plus l'échelle est grande (1 : 100 000 par rapport au 1 : 250 000) plus l'intérieur de la ville est décrite par les rues principales.

**Figure 1 :** Représentations de la ville

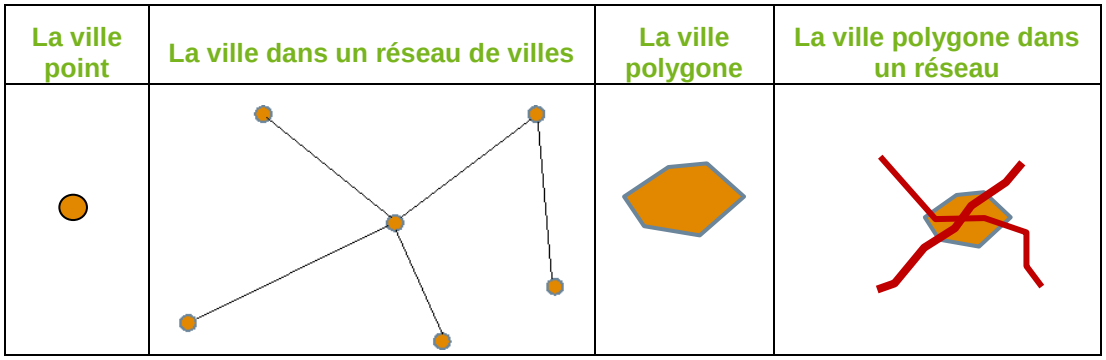


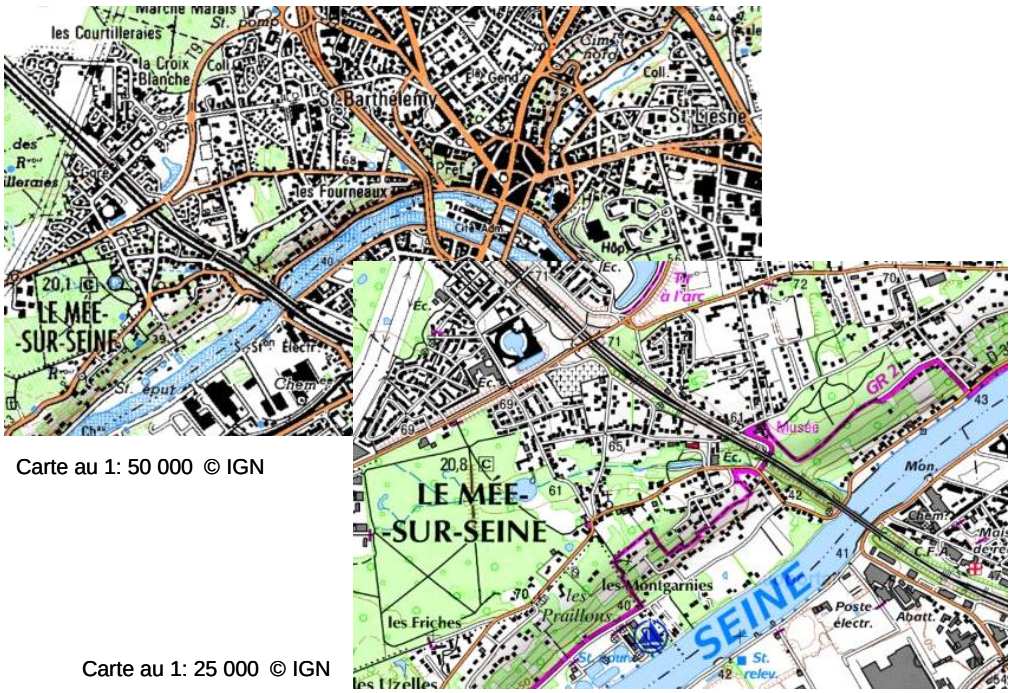

**Figure 2 :** La ville sur des cartes petites échelles

Les représentations du niveau de détail plus fin intègrent les rues et les bâtiments sous la forme de petits polygones. À ces échelles, la description de la forme des bâtiments importe peu, on décrit plutôt l'agencement des bâtiments les uns par rapport aux autres (les patterns). Au 1 : 50 000 on ne peut pas représenter tous les bâtiments, on privilégie la répartition du groupe de bâtiments ou son emprise. Au 1 : 25 000, la représentation est presque exhaustive, on représente tous les bâtiments sauf les plus petits de type cabanes. Alors qu'au 1 : 50 000 le réseau reste prépondérant, au 1 : 25 000 on perçoit bien mieux les îlots et les types d'habitats. Ces échelles (Figure 3) permettent de décrire une emprise assez grande (une ville et sa banlieue, plusieurs villages dans une vallée, etc.), la ville est donc en contact avec son proche extérieur. Lorsqu'on regarde en détail ces cartes, on

perçoit un ensemble d'îlots à l'intérieur ou en périphérie de la ville.

Le niveau de détail le plus fin correspond au plan de ville. À ce niveau de détail, on est à l'intérieur de la ville, on perçoit l'intérieur de chaque îlot (Figure 4, plan au 1 : 5 000) ou chaque bâtiment (plan au 1 : 500). À ces échelles on peut représenter les adresses (nom des rues et numéro des bâtiments), la forme des bâtiments, leur fonction.

**Figure 3 :** La ville sur des cartes moyennes échelles




Carte au 1: 50 000 © IGN

Carte au 1: 25 000 © IGN

**Figure 4 :** Le plan de ville

Plan de Ville © IGN

Toutes ces représentations répondent à des besoins différents allant par exemple de l'aire d'influence d'une ville (1 : 1M ; 1 : 250 000) à la planification urbaine et l'aménagement de quartiers (1 : 5 000). On notera que si la notion de niveaux de détail est nécessaire, la définition précise de ces niveaux est difficile car contextuelle à l'analyse, «ce n'est pas le même phénomène et la même portion de la réalité que l'on envisage aux différents niveaux d'analyse » [10]. Le fait de réaliser des cartes a priori, à différentes échelles, permet de couvrir un ensemble de besoins standards.

La carte est une représentation codifiée qui propose une représentation simplifiée du territoire. À l'heure du numérique, ces représentations 2D restent indispensables à notre compréhension de l'espace. Cependant, elles ne sont pas suffisantes pour régler toutes

les problématiques liées au territoire, deux approches complémentaires permettent une meilleure connaissance de celui-ci. Le premier est la constitution de bases de données urbaines en 3D que nous décrirons au chapitre suivant. Ces représentations nécessitent tout d'abord des processus de saisie spécifiques mais surtout la conception de logiciels ad hoc capables de gérer et de visualiser d'importants volumes de données et de les analyser. Les données 3D urbaines sont présentes sur les géoportails, qui sont de plus en plus enrichies de données thématiques.

Le second courant est lié à l'analyse de l'évolution de la ville, et notamment sa morphologie (Figure 5). Pour cela, il faut construire des bases de données historiques, mettre en relation les entités identiques et analyser l'évolution du territoire sur une période donnée. La section 3 présentera une mise en œuvre sur une période assez courte, de 1950 à 2010, en zone péri-urbaine : le projet GeOpenSim.

**Figure 5 :** Evolution du territoire et de sa représentation

Carte de Cassini
© EHESS

Carte contemporaine
© IGN

## La ville en 3D

De plus en plus de représentations urbaines en 3D sont disponibles notamment sur les géoportails. De nombreux projets de recherche ont récemment été financés par l'ANR (Agence Nationale de la Recherche) et les pôles de compétitivité afin d'améliorer la constitution de bases de données urbaines 3D, enrichies de multiples informations. On notera, entre autres, le projet Terra Numerica et les projets financés par l'ANR CityVIP (www.lasmea.univ-bpclermont.fr/CityVip/) et iTowns (www.itowns.fr). A l'international, il existe de nombreux travaux de construction de données 3D par exemple à Berkeley [8].

Lorsque l'on cherche à constituer un modèle urbain en 3D, cela signifie que l'on veut créer une représentation des entités qui composent la ville par des objets en 2D5 (avec un z qui décrit une surface et non un volume) ou 3D (entités directement modélisées en 3D). Les entités au sol telles que les routes peuvent être représentées en 2D5, c'est-à-dire par une suite de coordonnées (x,y,z) sur l'axe de la route. Les bâtiments eux sont représentés par des volumes ou, le plus souvent, un ensemble de faces planes connexes.

La section suivante présente de façon très simplifiée les différents modes de saisie des données 3D, avant de décrire les modélisations et outils nécessaires à la manipulation de données urbaines 3D.

### *Les méthodes de saisie pour construire une ville en 3D*

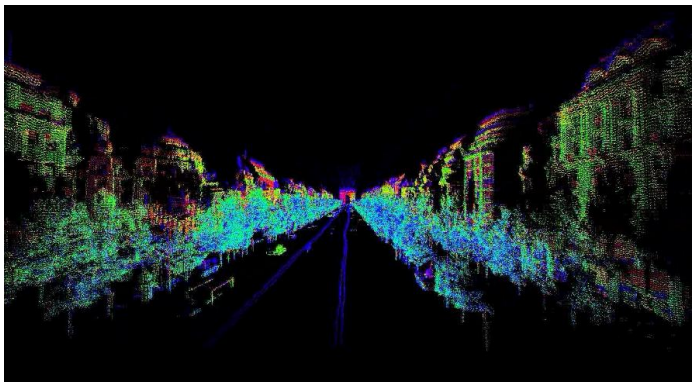
La saisie de coordonnées d'entités se fait par mesures d'angles et/ou de distances. On calcule toujours les coordonnées de points que l'on ne connait pas à partir de points que l'on connaît dans un système de coordonnées défini. Soit on 'vise' une entité dont on veut saisir la géométrie à partir de points de vue dont on connaît la géométrie (c'est par exemple la technique du LIDAR ou de la photogrammétrie), soit on se positionne à l'endroit inconnu et on « vise » des points connus (c'est, par exemple, la technique des relevés GNSS – Global Navigation Satellite System).

Un relevé par GNSS calcule la position du capteur par réception de signaux émis par différents satellites. La position de chaque satellite est connue à chaque instant, la position du capteur GPS est calculée par le capteur. Les

relevés GNSS sont pratiques pour saisir les coordonnées d'entités sur lesquelles on peut se déplacer telles que les routes.

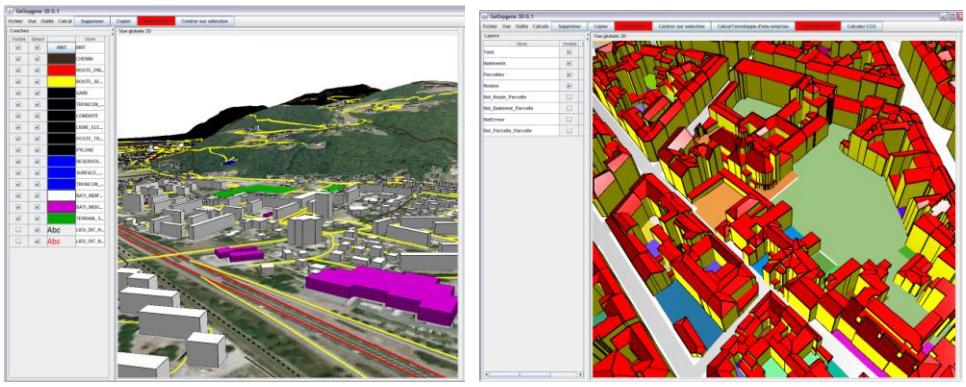
Le LIDAR est un distance-mètre laser qui mesure des distances à une entité visée. Le lidar émet des ondes et enregistre le retour de ces ondes pour calculer des distances à une cadence très élevée. Il peut être porté par un avion par exemple pour construire un modèle numérique d'élévation (au dessus des entités) ou de terrain (au sol). Le lidar peut également être porté par un véhicule terrestre pour générer un nuage de points donnant le contour des entités visées. Cette technique est utilisée en topographie mais aussi en archéologie ou pour la saisie du contour d'ouvrages d'art. Le résultat d'une saisie est un nuage de points géo-référencés en trois dimensions, mais non structurés. Si, en regardant ces points, on peut reconnaître des objets (Figure 6), la géométrie des objets n'est pas reconstituée sous la forme de plans ou de volumes et nécessite ainsi un traitement informatique. Des recherches actuelles visent à optimiser l'information issue du Lidar en zone rurales et urbaines (voir par exemple [13]).

**Figure 6 :** Nuage de points des Champs-Elysées acquis par Lidar terrestre © IGN



Pour créer des modèles urbains 3D, on peut faire des relevés directs à l'aide de tachéomètres qui permettent le calcul d'angles et de distances. Cependant, ce procédé est très long à réaliser. On a souvent recours à la saisie par relevés photogrammétriques qui permet de reconstituer le volume des entités en les photographiant selon différents angles de vue pour reconstituer leur volume. La géométrie des objets de la couche BDTopo du RGE de l'IGN est, par exemple, saisie par relevés photogrammétriques à partir de photographies aériennes (Figure 7).

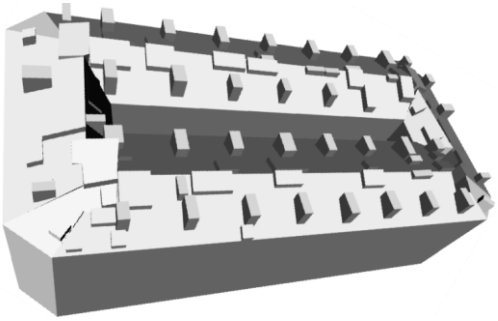
**Figure 7 :** Objets du RGE (gauche) et de Bati 3D (droite) de l'IGN saisis par photogrammétrie © IGN



Pour faire des relevés photogrammétriques il faut des images prises selon des angles de vue différents et des points d'appui qui sont des points que l'on reconnaît dans les images et dont on connaît leurs coordonnées dans un système de référence. Le relevé photogrammétrique en lui-même consiste, premièrement, à reconstituer le modèle géométrique de la prise de vue grâce aux données du véhicule (satellite, avion, voiture), de l'angle de vue et des points d'appui. Dans un deuxième temps, le contour de chaque objet visible est saisi soit par un opérateur humain soit de façon automatique. La qualité de la géométrie dépend de la distance entre le capteur et l'objet à saisir, du nombre d'images et de la qualité et du

nombre de points d'appui. Si, pour la couche BDTopo du RGE de l'IGN, on a utilisé deux angles de vues qui permettent d'obtenir des bâtiments sous la forme de boîtes à chaussures, on peut obtenir des formes bien plus précises lorsqu'on utilise davantage d'angles de vue comme c'est le cas pour les modèles urbains récents (Figure 8). Évidemment, ce processus est beaucoup plus onéreux.

**Figure 8 :** Modèle 3D obtenu à partir de 6 à 8 images aériennes © IGN



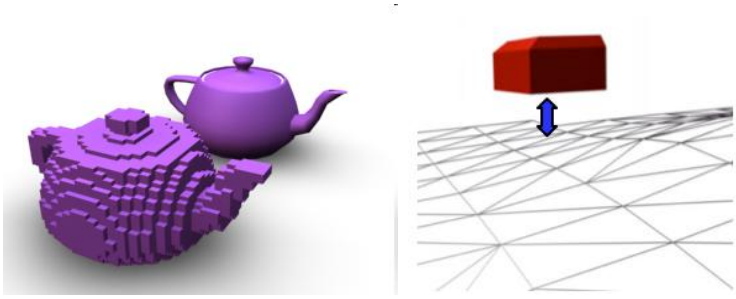
Une fois que l'on dispose d'un modèle 3D, il est possible d'y plaquer des images qui permettent un rendu réaliste de la scène. Des recherches sont en cours pour améliorer les recalages d'images, autant au niveau géométrique (assurer les verticalités et horizontalités des lignes que l'on voit dans les images) qu'au niveau radiométrique, pour éviter la perception des raccords d'images. Les recherches en cours visent à détecter le plus d'objets possibles dans les images dont, par exemple, les arbres et leur nature et le mobilier urbain (bancs, abris-bus, etc.).

Une dernière méthode permettant la saisie pour construire une ville 3D est la saisie manuelle. De nombreux logiciels (3DsMax, Maya, Blender etc.), utilisés notamment dans les films d'animation, permettent à un infographiste de reconstruire des villes en 3D avec un sens du détail particulièrement élevé et une grande liberté de représentation. Si les résultats peuvent être particulièrement impressionnants pour le public, ces modélisations posent le problème de l'exactitude géométrique et du parti pris par le concepteur de la scène.

## *Modélisations et outils pour gérer les représentations numériques 3D*

Après la phase d'acquisition de la géométrie des objets, il faut les rendre cohérents les uns avec les autres et les représenter. Deux questions se posent généralement : comment modéliser les relations de connexité entre les faces décrivant les objets, soit à l'intérieur des objets, soit entre objets, puis comment représenter la géométrie (Figure 9).

**Figure 9 :** Quel modèle géométrique choisir ? Comment assurer la cohérence géométrique entre un bâtiment et un terrain ? [20]



De nombreuses classifications des modèles géométriques et topologiques existent. Des synthèses sont disponibles dont de nombreux ouvrages ou thèses de doctorat dont celle de Poupeau [20], dans laquelle il présente plusieurs classifications dont celle de Requicha [23]. Il distingue trois catégories :

- les modèles d'énumération spatiale (*spatial enumeration*) qui décomposent l'objet à l'aide de primitives volumiques identiques (cube, tétraèdre, hexagone, *etc.*) ;
- les modèles constructifs (*Constructive Solid Geometry*) qui proviennent d'opérations

géométriques (union, intersection, différence etc.) sur des solides paramétrés (ex. : sphère, parallélépipède) ;
- et les modèles fondés sur une description de la frontière (*Boundary Representation*) de l'objet.

Des modèles décrivant à la fois la géométrie et la topologie intra objets ont été proposés, dont le modèle FDS (Formal Data Structure) de Molenaar[14].

En réalité, il n'y a pas pour l'instant pas de modèle idéal, chaque modèle étant adapté à différentes tâches : optimisation du stockage ou de la visualisation ou de l'analyse spatiale, etc. Les solutions actuelles dans le domaine de la géomatique tendent à créer un modèle pivot de stockage en se basant sur le modèle ISO 19 107 qui décrit les composantes géométriques et topologiques sous la forme d'objets. L'utilisation d'un format standard est aujourd'hui un atout considérable puisque cela permet un échange de données et d'applications. Autour du format pivot, différentes fonctionnalités sont développées, pour chaque fonctionnalité on peut être amené à convertir la géométrie et la topologie des objets dans un autre format ad hoc pour simplifier les opérations [4]. Parmi les formats standards, on notera CityGML (www.citygml.org) comme format d'échange standard centré sur la thématique de la ville. Adopté par l'OGC et particulièrement adapté à la description de données urbaines, CityGML porte la description de la géométrie des objets et leur géo-référencement. Il porte les textures associées aux murs ou toits et il est multi-résolution puisqu'il possède 4 niveaux standard le LOD0 (sans z), le LOD1 de type boîte à chaussures, les LOD2 et LOD3 permettant de décrire les toits, portes, fenêtres composant les bâtiments. CityGML peut décrire tout type d'objets, des bâtiments bien sûr mais aussi des routes, des parcs, etc.

La troisième dimension apporte des informations primordiales pour analyser certains phénomènes urbains. Comme il est nécessaire, selon le thème étudié et l'approche d'analyse retenue, de choisir une modélisation adaptée, de nombreuses plateformes 3D ont vu le jour, chacune dédiée à un thème particulier comme, par exemple :
- la consommation énergétique des bâtiments [3],
- l'énergie solaire reçue par un bâtiment [4],
- l'intervisibilité visuelle [22],
- le sous-sol [20],
- le cadastre 3D,
- la visualisation d'enveloppes urbaines réglementaire [5],
- …

La multiplication de plateformes n'aide pas à la prise de décision car il peut être nécessaire de croiser ou de synthétiser le résultat de différentes analyses. Ainsi, certaines plateformes se sont spécialisées dans l'intégration d'outils traitant de thématiques différentes. C'est le cas de celles développées dans le cadre du projet TerraMagna (www.terramagna.org), intégrant des données environnementales (pollution aérienne, sonore et données de trafic) et celle prévue dans le cadre du partenariat Ville Numérique, qui visent à faire collaborer différents acteurs de la ville pour mettre leurs outils en commun au sein d'une plateforme.

## Représentation du temps : analyse de l'espace urbain et son évolution

La spécification, l'acquisition et la maintenance des données urbaines sont des processus complexes qui mobilisent de nombreuses ressources aussi bien matérielles qu'humaines. Une fois la constitution initiale d'une base de données effectuée, c'est la maintenance de celle-ci qui détermine l'actualité des données de la base de données, c'est-à-dire leur temps de validité. Jusqu'à la mise en place de bases de données pour la gestion des données géographiques, nos représentations étaient en effet limitées principalement à des séries de clichés (snapshots) figés dans le temps. C'est le cas, notamment, des cartes topographiques. Le projet GeOpenSim a ainsi proposé l'utilisation de cartes topographiques anciennes et de photographies anciennes pour la constitution de bases de données spatio-temporelles [17].

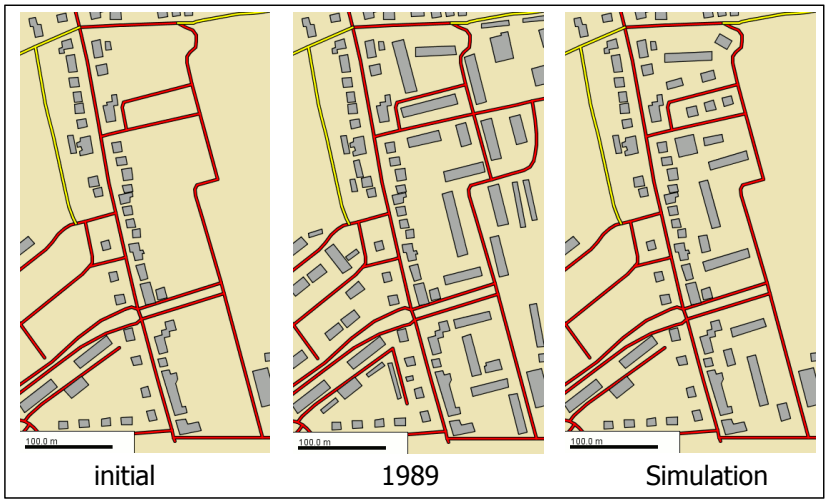
L'amélioration des instruments et outils informatiques permet désormais de réduire le coût de maintenance et de proposer la mise en place de processus de mise à jour dits « en continu », le plus souvent en collaboration avec des partenaires locaux, en particulier les collectivités locales. Il s'agit ainsi, dans une certaine mesure, de rapprocher le temps de mise à jour (souvent appelé temps de transaction) du temps de validité des données. Les bases de données permettant de gérer ces deux temps (temps de validité et temps de transaction) sont appelées base de données bi-temporelles. Leur intérêt est notamment de

permettre de stocker l'historique des modifications de la base de données et ainsi de pouvoir récupérer les erreurs (selon le même principe que la correction des erreurs d'enregistrement et de traitement comptables).

Néanmoins, les données géographiques contiennent à la fois des informations sémantiques, spatiales et temporelles. Peuquet [18] propose ainsi la triade quoi/où/quand (what/where/when) pour la gestion de données spatio-temporelles. L'intérêt d'une telle modélisation est de décomposer les objets étudiés pour pouvoir aborder les phénomènes selon différents angles, permettant ainsi une analyse plus riche des phénomènes étudiés. Cette triade, est reprise dans le modèle OH-FET [24] conçu pour l'étude de la ville sur la longue durée. Dans ce modèle, l'objet historique (OH) est défini comme le produit cartésien des trois ensembles Fonction, Espace et Temps. Un objet historique est ainsi défini à l'aide de la granularité spatio-temporelle [11]. De tels modèles, multi-représentations, permettent par ailleurs de représenter des relations complexes entre les objets modélisés, notamment des hiérarchies [12].

Goodchild [9] suggère que les sciences de l'information géographique se sont focalisées principalement sur la forme (ce à quoi le monde ressemble, notamment du point de vue cartographique) plutôt que sur les processus sous-jacents (comment). Pour Peuquet [19], cela implique que les outils développés permettent une visualisation et une analyse complexe de larges quantités de données, mais que les leçons à tirer de tels outils dépendent entièrement de l'expertise, de l'expérience et de la mémoire des experts manipulant ces outils. Peuquet propose ainsi d'étendre la triade « quoi/où/quand » pour y inclure « comment » (ensemble de règles décrivant les processus) et, à terme, « pourquoi ». Ce sont aujourd'hui les outils issus de la théorie des systèmes complexes [2,15] et des Systèmes Multi-Agents [7] qui sont les plus prometteurs pour la modélisation des processus. En effet, les systèmes urbains sont constitués d'un grand nombre d'entités en interaction. Ces entités appartiennent de plus à différentes échelles et dimensions (géographiques, sociales, économiques, etc.). Les approches basées agent fournissent des moyens flexibles et riches pour décrire le comportement des entités et ainsi modéliser nos connaissances sur les processus [25]. Ces processus peuvent alors être simulés afin de mieux comprendre les évolutions passées ou d'analyser des scénarios alternatifs selon la logique du « que se passerait-il si … ? » [1, 16, 21].

**Figure 10 :** Simulation de la densification d'un îlot urbain © GeOpenSim 2011




Le coût d'acquisition de données historiques freine l'analyse des dynamiques spatiales mais des projets tels que GeOpenSim (geopensim.ign.fr) commencent à proposer des modèles permettant la constitution de bases de données historiques, la représentation de différents scénarios d'évolution, la simulation de l'évolution de la ville selon ces scénarios et la comparaison d'états. Ces outils d'exploration – et non de prédiction – sont très certainement prometteurs pour notre compré-hension des dynamiques et des facteurs les influençant.

## Bibliographie


[1] Batty M.
Cities and Complexity: Understanding Cities with Cellular Automata, Agent-Based Models and Fractals
*MIT Press, 2007*

[2] Bertalanffy L.
General System Theory
*Penguin Books, 1972*

[3] Bouyer J.
Modélisation et simulation des microclimats urbains. Etude de l'impact de l'aménagement urbain sur les consommations énergétiques des bâtiments
*Thèse de doctorat Université de Nantes et Ecole polytechnique de l'Université de Nantes, 2009*

[4] Brasebin M.
GeOxygene: An Open 3D Framework for the Development of Geographic Applications
*12th International Conference on Geographic Information Science, 2009*

[5] Brasebin M., Perret J., Haëck C.
Un système d'information géographique 3D pour l'exploration des règles d'urbanisme
*Conférence SAGEO 2010 (Spatial Analysis and GEOmatics), 2010*

[6] Carneiro C., Morello E., Desthieux G., Golay F.
Urban environment quality indicators: application to solar radiation and morphological analysis on built area.
*Proceedings of the 3rd WSEAS international conference on Visualization, imaging and simulation, 2010, pp. 141-148.*

[7] Ferber J.
Les Systèmes multi-agents : Vers une intelligence collective
*InterEditions, 1995*

[8] Frueh C., Zalhor A.
Constructing 3D City Models by Merging Ground-Based and Airborne Views
*IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2003*

[9] Goodchild M.
GIScience, geography, form, and process
*Annals of the Association of American Geographers, 2004*

[10] Lacoste Y.
Les objets géographiques, Cartes et Figures de la terre
*Centre Georges Pompidou de Paris, 1980*

[11] Langlois P.
Complexité et systèmes spatiaux : Modélisations Géographiques
*Traité IGAT, 2005*

[12] Lorho T.
SIGUR : Un SIG pour la pratique de l'archéologie en milieu urbain
*Archéologia e Calcolatori, n° 19, 2008*

[13] Mallet C.
Analyse de données lidar à retour d'onde complet pour la classification en milieu urbain
*Thèse de doctorat IGN et Télécom Paris, 2010*

[14] Molenaar M.
A formal data structure for 3D vector maps
*EGIS'90, 1990*

[15] Morin E.
Introduction à la pensée complexe
*Edition du Seuil, 2005*

[16] Perret J., Curie F., Gaffuri J., Ruas A.
Un système multi-agents pour la simulation des dynamiques urbaines
*18èmes Journées Francophones sur les Systèmes Multi-Agents (JFSMA'10), 2010*

[17] Perret J., Boffet Mas A., Ruas A.
Understanding Urban Dynamics : the use of vector topographic databases and the creation of spatio-temporal databases
*24th International Cartography Conference (ICC 2009), 2009*

[18] Peuquet D.J.
It's about time: A conceptual framework for the representation of temporal dynamics in geographic information systems
*Annals of the Association of American Geographers, 1994*

[19] Peuquet D. J.
The Multi-Representation of Space-Time Information
*International Conference on Virtual Geographic Environments, 2008*

[20] Poupeau B.
Modélisation 3D du sol et du sous-sol pour les risques
*Thèse de doctorat IGN et Université Paris-Est, 2007*

[21] Sanders L., Favaro J.-M., Mathian H., Pumain D., Glisse B.
Intelligence artificielle et agents collectifs : le modèle EUROSIM
*Cybergeo, 2007*

[22] Ramos F.
Modélisation et Validation d'un Système d'Information Géographique 3D opérationnel
*Thèse de doctorat IGN et Université Paris-Est, 2007*

[23] Requicha A. A. G.
Representations for Rigid Solids: Theory, Methods and Systems
*Computing Surveys, 1980*

[24] Rodier X., Saligny L.
Modélisation des objets historiques selon la fonction, l'espace et le temps pour l'étude des dynamiques urbaines dans la longue durée
*Cybergeo, 2010*

[25] Thériault M., Des Rosiers F.
Information géographique et dynamiques urbaines 1 : analyse et simulation de la mobilité des personnes
*Traité IGAT, 2008*

# Villes et réseaux : entre des processus top-down et bottom-up

Céline Rozenblat
Institut de Géographie – Université de Lausanne

**Le développement des villes est, à l'heure de la globalisation, intrinsèquement lié à leur interaction avec les grands réseaux qui parcourent la planète. La capacité des villes à s'insérer dans les réseaux mondiaux est généralement mesurée par leur position centrale dans les grands flux planétaires comme les flux aériens ou les réseaux d'organisations des firmes multinationales, en insistant sur les effets macros de concentration de ces flux dans les grands nœuds mondiaux. Il s'agit là d'une approche descendante (top-down) le plus souvent adoptée par les économistes et les géographes. De leur côté, les sociologues et gestionnaires insistent davantage sur les stratégies des individus et des groupes et sur les interactions entre les systèmes qu'ils forment : des processus micros de formation ou de destruction des réseaux agissent de manière ascendante (bottom-up) pour former ces grands réseaux. Nous suggérons qu'entre ces processus top-down, partant du niveau macro, et les processus bottom-up, partant du niveau micro, se constitue le niveau meso, comprenant des processus intra-urbains d'effets multiplicateurs, dus aux interactions entre les réseaux venant de l'extérieur et l'environnement local. L'approche multiniveau des réseaux propose ainsi de nouvelles perspectives pour comprendre la dynamique des villes.**

## Introduction

Dans le contexte contemporain de globalisation, les systèmes de villes occupent une place de premier plan. Depuis les travaux de Hall (1966) [56], Cohen (1981) [30], Friedmann (1986) [30], Sassen (1991) [102] et Castells (1996) [27], la centralité des villes dans l'économie mondiale constitue un élément important de la compétitivité urbaine (Begg 1989) [15]. De nombreuses études ont mesuré les différentes centralités des villes globales ou mondiales. Les « *villes globales* » sont définies comme des leaders dans les services avancés (Sassen 1991 [102]; Taylor 2001 [108]), tandis que les « villes mondiales » se spécialisent dans différents types d'activités productives (Rozenblat & Pumain 1993, 2007 [97-98] ; Alderson & Beckfield 2004 [1] ; Wall & van der Knaap 2009 [112]). Dans la plupart de ces recherches, les mesures de compétitivité urbaine sont basées sur la centralité dans les réseaux des firmes multinationales, reconnues comme des acteurs forts dans la mondialisation, qui confèrent aux villes un certain pouvoir par le biais de leur localisation et de leur connectivité (Parson 1957, 1963 [97-98] ; Allen 1999, 2008 [3-4] ; Taylor 2004) [108]. Ces processus sont une composante essentielle de la rénovation urbaine à travers les relations externes à la ville des entreprises. Ainsi, ces réseaux, par leur extension à travers le monde, fournissent des ressources indispensables pour le développement urbain tandis qu'en retour, les systèmes de villes forment un ensemble de ressources pour les entreprises multinationales (Neal 2008) [79].

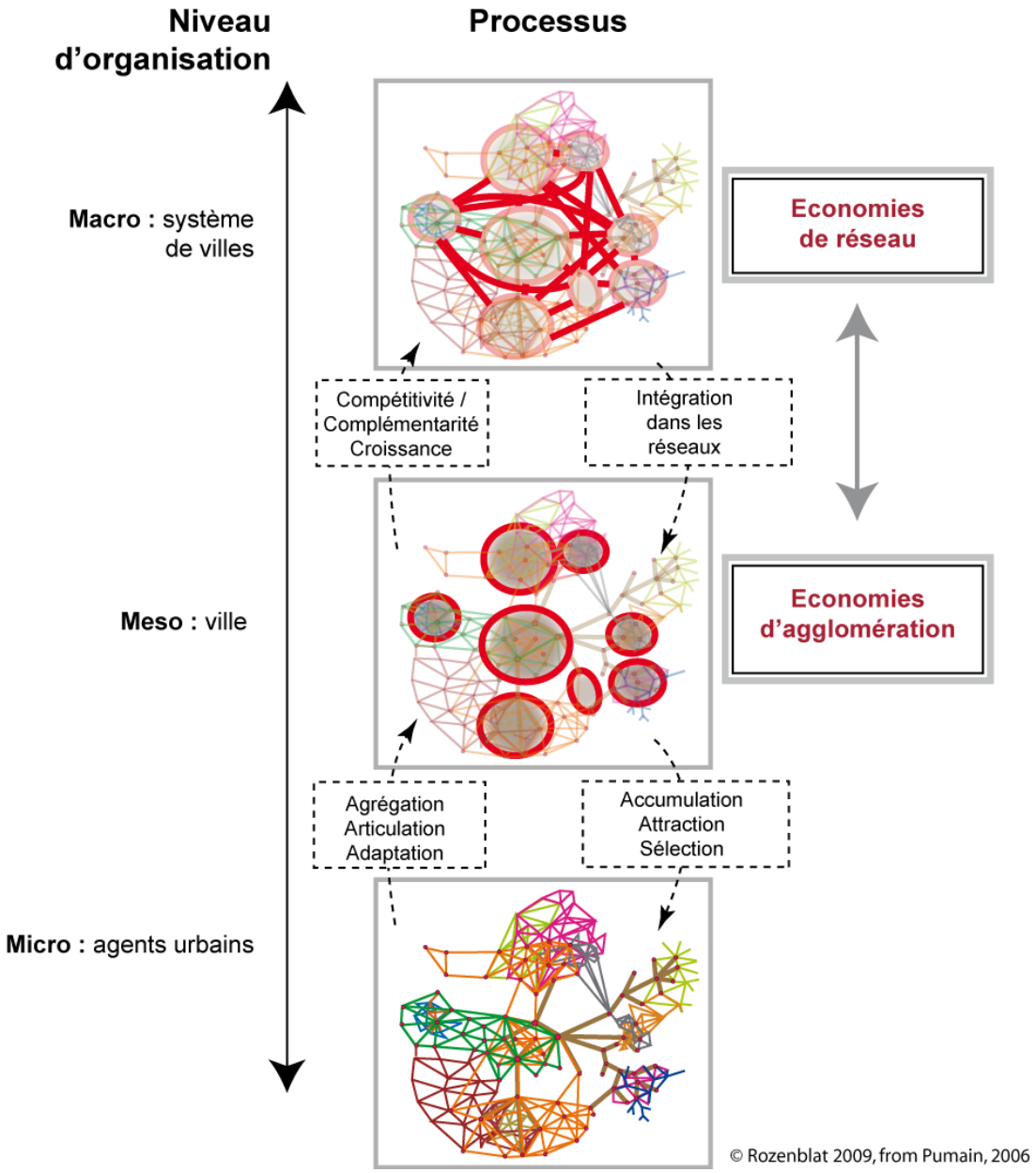
Les mesures empiriques de centralités urbaines au sein des réseaux mondiaux de filiales sont généralement élaborées sur la base d'échantillons de réseaux d'entreprises qui sont sommés pour donner des nœuds (villes) et des liens (entre plusieurs villes) (Pred 1974, 1977 [88-89] ; Cohen 1981 [30] ; Rozenblat & Pumain 1993, 2007 [97-98] ; Taylor 2001 [97-98] ; Alderson & Beckfield 2004 [1] ; Derudder 2006 [35]). Cette méthodologie a été contestée, principalement parce qu'elle ne tient pas compte des effets multiplicateurs directs ou indirects, comme les interactions locales entre les entreprises qui soutiennent les économies d'agglomération au sein des villes (Rozenblat 2010 [96]). Ces interactions locales intra-urbaines augmentent le poids des liaisons interurbaines car elles améliorent leur efficacité : lorsqu'une nouvelle relation intègre une ville, déjà composée d'interactions importantes entre les acteurs locaux ou étrangers, le bénéfice est multiplié en proportion de la capacité à mobiliser ces interactions locales. Les interactions locales entre les firmes multinationales se composent de différents niveaux d'implication dans les réseaux locaux : sous-traitances, alliances stratégiques industrielles ou technologiques, accès aux marchés, utilisation d'une main-d'œuvre qualifiée et de savoir-faire locaux, de services, d'institutions, d'infrastructures. Toutefois, l'implantation d'une entreprise dans une ville permet aussi à cette dernière d'atteindre des réseaux industriels ou

sociaux plus « globaux » qui se déploient à différentes échelles géographiques et économiques. Les villes permettent aux entreprises de communiquer et de profiter des réseaux sociaux interentreprises, grâce à la proximité spatiale d'autres agents et de certains ensembles organisés d'agents, tout en réduisant les coûts de transaction et en augmentant les valeurs des divers échanges (Williamson 1975, 1985 [116] ; Powell 1990 [87] ; Zajac & Olsen 1993 [117]).

## Le déploiement des réseaux dans un système urbain multi-niveaux

Les entreprises (en particulier celles qui sont multinationales) augmentent la valeur de leur production grâce à des organisations mondiales de chaîne de valeur, qui sont basées sur des réseaux de transaction intra et inter-entreprises ainsi que sur des réseaux de niveau micro, orientés vers la société dans son ensemble (Figure 1).

**Figure 1 :** Les trois niveaux d'organisation des villes



Quelle que soit leur ampleur spatiale, tous ces réseaux sont créés, maintenus ou détruits par les entreprises ou organismes par le déploiement de leurs actifs ou de relations. Ce déploiement est exclusivement effectué dans le but de maintenir ou d'améliorer la position de l'entreprise dans un espace dont la structure est identifiée et comprise à différentes échelles spatio-temporelles (Pumain 2006, p.172 [91]). Dans cet espace, un lieu d'accessibilité instantanée ou quotidienne est privilégié et agit comme levier sur le territoire des réseaux locaux où des ressources matérielles, institutionnelles et d'information sont inégalement élaborées, partagées et enrichies. Cette proximité géographique (niveau méso) se développe la plupart du temps dans les villes et les régions urbaines. Quelques rares implantations de multinationales sont situées dans de très petites villes ou loin de toute zone urbaine, permettant aux entreprises d'accéder à des ressources spécifiques ou à des bas salaires.
Denise Pumain (2006) [91] a particulièrement mis l'accent sur le niveau méso de la ville :

"Des propriétés nouvelles émergent et caractérisent la ville comme une entité collective ... Certaines de ces nouvelles propriétés peuvent être directement liées à l'intention de certaines institutions, mais la plupart du temps, elles sont inattendues (et parfois non désirées) et résultent de l'interaction collective". (p.172)

Vue sous cet angle, la ville peut être considérée comme un niveau intermédiaire dans l'organisation des sociétés, une proximité qui sert de catalyseur pour faciliter les connexions dans le système social à l'échelle locale (Pumain, Sanders, et St-Julien 1989 [92] ; Pumain 1997 [90] ; Batty 2005 [12], 2006 [13]). Les actions des agents urbains définissent leurs objectifs et ces agents s'adaptent les uns aux autres par des réseaux complexes organisés dans des institutions plus ou moins formelles, des sociétés ou associations (Porter, 1998 [86] ; Enright 1998 [42] ; Karlsson et *al.* 2005 [64]). Ainsi, les villes sont bien plus que de la concentration spatiale. Les processus d'auto-organisation des liens entre les individus et les groupes forment des réseaux qui produisent des processus d'agglomération, d'accumulation et d'attraction. Les coûts de transaction diminuent (Williamson 1975 [116]) et les avantages de transaction s'accroissent (Zayac & Olsen 1993 [117]) à travers l'émergence de réseaux structurés et réglementés, où la probabilité de tirer bénéfice de tous liens s'accroît également (Powell 1990 [87]). Ainsi, les villes sont définies comme des connecteurs majeurs de réseaux. Ces réseaux sont le résultat de stratégies développées au niveau micro des jeux d'acteurs et s'étendent à l'échelle mondiale où les concurrences et les alliances entre les réseaux des firmes multinationales se développent. Les différents réseaux mondiaux tels que les entreprises multinationales bénéficient de la capacité de chacun de leurs nœuds spatiaux (les villes) à prospérer par l'apport de richesse et par leur aménagement améliorant leur opérationnalité. Les liens menant à ces noeuds sont puissants, non seulement par la présence des établissements eux-mêmes, mais aussi grâce au milieu local qu'ils peuvent atteindre. Les interactions interurbaines sont donc renforcées par ces liens forts.

Le système urbain dans son ensemble (niveau macro) est formé par l'interaction des accessibilités instantanées à l'échelle régionale, nationale, continentale ou mondiale. Il est guidé par les stratégies globales des acteurs, qu'elles soient coopératives ou concurrentielles, orientées vers les marchés, la connaissance humaine ou les moyens matériels (Berry 1964 [17] ; Pred 1974 [88] ; Pumain, Sanders, et St-Julien 1989 [92] ; Sanders 1992 [87]). Le rôle crucial joué par le niveau méso-géographique comme un lieu d'organisation, d'émulation, de reproduction et de sélection des réseaux, devient évident lorsqu'il est replacé dans le cadre de ce niveau macro. La complémentarité et la compétitivité entre les agents situés dans des villes différentes, augmentent d'autant plus que les infrastructures et les législations permettent l'intégration des réseaux. Les réseaux de grandes entreprises multinationales jouent un rôle particulièrement important dans l'intensification de cette intégration urbaine au niveau macro. Par la mise en place de leurs filiales et unités de production et le tissage de leurs réseaux d'échanges internes et externes, ces sociétés positionnent chaque environnement urbain dans un système complexe d'interdépendance. L'espace ainsi déployé est donc un territoire composé de multiples connexions de réseaux, qui est délimité par le fait d'être ou de ne pas être connecté au réseau (Castells 2009 [28]), et dont les pouvoirs respectifs peuvent être identifiés. De ce point de vue, on peut donc parler d'un « territoire réticulaire » (Veltz 1996 [110] ; Rozenblat 2007, 2010 [95-96]).

Le développement de synergies à l'intérieur des villes et entre les villes se renforcent mutuellement (Marshall 1920 [72] ; Ohlin 1933 [81] ; Hoover 1937, 1948 [59-60] ; Jacobs 1969 [62] ; Henderson 1988 [58] ; Castells 1996 [27] ; Ellison et Glaeser 1997 [40] ; Camagni 1999 [23] ; Duranton et Puga 2004 [39] ; Rozenblat 2004 [39]). Les valeurs des réseaux sont

créées au niveau de chacun des partenaires ainsi que dans leurs interactions économiques, de gouvernance de l'entreprise et des propriétés des territoires où ils sont insérés (Gereffi 1996 [48] ; Gereffi et *al*. 2005 [50]). S'ajoutent aux proximités géographiques des proximités économiques dans lesquelles se cristallisent les interdépendances des villes dans le système interurbain : le niveau macro-géographique articule les processus qui se produisent au niveau méso-économique de villes et lieux éparpillés (Zimmermann 2002 [118]).

Ainsi, trois niveaux définissent des processus spécifiques : des relations entre des unités prises deux à deux (micro), des relations collectives de proximité géographique locales intra-urbaines ou régionales (méso) et, au niveau collectif interurbain, l'articulation de ces processus locaux intra-urbains (macro). Ces niveaux de processus sont à distinguer des échelles géographiques qui représentent, quant à elles, des variations de périmètre dans l'espace permettant un zoom sur une portion d'espace où les réseaux sont observés et analysés. Par exemple, on peut comparer les processus au niveau méso de la ville avec un échantillon de villes à l'échelle mondiale (Feser & Sweeney 2002 [44] ; Enright 2000, 2003 [42-43] ; Feser, Renski & Koo 2007 [45]). Sur la Figure 1, l'échelle géographique des réseaux reste la même alors que seuls les niveaux de processus qui affectent les réseaux diffèrent. Les niveaux micro, meso et macro décrivent les mêmes réseaux, mais les différentes sciences sociales soulignent des processus particuliers qui se produisent à chacun de ces niveaux (Tableau 1).

**Tableau 1 :** Processus de réseaux de firmes selon leur niveau urbain

| Niveaux | Types de réseaux | Disciplines dominantes | Principales théories | Concepts ou processus | Principaux auteurs |
|---|---|---|---|---|---|
| Macro | inter-firmes | Géographie, Science Régionale, Economie | Localisation | Coûts de la distance | Weber (1909) [114], Isard (1951) [61] |
| | intra-firmes | | Globalisation | Compétitivité, complémentarité | Pred (1974, 1977) [88-89], Friedmann (1986) [46], Hall (1986) [56], Taylor, Derudder, Witlox (2000) [108], Rozenblat, Pumain (1993, 2007) [98-99], Kratke (2007), [65] Wall (2009) [112] |
| Meso | inter-firmes | Géographie, Science régionale, Economie, Sociologie | Développement spatial endogène | Economies d'agglomération | Marshall (1920) [72] , Ohlin (1933) [81] , Hoover (1948) [60], Henderson (1988) [58], Krugman (1993) [66] , Fujita (1998), Ellison & Glaeser (1997, 2007) [40-41], Camagni (2002) [23], Duranton & Puga (2004) [39], Capello (2001, 2009) [24-25] |
| | | | Districts Industriels | Clusters, flexibilité, spécialisation | Bagnasco (1987), Becattini (1987) [14], Porter (1998, 2004) [86], Enright (1998 2003 [42-43]), Scott (1988, 2001[104]), Storper Venable (2004) [107], |
| Micro | intra et inter-firmes | Sociologie, Economie politique, Management, communication | Coûts de transaction | Contrats, rationalité limitée, opportunisme | Coase (1937) [29], Hayek (1948), Simon (1957) [106], Williamson (1975, 1990) [106], Zajac & Olsen (1993) [117], Powell (1990) [80], |
| | | | Réseaux sociaux | Structure des réseaux sociaux, « embeddedness » | Granovetter (1973, 1985) [54], Burt (1982, 1992, 2005) [20-21], Powell (1990) [87], Grabher (1993) [53], Uzzi (1996) [109]), Walker et al. (1997) [111], Gulati et *al.* (2000) [55], Monge & Contractor (2003) [76], |

*© Rozenblat, 2010*

Le tableau 1 décrit comment, à chacun de ces niveaux, des théories ont été développées par certaines disciplines des sciences sociales. Aucune de ces sciences n'intègre l'ensemble des niveaux mais la plupart les présupposent implicitement par des processus top-down, partant du niveau macro, ou par des processus bottom-up, partant du niveau micro. Nous suggérons que c'est entre ces deux types de processus ascendants et descendants, partant respectivement des niveaux micro et macro, que se constitue le niveau meso. Ce niveau intermédiaire qui définit la ville comprend des processus intra-urbains d'effets multiplicateurs dus aux interactions entre les réseaux venant de l'extérieur et entre ces mêmes réseaux et l'environnement local.

## Des processus ascendants partant du niveau micro des réseaux

Toutes les activités reposent sur des réseaux sociaux qui soutiennent l'organisation des flux de ressources, de R&D, de communication et de diffusion culturelle entre les différentes parties des entreprises, de coordination de la production et de la commercialisation, de l'offre et de la demande de services à différentes étapes de l'élaboration des produits. Des réseaux interentreprises reflètent différents niveaux d'interaction et de formes, comme la sous-traitance, les alliances stratégiques, les joint-ventures, ou la propriété. Tous les liens entre les entreprises et à l'intérieur des entreprises génèrent des coûts de transaction (Williamson 1975) [116] mais ils permettent également aux entreprises d'acquérir des avantages transactionnels de performance, d'innovation et parfois de flexibilité (Zayac & Olsen 1993) [117]. Les externalités de réseau-produits sont principalement liés à la valeur des réseaux qui dépendent du nombre, de la qualité et de la diversité de leurs participants (Rohlf 1974 [93] ; Antonelli 1992 [8] ; Capello 2000 [24]). Les approches transactionnelles, couplées au concept de rationalité limitée (Simon 1962) [106], permettent de comprendre le comportement des agents dans les processus de mise en réseau, où les liens ne sont pas maximisés mais constituent plutôt des solutions satisfaisantes à faible coût.

Les formes de gouvernance des réseaux d'entreprises multinationales sont censées, selon les théories classiques, minimiser les coûts de transaction (Coase 1937) [29] ; Williamson 1975 [116]). Ces approches ont été critiquées par Powell (1990) [29]. Celui-ci propose de sortir de l'opposition manichéenne des réseaux aléatoires liés aux marchés, aux réseaux arborescents liés aux organisations hiérarchiques (Williamson 1975) [116], et d'adopter une approche des réseaux se composant d'une série séquentielle de transactions effectuées dans un contexte d'interactions généralisées. L'objectif fonctionnel de la formation et du maintien d'un réseau est de saisir les savoir-faire tacites (Nelson et Winter 1982) [80] d'accroître la flexibilité, et d'améliorer la capacité d'adaptation aux conditions économiques changeantes, en exploitant préférentiellement les relations de confiance qui augmentent la qualité et la durée des interactions.

L'ensemble du réseau est inégalement dense et offre des gains de capital social dans les parties à densités les plus élevées (Bourdieu 1980 [18] ; Coleman 1990 [31]). Dans les parties peu denses au contraire, peuvent se former des « *trous structuraux* » qui sont des sortes de « niches » de zones à forte capacité d'exploitation malgré leur faible densité. Ces positions d'intermédiarité donnent aux agents qui les occupent le pouvoir de connecter des agents tiers qui ne le seraient pas autrement : c'est l'exploitation d'une rente de situation dans le réseau (Burt 1992], 2005 [20-21], Walker et *al*. 1997 [111). Des stratégies de management de ces réseaux guident le comportement des entreprises, en visant à insérer chaque partie dans un bon réseau et à trouver des niches de performance dans plusieurs parties éparses du réseau (Burt 1992, 2005 [21] ; Uzzi 1997 [109]). Ainsi, le réseau de l'entreprise apporte un potentiel d'avantage concurrentiel. Parfois, plusieurs partenaires s'ancrent fortement dans une coopération les uns avec les autres ce qui conduit à l'*embeddedness* (encastrement), voire à la fermeture dans les cas extrêmes (Granovetter 1985 [54] ; Uzzi 1997 [1099] ; Gulati et *al.* 2000 [55]). Grabher (1993) [53] explique l'encastrement comme se référant « au fait que l'action économique, comme toute action sociale, est orientée par les relations dyadiques [soit deux à deux] et par la structure de l'ensemble du réseau de relations » (p. 4). Au niveau des réseaux d'entreprises, les processus de coopération et de concurrence, la synergie professionnelle, l'apprentissage interactif, et la flexibilité des associations (Grabher 1993) [53] se réalisent par des économies d'intégration verticale ou horizontale (Capello 2000) [24]. Les synergies horizontales sont des externalités de réseau semblables à celles produites par des biens de club (Buchanan 1965) [19], qui se réfèrent à des situations où les entreprises collaborent dans le but d'obtenir des économies d'échelle (Capineri et Kamann 1998) [26]. Les synergies verticales, d'autre part, sont fondées sur des relations complémentaires.

Ce sont toutes ces formes et toutes ces intensités relationnelles qui sont comprises dans la ville vue comme un réseau. En résumé, d'une part la densité des réseaux produit du capital social mais d'autre part, de faibles densités peuvent également être considérées comme des occasions d'exploiter des positions stratégiques, telles que celles décrites par les trous structuraux (Burt 1992, 2005 [20-21] ; Walker et *al.* 1997 [111). En outre, les réseaux intra-entreprises sont plus denses que les réseaux inter-entreprises et des réseaux stratégiques développent des synergies horizontales et verticales et sont influencés par des liens

directs et indirects. La structure du réseau est un facteur important pour réduire les coûts transactionnels. Les villes offrent des structures qui contribuent fortement à la cohésion de cette structure et à la visibilité mutuelle des réseaux.

## Des processus descendants partant du niveau macro des systèmes urbains

Le développement urbain basé sur des clusters spécialisés dépend de l'équilibre entre le niveau méso de la ville et le niveau macro des réseaux de villes. En ce qui concerne les réseaux de longue portée géographique, qui dépendent de proximités topologiques, des sortes de « pipelines » se développent entre les villes canalisant des flux qui se renforcent mutuellement en favorisant les transports (lignes aériennes). Ces canaux s'appuient sur l'articulation de divers ensembles d'interactions intra-urbaines. Avec l'augmentation des coûts de la distance, le niveau d'incertitude s'accroît et freine les investissements trop élevés (Bathelt 2007) [10], les liens interurbains sont choisis avec davantage de prudence et se développent préférentiellement dans les liens intra-entreprises. Deux principaux avantages sont offerts par ces réseaux intra ou inter-entreprises de longue portée : l'accès à une diversité de marchés au niveau macro et l'accès à des pôles spécialisés comprenant des travailleurs qualifiés qui résultent de dynamiques d'apprentissage et de concurrence au niveau méso intra-urbain.

L'accès aux différents marchés conduit à partager l'apprentissage au sein de groupes de sociétés qui déploient de nombreuses filiales, chacune axée sur un marché spécifique (Dunning 1992, 2002) [37-38]. Ces synergies bénéficient en particulier des similitudes qui existent entre les processus à l'intérieur des marchés urbains et le potentiel de diffusion technologique et culturel qui existe entre les villes, accessibles par des liens de longue portée.

Différents processus apparaissent lorsque les entreprises développent une division du travail qui s'appuie sur les spécialisations de chaque ville (Porter 1996 [85] ; Enright 2000 [42]). Les chaînes globales de valeur favorisent le développement local en intégrant un nombre croissant de filiales (Gereffi 1996 [48] ; Doz et *al.* 2001 [36] ; Gereffi et Sturgeon 2005 [50]). Les spécialisations locales sont fondées sur les savoir-faire qui ne sont pas facilement transférables d'un environnement à un autre (Badaracco 1991 [9] ; Colletis & Pecqueur 1996 [32]). En retour, les spécialisations améliorent les capacités locales qui sont exploitées dans la compétition entre les entreprises (Castells 1996 [27] ; Rutherford 2005 [100]). Chaque groupe de sociétés possède son propre espace interurbain et articule les diverses qualités des villes, réalisant un équilibre temporaire dans un réseau diversifié. Alors que « la plupart des industries sont aujourd'hui organisés au niveau mondial et géographiquement fragmentée » (Gereffi, Denniston & Hensen 2007 [49]), les villes en perpétuelle transformation sont nourries par ces interactions interurbaines (Bathelt 2004 [11]) tandis que la compétitivité des entreprises et leur stabilité sont fondées sur les systèmes de villes (Neal 2008 [79]).

Suite aux travaux de Pred (1974, 1977) [88-89], les études empiriques sur les réseaux des firmes multinationales entre les villes (Cohen 1981 [30] ; Friedman 1986 [46] ; Rozenblat, Pumain 1993 [98] ; Taylor 1996 [108]) n'ont considéré que les relations intra-firmes, en grande partie en raison du manque de données sur les relations inter-entreprises. Deux approches ont été développées dans cette perspective. Selon la première approche, les relations sont caractérisées par les liens du siège vers ses filiales. Cette conception hiérarchique de l'entreprise multinationale est toujours pertinente parce que la propriété des sociétés confère à la fois le pouvoir de décision stratégique et un important transfert monétaire entre entreprises liées par la propriété (Mucchielli 1998 [78]). Les liens de propriété ont une forte influence sur la stratégie globale des entreprises bien que l'on puisse également examiner comment la division du travail est organisée au sein des groupes de sociétés. Cette dernière approche considère toutes les composantes de l'entreprise par le biais des graphes non orientés, sans distinguer le siège de ses filiales (Taylor 2001 [108] ; Derruder 2006 [35]). Cette méthodologie a essentiellement, par manque de données, considéré tous les liens possibles entre les entreprises d'un groupe, en faisant valoir que les connaissances, les pratiques, et l'organisation des chaînes de valeur mondiales sont contenues dans ces réseaux. La chaîne globale de valeur comprend en fait les deux types de liens, hiérarchiques et non-hiérarchiques.

Dans cette chaîne globale de valeur, les liens interurbains articulent un ensemble d'actifs exploités dans les réseaux urbains locaux. Ainsi, l'attractivité globale devrait tenir compte des capacités internes des villes qui créent des

effets cumulatifs (Zimmermann 2002) [118]. Comme Hall et Pain (2006) [57] le suggèrent, « *le degré de connectivité entre les villes est le reflet de la concentration des services de pointe en leur sein; mais à l'inverse, cette concentration reflète le degré de connectivité réel et potentiel entre elles : ce processus est circulaire et cumulatif* » (p. 7). Nous ajoutons que ce processus circulaire n'est pas seulement un effet de la concentration des entreprises, mais aussi de leurs interactions locales. Les réseaux interurbains ont une grande influence sur les forces locales des processus d'agglomération (Scott, 1988 [103] ; Storper, 1992 [107] ; Bathelt et al, 2004 [11] ; Bathelt, 2007 [10]). Le point de vue opposé est également vrai, mais n'a jamais été souligné, à savoir que les processus d'agglomération ont des effets sur les liaisons interurbaines et sur la compétitivité des villes (Rozenblat, 2010) [96].

## La ville comme connecteur entre les niveaux micro et macro

Le passage du niveau de l'entreprise à celui de la ville doit prendre en compte les processus qui se développent dans chaque ville au niveau collectif. En effet, de nombreux processus permettent l'émergence de propriétés urbaines par lesquelles « *le tout devient non seulement plus, mais quelque chose de très différent de la somme de ses parties* » (Anderson, 1972 [6], cité dans Lane, 2006). Les processus liés aux réseaux décrits ci-dessus se développent dans les villes grâce à la proximité spatiale. Sous certaines conditions, telles que certains niveaux de masse critique (Marwell & Oliver, 1993) [73], les réseaux peuvent enclencher des effets cumulatifs et des multiplicateurs tels que les économies d'agglomération (Marshall, 1920 [72] ; Ohlin, 1933 [81] ; Hoover, 1937 [59]). Les économies d'agglomération comprennent traditionnellement trois types d'effets distincts (Ohlin, 1933 [81]; Hoover, 1937, 1948 [59-60]; Camagni, 1996 [22]) :

- des économies d'échelle, qui sont internes à chaque organisation (Krugman, 1993 [66]) ;
- des économies de localisation, qui sont internes à un secteur donné (Marshall, 1920) [72] ;
- des économies de l'urbanisation, qui correspondent à des services généraux aux entreprises et aux particuliers mais qui deviennent de plus en plus spécifiques elles-mêmes.

Gordon et McCann (2000) [52] proposent que les économies d'agglomération soient distinguées de la théorie de la localisation (Weber, 1909, 1929 [114] ; Isard, 1951 [61] ; Moses, 1958 [77] ; McCann, 1995 [68]) et des modèles basés sur les réseaux sociaux (Powell, 1990 [87]; Granovetter, 1985 [54] ; Amin & Thrift, 1992 [5]). Leur argument est fondé sur les différentes politiques sous-entendues par chacun de ces trois modèles idéaux. Allant plus loin, nous suggérons que ces trois modèles se distinguent essentiellement par les différents niveaux géographiques qu'ils impliquent. Les modèles de localisation sont appliqués à l'inter-urbain (macro), tandis que les économies d'agglomération sont pertinentes à l'échelle intra-urbaine (intermédiaire), et les réseaux sociaux fonctionnent au micro-niveau des agents (Tableau 1). Toutefois, les réseaux sociaux transcendent les trois niveaux puisque la production de microprocessus peut découler des économies d'agglomération (niveau intermédiaire) ou de l'attractivité régionale (niveau macro). Aux trois niveaux, les réseaux sociaux sont inter-reliés par des interactions multi-niveaux. Certains facteurs agissent au niveau inter-personnel (dyadique), tandis que d'autres facteurs agissent au niveau collectif des économies d'agglomération (agents triadiques ou plus dans les interactions), tandis que des facteurs résiduels agissent au niveau interurbain dans les concurrences pour l'attractivité de localisation et dans la complé-mentarité de la division spatiale du travail.

Les économies d'agglomération fonctionnent comme des leviers à la fois pour des clusters spécialisés et pour des villes diversifiées, en démultipliant les retombées de l'intégration des entreprises locales dans des systèmes complexes d'échanges avec d'autres entreprises. Il est utile de les décrire par leurs aspects verticaux ou horizontaux (Maskell, 2001 [74] ; Maskell et Malmberg, 2002 [75] ; Bathelt, 2004 [11] ; Johansson, 2005 [63]) en fonction des interactions possibles, directes ou indirectes (Tableau 2).

**Tableau 2 :** Liens intra et inter firmes stimulés par la proximité urbaine

| Types de réseaux | Vertical | | | Horizontal | |
|---|---|---|---|---|---|
| | Direct | | Indirect | Direct | Indirect |
| Intra-firme | Division du travail, transferts financiers, pouvoir de décision | | Coordination dans la chaîne globale de valeur | Coordination managériale, flexibilité | Partage de ressources |
| | | | | Flux d'informations technologiques et stratégiques | |
| Inter-firme | Intra-secteur | Sous-traitance, flexibilité, diffusions technologiques | Appariement au marché du travail, apprentissage, partage de ressources locales | Alliance stratégique, adaptation aux « marchés intelligents », partage des risques | Adéquation au marché du travail, apprentissage, partage de ressources locales |
| | Inter-secteur | Sous-traitance stratégique, alliance d'innovation | Partage de ressources locales, diversification d'activités | Alliance stratégique, diffusions technologiques | Partage de services, institutions, universités, ressources locales générales, diversité de l'activité, qualité de vie pour les travailleurs |

*© Rozenblat 2010*

Les liens horizontaux se développent entre les entreprises d'un même secteur de production (Bathelt 2004) [11]. Ils peuvent aussi englober des entreprises de différents secteurs se concentrant sur les transferts technologiques, ce qui peut conduire à des alliances stratégiques. Des liens verticaux sont décrits comme des liens de sous-traitance qui peuvent être intra- ou inter-entreprises et intra- ou inter-secteurs. Toutes les relations possibles impliquent des liens directs ou indirects. Des liens directs mobilisent des économies de localisation, tandis que des liens indirects traitent à la fois des économies de localisation et de l'urbanisation. De nombreux liens directs concernent également les services et peuvent donc être classés dans les économies d'urbanisation. Des micro-processus, comme le partage, l'appariement, et l'apprentissage (Duranton et Puga 2004) [39] transcendent les caractéristiques des entreprises et leur position relative en termes d'appartenance à une même activité ou à un même groupe, notamment par le biais des relations indirectes.

Les économies d'agglomération sont le plus souvent traitées à travers des hypothèses situées au niveau méso des villes (Henderson 1988 [58] ; Ellison et Glaeser 1997 [40], Rosenthal & Strange 2001[94] ; Ellison et *al.* 2007 [41]). Les économistes ont résumé ces processus par trois facteurs fondamentaux : (1) les frais de transport pour les input-output des sous-traitants ; (2) la mise en commun du marché du travail ; et (3) les retombées intellectuelles. Le premier processus concerne directement les relations verticales, tandis que les deux derniers peuvent être définis dans les relations verticales ou horizontales, qui peuvent être directes ou indirectes. Ces trois effets sont mesurés empiriquement par des indices de corrélation entre les activités entre les villes (Ellison et Glaeser 1997, 2007) [40-41].

Comme les coûts de transaction sont plus faibles dans les relations intra plutôt qu'inter-entreprises, les réseaux sont plus denses et plus résistants dans un contexte intra-firme et plus épars dans un contexte inter-entreprises et inter-activités (Walter et *al.* 2007 [113]). Les réseaux intersectoriels devraient également être moins denses que les réseaux intra-sectoriels en raison des coûts élevés de transaction de communication, des écarts de pratiques et de contextes industriels différents. Inversement, les avantages de transaction de liens dépendent de la nature stratégique de l'opération et sont, en principe, supérieurs pour les liaisons inter-entreprises dans une même activité. En outre, l'avantage cumulatif se produit lorsque les réseaux sont plus denses, grâce à l'avantage de développer un ensemble de liens à partir d'un lien unique. C'est là un type d'hypothèse que l'on considère du point de vue du capital social. Du point de vue opposé des trous structuraux, toutefois, les réseaux inter-activités apportent plus d'avantages que tous les autres réseaux dans un contexte d'alliance technologique stratégique, car c'est dans ce cas que peuvent émerger les innovations majeures issues de transferts originaux d'un milieu vers un autre.

L'ampleur des effets multiplicateurs dépend du niveau d'imbrication des réseaux spécialisés (Granovetter 1983) [54]. Les contacts face-à-face facilitent considérablement le transfert des informations non codifiées (Nelson et Winter 1982 [80] ; Malmberg et *al.* 1996 [70] ; Van den Berg et *al*. 2001 ; Storper & Venable 2004 [107] ; Scott 2004) [105]. Les structures régionales et urbaines qui nourrissent le renouvellement des grappes industrielles doivent demeurer aussi ouvertes que possible aux milieux spécialisés qui permettent de situer les pôles dans le réseau mondial (Markusen, 2000 [71] ; Bathelt et *al.* 2004) [11]. L'objectif est de parvenir à un équilibre durable entre l'enracinement interne et externe à la ville. Grabher (1993) [53] l'explique de la manière suivante :

> "Too little embeddedness may expose networks to an erosion of their supportive tissue of social practices and institutions. Too much embedded-dness, however, may promote a petrifaction of this supportive tissue and, hence, may pervert networks into cohesive coalitions against more radical innovations." (pp.25-26)

Ainsi la ville forme, à un moment donné, le lieu de tension entre ces processus ascendants et descendants. L'équilibre dynamique de ce système change perpétuellement sous l'influence de l'évolution des réseaux micros, et de la dynamique de l'environnement externe à la ville formé par les autres villes, les environnements socio-économiques et les innovations qui les transforment.

## Conclusion

La ville appréhendée comme la rencontre entre les dynamiques top-down et bottum-up permet donc véritablement de souligner ses propriétés de connecteur. Au niveau micro, elle augmente les probabilités de rencontre improbable entre différents réseaux, favorise l'accumulation du capital social et des rentes de position (trous structuraux) par la densité des réseaux qu'elle réunit. Au niveau macro, elle apporte les masses critiques nécessaires au développement, au maintien et au renouvellement de liaisons de longue portée. Le niveau meso est composé de processus qui permettent le passage des actions interindividuelles à des mouvements collectifs, dont l'auto-organisation est à la fois le résultat des aspirations individuelles du niveau micro et leur inscription dans un environnement macro de portée géographique plus large. En ce sens, la ville est un connecteur vertical entre plusieurs niveaux géographiques de processus.

Ces processus ne s'inscrivent bien souvent pas directement dans l'espace et, comme la « chaîne globale de valeur » au niveau macro ou l'homophilie au niveau micro, ils se déploient dans plusieurs dimensions, économiques, sociales, culturelles, politiques qui ont leur propre logique et sont composés de différents niveaux d'organisation pour lesquels la ville représente, de manière variable, un connecteur entre le micro et le macro. La ville est donc un connecteur multidimensionnel, favorisant l'articulation entre ces multiples dimensions. Si l'approche multidimensionnelle des réseaux commence à se parer d'outils adaptés en sociologie et science de la communication (Contractor et *al.* 2011) [33], il reste à l'adapter à une approche de la ville qui prendrait en compte à la fois les aspects multidimensionnels et multiniveaux dans une perspective dynamique. L'agenda des prochaines années dans les recherches urbaines consiste sans doute à relever le défi du développement de cette approche multidimensionnelle et multi-niveaux qui ne pourra se faire, à notre sens, que dans un travail conceptuel multidisciplinaire (avec les sociologues, économistes, managers, sciences de la communication, planificateurs etc.) et dans un travail méthodologique intégrant l'apport d'autres sciences comme la physique, les sciences de l'environnement et l'informatique (Pumain 2006 [91]) ; Weisbuch, Zwirn 2010 [115] ; Parshani et *al.* 2010 [82] ; Garas et *al.* 2010) [47].

## Bibliographie


[1] Alderson A.S., Beckfield J., 2004
Power and position in the world city system
*American Journal of Sociology,109, 4, 811-851*

[2] Aldrich H., 1976
Resource dependence and interorganizational relations: Relation between local employment services offices and social service sector organizations
*Administration and Society, 7. 419-454*

[3] Allen J.,1999
Cities of power and influence: settled formations
*dans : Allen J., Massey D., Pryke M.. Unsettling cities, Routledge. Chap. 5, 182-227*

[4] Allen J.,2008
Powerful City Networks : More than Connections, Less than Domination and Control
*Globalization and World Cities Research Bulletin 270*

[5] Amin A., Thrift N., 1992
Neo-Marshallian Nodes in Global Networks
*International Journal of Urban and Regional Research 16 (4), 571-587*

[6] Anderson P., 1972
More is different: Broken symmetry and the hierarchical nature of science
*Science, 177, 393-396*

[7] Anselin L., 1995
Local indicators of spatial association – LISA
*Geographical Analysis, 27, 2, 93-115*

[8] Antonelli C. (Ed.), 1992
The Economics of Information Networks, North Holland, Amsterdam

[9] Badaracco J.L., 1991
The knowledge link : how firms compete through strategic alliances
*Boston, Harvard Business School Press*

[10] Bathelt H., 2007
Buzz-and-pipeline dynamics : towards a knowledge-based multiplier model of clusters
*Geography compass 1/6. 1282-1298*

[11] Bathelt H., Malmberg A., Maskell P., 2004
Clusters and knowledge: Local buzz, global pipelines and the process of knowledge creation
*dans : Progress in Human Geography, Vol. 28, No. 1, 31-56*

[12] Batty M., 2005
Cities and Complexity : Understanding Cities with Cellular Automata, Agent-Based Models and Fractals
*The MIT Press, 565 p.*

[13] Batty M., 2006
Hierarchy in cities and city systems
*dans D. Pumain (Ed.) (2006)*
Hierarchy in Natural and Social Sciences
*Springer, Chap. 6,143-16*

[14] Beccattini G. (ed.), 1987
Mercato e Forze locali: Il distretto Industriale
*Bologna, Il Mulino*

[15] Begg I., 1999
Cities and competitiveness
*Urban Studies, 36, 5-6, 795-809*

[16] Belussi F. and Pîlotti L., 2002
Knowledge creation, learning and innovation in Italian industrial districts
*Geografiska Annaler 84B, 125–39*

[17] Berry B.J.L., 1964
Cities as systems within systems of cities
*dans : Friedmann J., Alonso W. (Eds.), Regional development and planning, MIT Press (also in Paper of Regional Science Association, 1964, 13)*

[18] Bourdieu P., 1980
Le capital social. Notes provisoires
*Actes de la recherche en sciences sociales, vol.31, pp. 2-3*
[19] Buchanan J., 1965
An Economic Theory of clubs
*Economica, February. 1-14*
[20] Burt R. L., 1992
Structural Holes
*Cambridge, MA : Harvard University Press*
[21] Burt R. S., 2005
Brokerage and closure. An introduction to social capital
*Oxford University Press, 279 p.*
[22] Camagni R., 1996
Economie urbaine
*Economica*
[23] Camagni R., 1999
The city as a milieu : applying GREMI's approach to urban evolution
*Revue d'Économie Régionale et Urbaine (RERU), 3, 591-606*
[24] Capello R., 2000
The City Network Paradigm : Measuring Urban Network Externalities
*Urban Studies, Vol. 37, No. 11, 1925-1945*
[25] Capello R., 2009
Indivisibilities, synergy and proximity : the need for an integrated approach to agglomeration economies,
*Tijdschrift voor Economische en Sociale Geografie – 2009, Vol. 100, No. 2, 145–159*
[26] Capireni Cr. Kamann D-J F., 1998
Synergy in Networks: Concepts
*dans : Button K., Nijkamp P., Priemus H. (Eds). Transport Networks in Europe : Concepts, Analysis and policies, E. Elgar, 35-56*
[27] Castells M., 1996
The rise of the Network Society, Oxford
*Blackwell*
[28] Castells M., 2009
Communication power
*Oxford University Press, 571p*
[29] Coase R.H., 1937
The nature of the firm
*Economica, 4, 386-405*
[30] Cohen R.B., 1981
The new international division of labor, multinational corporations and urban hierarchy
*dans : Dear M., Scott A.J. (eds.) Urbanization & Urban planning in capitalist society, Methuen, N.Y., 287-315*
[31] Coleman, J., 1990
Social Capital in the Creation of Human Capital
*American Joumal of Sociology, 94, 95-120*
[32] Colletis G., Pecqueur B., 1996
Les facteurs de concurrence spatiale et la construction des territoires
*dans : Peraldi et Perrin (dir.). Réseaux productifs et territoires urbains. Presses Universitaires du Mirail, 167-182*
[33] Contractor N., Monge P., Leonardi P., 2011
Multidimensional Networks and the Dynamics of Sociomateriality : Bringing Technology Inside the Network
*International Journal of Communication 5 (2011), 682–720*
[34] Dematteis G., 1995
Verso strutture urbane reticolari
*dans : G. Blanchi and I Magnani (eds.). Sviluppo Multiregionale : teorie, Metodi, Problemi. Milano*
*Franco Angeli. 121-132*

[35] Derudder B., 2006
On conceptual confusion in empirical analyses of a transnational urban network
*Urban Studies, 43(11), 2027-2046*
[36] Doz Y., Santos J., Williamson P., 2001
From global to metanational: how companies win in the knowledge economy
*USA, Boston, Harvard Business School Press*
[37] Dunning J.H., 1992
Multinational Enterprises and the Global Economy
*Wokingham*
[38] Dunning J.H., 2002
Regions, globalization, and the knowledge-based economy
*Oxford University Press, 520p.*
[39] Duranton G., Puga D., 2004
"Micro-foundations of urban agglomeration economies"
*dans : Henderson J.V., Thisse J.-F. (Eds.), Handbook of Regional and Urban Economics, vol. 4 Elsevier, Amsterdam, 2063-2117*
[40] Ellison G., Glaeser E., 1997
Geographic concentration in U.S. manufacturing industries: A dartboard approach
*Journal of Political Economy 105, 889-927*
[41] Ellison G., Glaeser E. H., Keer W. 2007
What Causes Industry Agglomeration ? Evidence from Coagglomeration Patterns Harvard
*Institute of Economic Research, Discussion Paper 2133*
[42] Enright M. J. (2000)
Regional Clusters and Multinational Enterprises: Independence, Dependence, or Interdependence ?
*International Studies of Management & Organization, 30 (2), 114-138*
[43] Enright M. J., 2003
Regional clusters : What we know and what we should know
*dans : Bröcker J. Dohse D., Soltwedel R. (Eds.). Innovative clusters and inter-regional competition,Springer, 99-129*
[44] Feser E.J, Sweeney S.H., 2002
Theory, methods and cross comparison of business clustering Industrial Location Economics
*dans : Mc Cann P., (Ed.), Cheltenham E.E., 222-259*
[45] Feser E., Renski H., Koo J., 2009
Regional cluster analysis with interindustry benchmarks
*dans : Goetz S.J., Deller S.C., and Harris T.R. (Eds.). Targeting Regional Economic Development, London : Routledge 213-238*
[46] Friedmann J., 1986
The World City Hypothesis
*Development and change, Vol. 17, 1, 69-84, re-printed in Knox P., Taylor P.J. (eds.), 1995, World Cities in a world system, Cambridge University Press, 317-331*
[47] Garas A., Argyrakis P ., Rozenblat C., Tomassini M., Havlin S., 2010
Worldwide spreading of economic crisis
*New Journal of Physics **12** 113043 1367-2630*
[48] Gereffi G., 1996
Global Commodity Chains: New Forms of Coordination and Control among Nations and Firms
*dans : International Industries, Competition and Change, Vol. 1, 4, 427-439*
[49] Gereffi G., Denniston R. Hensen M., 2007
North Carolina in the global economy: A value chain perspective on the state's leading industries
*Journal of Textile and Apparel, Technology and Management, 5*
[50] Gereffi G., Humphrey J., Sturgeon T. J., 2005
The Governance of Global Value Chains
*Review of International Political Economy, Vol. 12, 1, 78-104*
[51] Glaeser E.L, Sacerdote B.I, Scheinkman J-A., 2002
The social multiplier
*Harvard Institute of Economic Research, Discussion Paper Number 1968*
[52] Gordon I.R., McCann P., 2000
Industrial clusters: Complexes, Agglomeration and/or Social Networks?
*Urban Studies, 37, 3, 513-532*

[53] Grabher G. (Ed.), 1993
The Embedded firm
*On the socio-economics of industrial networks, Routledge*
[54] Granovetter M., 1985
Economic action and social structure. The problem of embeddedness
*American Journal of Sociology, 91, 481-510*
[55] Gulati R., Nohria N., Zaheer A., 2000
Strategic Networks.
*Strategic Management Journal, 21: 203-215*
[56] Hall P., 1966
The World Cities
*London, Weidenfeld and Nicolson*
[57] Hall P., Pain C., 2006
The polycentric metropolis: learning from Mega-City Regions in Europe
*London, Earthscan*
[58] Henderson J.V., 1988
Urban development: theory, fact, and illusion
*Oxford University Press, USA*
[59] Hoover E.M., 1937
Location theory and the shoe and leather industry
*Cambridge, Harvard University Press*
[60] Hoover E.M., 1948
The location of Economic Activity
*New York. Mc Graw-Hill*
[61] Isard W., 1951
Distance inputs and the space economy. Part II: The locational equilibrium of the firm
*Quarterly Journal of Economics, 65. 373-399*
[62] Jacobs J., 1969
The Economy of Cities
*Vintage Books. Random House. NY*
[63] Johansson B., 2005
Parsing the menagerie of agglomeration and network externalities
*dans : Karlsson et al. (Eds). Industrial Clusters and Inter-firm Networks, Edward Elgar Publishing,107-147*
[64] Karlsson Ch., Johansson B., Stough R., 2005
Industrial Clusters and Inter-firm Networks : An Introduction, in Karlsson et al. (Eds) Industrial *Clusters and Inter-firm Networks, Edward Elgar Publishing, 1-28*
[65] Krackhardt D., 1987
QAP partialling as a test for spuriouless
*Social Networks, 9, 171-186*
[66] Krugman P., 1993
First nature, second nature and metropolitan location
*Journal of regional science, vol. 33, 2*
[67] Lane D., 2006
Hierarchy, Complexity, Society
*dans : D. Pumain (Ed.). Hierarchy in Natural and Social Sciences. Springer. Chap. 4., 81-119*
[68] Mc Cann Ph., 1995
Rethinking the economics of location and agglomeration
*Urban Studies, 32, 3, 563-577*
[69] Malmberg A., 1996
Industrial geography : agglomeration and local milieu
*dans : Progress in Human Geography, 20(3), 392-403*
[70] Malmberg A., Sölvell O., Zander I., 1996
Spatial clustering, local accumulation of knowledge and capital
*Geografiska Annaler, 78B(2), 85-97*
[71] Markusen A., 2000
Typology of industrial districts
*dans : Benko G., Lipietz A (Eds.). La richesse des régions, PUF, coll. Economie en Liberté, 564 p.*

[72] Marshall A, 1920
Principles of Economics
*London. Mc Millan*
[73] Marwell G., Oliver P., 1993
The critical mass in collective action : a micro-social theory
*Cambridge University Press*
[74] Maskell P., 2001
Towards a knowledge-based theory of the geographical cluster
*Industrial and Corporate Change 10, 921–94*
[75] Maskell, P. and Malmberg, A., 1999
The competitiveness of firms and regions : 'ubiquitification' and the importance of localized learning
*European Urban and Regional Studies, 6, 9–25*
[76] Monge P. Contractor N., 2003
Theories of communication networks
*Oxford University Press, 406 p.*
[77] Moses L., 1958
Location and the theory of production
*Quarterly Journal of Economics, 78, 259-272*
[78] Mucchielli J-L., 1998
Multinationales et mondialisation
*Paris, Seuil, coll. Points économie, 373 p.*
[79] Neal Z.P, 2008
The duality of world cities and firms comparing networks, hierarchies, and inequalities in the global economy
*Global Networks 8, 1 (2008) 94–115*
[80] Nelson R.R., Winter S.G., 1982
An evolutionary theory of economic change.
*Cambridge. MA. Harvard University Press*
[81] Ohlin B., 1933
Inter-regional and international trade
*Cambridge. M.A. Harvard University*
[82] Parshani R., Rozenblat C., Ietri D., Ducruet C. and Havlin S., 2010
Inter-similarity between coupled networks
*Europhysics Letters (EPL), 92, pp.68002*
[83] Parsons T., 1957
The distribution of power in American society
*World Politics, 10, 123-143*
[84] Parsons T., 1963
On the concept of political power, Proceedings of the American Philosophical Society
*107, 232-62*
[85] Porter M., 1996
Competitive advantage, agglomeration economies and regional policy
*International Regional Science Review, 19, 85-90*
[86] Porter M., 1998
Clusters and the new economic of competition
*Harvard Business Review. (Nov/Dec), 77–90*
[87] Powell W., 1990
Neither market nor hierarchy : Network form of organization
*Research in organizational behavior, 12, 295-336*
[88] Pred A., 1973
Systems of cities and information flows
*Lund Studies in Geography, Serie B, 38*
[89] Pred A., 1977
City-systems in advanced economies
*Hutchinson University Library, London, 256 p.*
[90] Pumain D., 1997
Pour une théorie évolutive des villes
*L'Espace Géographique, 2, 119-134*

[91] Pumain D., 2006
Alternative explanations of hierarchical differentiation in urban systems
*dans : D. Pumain (Ed.) Hierarchy in Natural and Social Sciences. Springer. Chap. 7, 169-222*
[92] Pumain D., Sanders L., Saint-Julien Th., 1989
Villes et auto-organisation
*Economica*
[93] Rohlf J., 1974
A theory of interdependent demand for a communication service
*Bell Journal of Economics and Management Science. 5, 16-37*
[94] Rosenthal S.S, Strange W.C, 2001
The determinants of agglomerations
*Journal of Urban Economics, 50, 191–229*
[95] Rozenblat C., 2007
Villes et réseaux « petits-mondes
*dans : Da Cunha et Matthey (éds.)*
La ville et l'urbain : des savoirs émergents
*Presses Polytechniques romandes. P.81-105*
[96] Rozenblat C., 2010
Opening the black box of agglomeration economies for measuring cities' competitiveness through international firms networks
*Urban Studies, November, 47(13) 2841–2865*
[97] Rozenblat C., Cicille P., 2003
Les villes européennes : analyse comparative / Die Städte Europas. Ein vergleichende Analyse
*DATAR – La Documentation française, 94 p 2003/ Bündesamt für Bauwesen und Raumordnung. Forschungen Heft 115. Bonn, 79 p. 2004*
[98] Rozenblat C., Pumain D., 1993
The location of multinational firms in the European urban system
*Urban Studies, 10, 1691-1709*
[99] Rozenblat, Pumain, 2007
Firm linkages, innovation and the evolution of urban systems
*dans : P.J. Taylor et al (Ed.) Cities in Globalization. Practices, policies and theories. Routledge. 130-156*
[100] Rutherford J., 2005
Network in Cities, Cities in Networks: territory and globalization intertwined in telecommunications infrastructure development in Europe
*Urban Studies, Vol. 42, 13, 2389-2406*
[101] Sanders L., 1992
Système de villes et synergétique
*Anthropos coll.villes, 274 p.*
[102] Sassen, 1991
The Global City : New York, London, Tokyo
*Princeton University Press*
[103] Scott Allen J., 1998
Regions and the World Economy
*Oxford : Oxford University Press, 177 p.*
[104] Scott A. (Ed.), 2001
Global City Regions, Trends, Theory, Policy
*Oxford University Press, 467 p.*
[105] Scott A. J., 2004
A Perspective of Economic Geography
*Journal of Economic Geography, vol. 4(5), 479-499*
[106] Simon H., 1962
The architecture of complexity : hierarchic systems
*Proceedings of the American Philosophical Society. 106. 467-482*
[107] Storper M., Venables A.J., 2004
Buzz : face to face contact and the urban economy
*Journal of Economic Geography. 4. 351-370*
[108] Taylor P.J., 2001
Specification of the World City Network
*Geographical analysis, 33 (2), 181-194*

[109] Uzzi Br., 1997
Social Structure and Competition in Interfirm Networks : The Paradox of Embeddedness
*Administrative Science Quarterly 42:35-67*

[110] Veltz P., 1996
Mondialisation, villes et territoires : l'économie d'archipel
*Presses Universitaires de France, Coll. Economie en Liberté, 262 p.*

[111] Walker G., Kogut B., Shan W., 1997
Social Capital, Structural Holes and the Formation of an Industry Network Organization
*Science, Vol. 8, No. 2, 109-125*

[112] Wall R.S., van der Knaap G.A., 2009
Centrality and Structure within Contemporary Worldwide Corporate Networks
*GAWC Research bulletin 295, 16 p.*

[113] Walter J., Lechner Chr., Kellermanns Fr. W., 2007
Knowledge transfer between and within alliance partners: private versus collective benefits of social capital
*Journal of Business Research, 60, 698-710*

[114] Weber A., 1909
Über den Standort der Industrien
*Erster Teil : Reine Theorie des Standorts (1929 : On the location of industries. Part I : pure location theory).Tubingen : Mohr (Siebeck)*

[115] Weisbuch G., Zwirn H., 2010
Qu'appelle-t-on aujourd'hui les sciences de la complexité ? Langages, réseaux, marchés, territoires
*Vuibert, Paris, 346 p.*

[116] Williamson O.E., 1975
Markets and hierarchies : Analysis and Antitrust Implications
*The Free Press, Mc Millan Publisher. 286 p.*

[117] Zajac E.J., Olsen C.P., 1993
From transaction cost to transaction value analysis: implications for the study of interorganizational strategies
*Journal of Management Studies, 30:1, 131-146.1*

[118] Zimmermann J-B., 2002
"Grappes d'entreprises" et "petits mondes"
*Une affaire de proximité. Revue Economique. 53 : 3, 517-524*

# - C -

# Normalisation

# Interopérabilité et intégration des données et modèles urbains : standards, normes et tendances pour les SIG

Emmanuel Devys
IGN Saint Mandé
Gilles Gesquière
LSIS, UMR CNRS 6168 Aix-Marseille

**La convergence des besoins relatifs à la modélisation urbaine entre les besoins utilisateurs d'une part, et ceux de l'ingénierie, de la maîtrise d'ouvrage et de la maîtrise d'œuvre, ainsi que du monde de la recherche, est un gage de succès de projets urbains durables et pérennes. Ce besoin de convergence conduit en particulier à traiter de manière adaptée la problématique d'interopérabilité et d'intégration des données et modèles urbains. Cet état de l'art a pour objectif de donner un aperçu des standards et normes utilisables pour de tels modèles urbains (2D et 3D), notamment à l'ISO, l'Open Geospatial Consortium (OGC) et au Web3D Consortium, des tendances et initiatives en cours, notamment dans le cadre d'INSPIRE. Il illustrera également l'intérêt et la mise en œuvre d'un standard tel que CityGML pour les diverses thématiques envisagées pour les modèles urbains, et quelques problématiques d'intérêt, comme par exemple l'aspect multi-échelles, la gestion de la sémantique, l'intégration de données terrain et l'imagerie. Un exemple simple extrait de la problématique de la mise à disposition de modèles numériques urbains pour la réalisation de simulation de phénomènes physiques sera ensuite abordé. L'objectif est de montrer que le partage d'un modèle et le fait de s'appuyer sur des échanges standardisés permet de faciliter les interactions entre les modèles physiques, et ainsi de coupler plusieurs modèles entre eux.**

## Introduction

La complexité de la gestion du territoire, urbain, voire péri- urbain, impose de plus en plus l'usage concerté de données d'origines variées, pouvant être issues de capteurs in-situ, et de méthodes performantes capables de traiter des quantités de données corrélées entre elles, soit géographiquement, soit par des relations d'appartenance.

Les technologies de l'information géospatiales, dont les SIG et les services web pour l'information géospatiales, et les architectures logicielles et réseau répondent bien à ce besoin. Cependant pour appréhender efficacement ces données et trouver rapidement des solutions adaptées, il est essentiel de pouvoir visualiser ces données dans un environnement virtuel fidèle à la réalité[1]. Les maquettes numériques sont des outils précieux pour l'appréhension, la modélisation, la simulation et la gestion d'un territoire car elles offrent aux différents acteurs une représentation réaliste et pertinente.

L'utilisation de maquettes virtuelles est aujourd'hui possible grâce aux progrès techniques des médias tels que les ordinateurs ou PDA et de leur capacité à afficher des scènes 3D de plus en plus complexes. L'accès à la donnée est aussi facilité par l'apparition de réseaux aux débits croissants, avec notamment l'émergence du Très Haut Débit. La visualisation de données 3D a donné lieu à la création de villes virtuelles qui apportent un premier niveau d'outil d'aide à la décision concernant, par exemple, des aménagements urbains.

La mise en œuvre de ces maquettes a amené les communautés concernées à s'intéresser aux modalités d'accès à l'information de manière interopérable et de visualisation ou de fusion des informations pertinentes pour un utilisateur et un besoin particulier. De nombreux projets tel Terra Numerica[2], projet de système global d'information fondé sur une base de données géographique 3D permettant d'accéder de façon dynamique à l'ensemble des contenus disponibles, ont pour objectif de définir des solutions technologiques ouvertes permettant en dynamique l'acquisition, la consultation, la

[1] « La 3D est un outil indispensable pour une meilleure communication entre tous les acteurs – municipalité, maîtrise d'œuvre, administrés – car elle donne une perception concrète des lieux et des projets » Alain Noël, Directeur du SIG et des données urbaines de la ville d'Annecy.
[2] http://terranumerica.com/

sélection et la représentation fusionnée des données utiles à l'utilisateur (collectivité, acteur public ou privé ou grand public).

De nombreux acteurs et sociétés se sont intéressés dans ce cadre à la normalisation et à la standardisation de ces technologies d'information géospatiale afin de rendre plus interopérables et efficaces les échanges de données 2D/3D ; l'accès dynamique et interopérable aux données est une exigence de tels environnements et un réel atout.

L'utilisation de standards performants doit aussi permettre aux acteurs, aux sociétés et villes commanditaires de partager la maquette virtuelle avec d'autres produits afin de réaliser des simulations de phénomènes physiques comme, par exemple, la propagation du bruit sur des façades, la modélisation thermique de bâtiments, l'impact du positionnement d'antennes GSM, la simulation d'inondation ou le déplacement d'un nuage toxique en milieu urbain. En effet, là encore, l'utilisation de services et d'échanges standardisés permettrait de faciliter les interactions entre les modèles physiques fournis par des prestataires et la maquette.

Cet état de l'art a pour objectif de présenter les avancées et les apports des technologies, dans le domaine de la standardisation de l'information géospatiale, pertinentes en milieu urbain pour des données géométriques et sémantiques 2D et 3D ainsi que des données d'imagerie et de capteurs in-situ. Les modèles de simulation faisant appel à des données souvent hétérogènes, cet état de l'art permet de donner quelques pistes de réflexion autour de la recherche de modèles communs de données ou de modèles de référence.

## Utilisation de modèles de simulations physiques

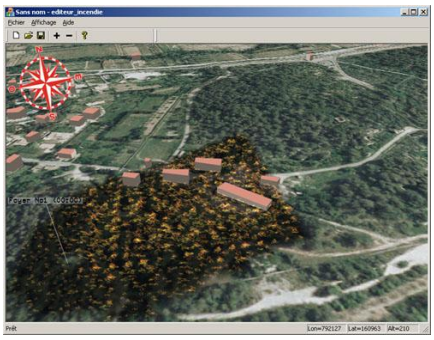
L'utilisation des villes virtuelles s'est bornée, pendant des années, à une aide à la décision pour les urbanistes. Des techniques, comme celle utilisant le modèle TRAPU de l'IGN (TRacé Automatique de Perspectives Urbaines), permettaient de modéliser puis de visualiser ces données [DLL00]. Elle permettait par exemple de prévoir l'impact visuel que pouvait avoir l'implantation d'une nouvelle route (Figure 1.a) ou d'une nouvelle ligne de tramway (Figure 1.b) dans un ensemble immobilier existant.

**Figure 1 :** Etude d'implantation d'infrastructure effectuée avec des maquettes virtuelles (Image appartenant à la société Pixxim)

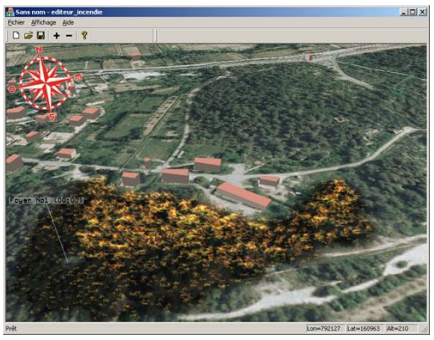
De nos jours, les villes possédant des maquettes virtuelles se généralisent. Les applications deviennent aussi plus nombreuses ; la ville numérique doit maintenant servir de support à des simulations plus complexes. La visualisation des données en 3D reste un besoin, mais l'enjeu devient plus important. En effet, de nombreux couplages ont vu le jour afin de profiter de ces données. Si nous prenons l'exemple traité dans [TRRG07], les données fournies par l'IGN et la communauté de commune permettent de faire une étude de propagation du feu en zone semi-urbaine. L'objectif est ici de sensibiliser les propriétaires au débroussaillement (Figure 2). Dans ce type de simulation, les données employées sont déjà nombreuses. Les données de bases, fournies par l'IGN dans le cadre de l'accord avec le CRIGE-PACA, sont un modèle numérique de terrain, des orthophotos, la BD TOPO et la BD CARTO.

Des données plus spécialisées comme la base de données IFN pour la « brulabilité » des sols, une carte de vent, ainsi que l'humidité au sol permettent de compléter ces données. La plupart de ces données sont bidimensionnelles.

**Figure 2 :** Etude de la propagation du feu dans le cadre d'un outil d'aide à la sensibilisation pour le débroussaillement. Temps simulé = 30 min, Vent = 3m/s, Combustible = « Chaparral ». Extrait de [TRRG07].



2.a : Sans débroussaillement



2.b : Avec débroussaillement

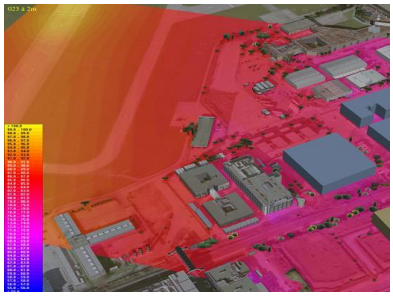
L'utilisation de données issues du domaine de la construction peut aussi permettre de faire des simulations similaires à des échelles différentes. Il est ainsi possible de simuler l'intervention de la sécurité civile à l'intérieur d'un bâtiment dans le cadre d'un « serious game » (Figure 3). Les données employées sont alors des plans de bâtiments (3D) et des cartes de mise à feu et de propagation possible du feu.

**Figure 3 :** Simulation d'intervention au sein d'un bâtiment (extrait de [GR05])

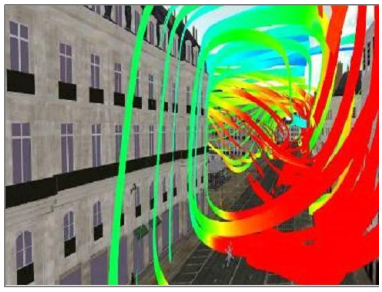
Néanmoins, les simulations deviennent de plus en plus complexes, induisant le besoin de coupler des modèles entre eux. C'est par exemple le cas dans la simulation présentée en Figure 4. La ville virtuelle sert alors de support à des modèles de simulation du trafic routier, de propagation de la pollution et du bruit lié à ce trafic.

**Figure 4** : Utilisation couplée de plusieurs modèles de simulation. Extrait du projet Terra Magna[3]

4a Modèle de simulation du trafic routier



4b Modèle de simulation des nuisances sonores

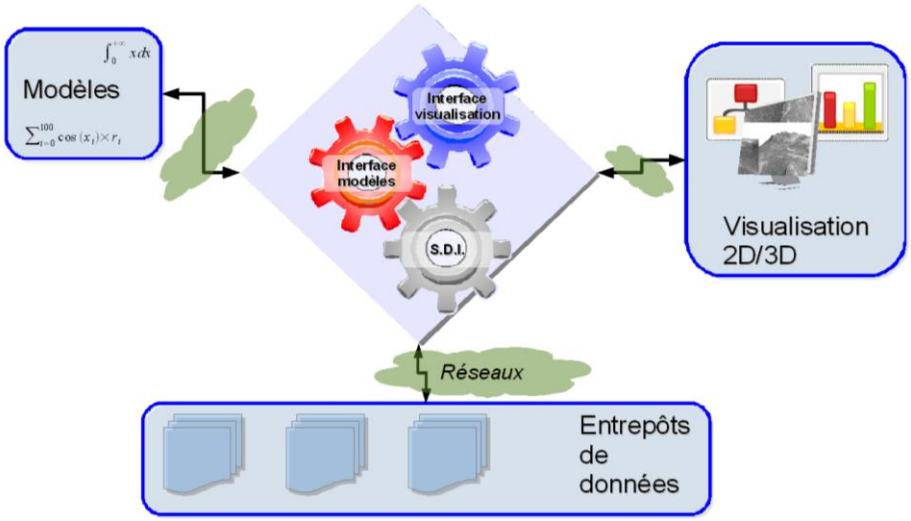


4c Modèle représentant la qualité de l'air

[3] Projet R&D de SIG3D pour les applications urbaines, cf. www.terramagna.org

En synthèse, des données, souvent hétérogènes, doivent cohabiter au sein d'une même infrastructure de données spatiales (SDI). Comme le montre la Figure 5, ces données sont elles-mêmes en relation avec des entrepôts de données dont elles sont issues. Elles sont entre autres utilisées pour la visualisation 2D/3D ou afin d'alimenter des modèles. Ces derniers fournissent eux-mêmes des données géoréfé-rencées ou non. La remontée d'informations issues de capteurs sur le terrain peut aussi générer des informations à utiliser. L'échange de ces données nécessite alors la mise en place d'interfaces entre les différents composants.

**Figure 5 :** Infrastructure de données simplifiées permettant l'échange de données entre des modèles de simulation, une visualisation et des entrepôts de données.




## Villes virtuelles et modèles – Comment échanger les données

Les villes virtuelles se retrouvent à l'interface de plusieurs mondes qui étaient autrefois complè-tement séparés. Dans une ville, à grande échelle, les données étaient gérées par une banque de données urbaines. Des SIG étaient alors utilisés. Ces données comprenaient les cartes, les modèles de terrains et les modèles de bâtiments. La gestion des bâtiments était dans un premier temps assurée par des architectes qui utilisaient des logiciels souvent issus de la CAO comme les suites Autodesk ou Bentley. Les données CAO comprennent des modèles détaillés de bâtiments et des modèles liés à l'environnement (mobilier urbain,…). La gestion du bâtiment et de son environnement a beaucoup évolué ces dernières années donnant lieu à la mise en place d'une description du bâtiment et de son environnement, donnant naissance aux BIM[4]. Les données BIM contiennent des informations sur la structure, l'utilisation et l'équipement de bâtiments ainsi que la modélisation de leur intérieur.

Ces types de sources de données ne sont pas interopérables en soi en raison de l'évolution historique du domaine des applications, des systèmes et des formats, ce qui pose de nombreux problèmes d'intégration et nécessite des modifications manuelles de données. De plus, ces données véhiculent aussi des informations sémantiques qu'il faut sauvegarder et faire cohabiter au sein d'un même environnement. Dans le cadre de plateformes mettant à disposition des modèles numériques urbains voulus dans de nombreux projets, comme par exemple Terra Magna, l'intégration de différentes sources de données et de leur sémantique liée dans le système est un enjeu important. Des capacités d'intégration de données multi-sources de natures et de formats différents sont nécessaires.

L'échange de données 2D/3D, également appelé transfert de données 2D/3D, est un domaine de l'informatique englobant les techniques et méthodes logicielles permettant d'échanger au mieux un modèle 2D/3D entre différents systèmes informatiques ou logiciels. Tout l'enjeu de ce domaine repose sur l'échange correct de différents types d'information constituant un modèle 2D/3D, en particulier de

[4] BIM : Building Information Modeling,

l'information géométrique (données de type facettes, surfaces de révolution, surfaces de forme libre, modèles numériques de terrains, ...), de l'information sémantique (associées aux entités géométriques), mais également de l'information topologique (relations de voisinage associées aux données 2D/3D). Si la traduction de l'information géométrique est primordiale dans l'échange de données 2D/3D, il est important de noter que dans un contexte applicatif donné, l'information géométrique devient très souvent inutilisable si les informations sémantiques et topologiques qui lui sont initialement associées ne sont pas ou mal transférées.

A ce jour, le monde de l'échange de données 2D/3D repose en grande partie sur la notion de format, qui peut être défini comme une convention permettant de représenter des données et jouant le rôle d'interface entre les données et le logiciel. Lorsque ces données sont stockées dans un fichier, on parle de format de fichier. Dans les domaines des SIG et de la CAO, comme évoqué dans le paragraphe précédent, de nombreux consortiums et organismes nationaux / internationaux ([TH009]) vont dans le sens d'une standardisation des données et des processus de conception. Néanmoins, une relation biunivoque entre chaque couple de formats n'est malheureusement pas toujours possible, notamment car certaines entités (par exemple géométriques) ne sont supportées que par certains formats. Ce fait, qui entretient le domaine de l'échange, est notamment dû à l'évolution rapide des SIG et des systèmes de CAO ainsi qu'aux procédés de fabrications précieusement gardés par de nombreux acteurs privés au sein de formats dits « natifs ». L'échange de données est, par conséquent, un domaine qui génère de nombreuses études et communications scientifiques notamment dans le domaine de la CAO (*e.g.* [VER91, PAR05, KH08, KPIS08, SRI08]).

Le transfert de données implique parfois la perte d'informations liées aux données. L'hétérogénéité des données mène à la mise en place de schémas harmonisés permettant la mise en correspondance des données. Le paragraphe suivant est consacré à cet aspect.

## Rendre les données interopérables

L'interopérabilité peut être définie comme la capacité que possède un produit ou un système donné à pouvoir fonctionner pleinement avec d'autres produits ou systèmes existants [ZD10]. Compte tenu du fait que les produits ou systèmes sont conçus par des constructeurs différents et qu'ils répondent généralement à des besoins spécifiques, l'idée la plus simple pour obtenir l'interopérabilité consiste à définir une base explicite de dialogue, typiquement une norme[5] ou un ensemble de normes, que chaque produit ou système se devra de respecter pour assurer son interopérabilité. La norme joue un double rôle dans la réalisation de l'interopérabilité [Tho09]. Elle est tout d'abord un indicateur de la façon dont le dialogue entre les différents acteurs doit s'opérer et structure par conséquent les besoins de ce dialogue. Elle est également une passerelle de communication, qui va pouvoir éventuellement s'adapter aux besoins changeants des éléments. La norme est la base de conception des interfaces d'un produit ou système.

Dans le domaine des technologies de l'information géospatiale et en CAO, ainsi que dans les domaines connexes tels que la visualisation de données et leurs applications sur Internet, de nombreux organismes (organismes de normalisation nationaux et internationaux, consortiums groupes) oeuvrent dans le sens de l'interopérabilité des systèmes ([Tho09]). C'est le cas de l'OGC[6] ou de l'ISO TC/211 orientés vers la création de standards pour l'information géospatiale, de l'Open Design Alliance visant à l'interopérabilité des données CAO par l'intermédiaire d'API[7] libres, du consortium Web3D œuvrant pour la standardisation des données 3D circulant sur Internet, ou du groupe Khronos visant à proposer un ensemble de standards dédiés à la création et à l'accélération de calculs parallèles et d'applications graphiques. Dans le domaine de l'information géographique et spatiale, nous retrouvons aussi au niveau national l'AFNOR et le CEN[9] TC 287 au niveau européen.

L'objectif est donc de capitaliser cette information géospatiale en s'appuyant sur des standards[10] et des normes permettant l'exploitation

[5] Définition d'une technologie ou d'un procédé formalisé par un organisme habilité

[6] Open Geospatial Consortium
[7] Application Programming Interface
[8] Association Française de NORmalisation
[9] Comité Européen de Normalisation
[10] Un standard est un référentiel publié par une entité privée autre qu'un organisme de normalisation national ou international ou non approuvé par un de ces organismes pour un usage national ou international.

conjointe et concertée et le possible croisement de ces données. Les plateformes deviennent ainsi par nature interopérables, ce qui est une demande toujours croissante de la part des clients et utilisateurs souvent confrontés à ce genre de problématique au sein d'intercommunalités par exemple.

### *Normes de base pour la modélisation et l'encodage de l'information géospatiale*

Les travaux du comité technique TC 211 de l'ISO ont amené à une série de normes de la série 191xx (allant aujourd'hui de 19101 à 19160). Nous pouvons citer par exemples quelques normes utilisables dans l'objectif d'échanger de la donnée entre modèles :

- ISO/TS 19103 définissant l'utilisation d'UML (Unified Modeling Language) pour les spécifications relatives à l'information géographique ;
- ISO 19107 définissant un modèle géométrique et topologique, 2D et 3D ;
- ISO 19108 définissant un modèle temporel ;
- ISO 19109 spécifiant les règles applicables aux schémas d'application ;
- ISO 19123 définissant un modèle conceptuel harmonisé 2D ou multidimensionnel et spatiotemporel pour l'information d'imagerie (couverture ou « coverage ») ;
- ISO 19125-1 définissant un profil de la norme ISO 19107, c'est à dire les classes géométriques / topologiques (accompagnées de leurs attributs et opérations) pour la représentation d'objets géographiques simples (à savoir limité à la géométrie des objets en 2D et à une interpolation uniquement linéaire entre points).

L'ISO/TC 211 a également publié une norme centrée sur les aspects d'implémentation de l'information géospatiale 2D et 3D, issue de l'OGC : ISO 19136, correspondant au standard de l'OGC GML 3.2.1 de l'OGC, pour l'information géospatiale 2D et 3D. Ce format particulier est un socle commun permettant l'échange de données géospatiales. Celui-ci est basé sur un formalisme XML dérivé de certains modèles conceptuels définis dans les autres normes de l'ISO/TC 211 selon des règles de constructions spécifiées.

Les communautés d'utilisateurs peuvent exploiter ce référentiel normatif pour développer des schémas d'application conformes aux règles et réutiliser les composants définis dans les normes abstraites. Un codage « XML Schema » suivant la grammaire GML peut ensuite être dérivé du schéma d'application et servir de base pour l'échange de données.

### *Normes et standards de modélisation et d'encodage de l'information géospatiale*

De nombreux formats normalisent les données tridimensionnelles. Citons par exemple les formats issus de la CAO (STEP ISO 10303, IGES), ou pour les bâtiments la norme IFC (ISO/PAS 16739). L'utilisation de ces standards et normes apporte des solutions à des problèmes d'échange de données [GRFBK09] dans le cadre des SIG [FRD10], dans le domaine du bâtiment [GR05], et / ou de la CAO [BSGLP10]. Ils permettent de faire cohabiter des codes de calculs ou modèles physiques [DDGP10]. Nous retrouvons usuellement dans tous les domaines cités ci-dessus des conversions systématiques nécessaires, ainsi que le besoin de fonctionnalités d'interrogation ou la mise en place d'opérations (calcul d'intersection, d'union, de définition des propriétés surfacique ou volumique d'un objet, ou d'un ensemble complexe d'objets). Ces opérations sont nécessaires afin de produire des informations demandées par les modèles. Nous pouvons par exemple penser à l'intersection des limites d'un feu avec le réseau routier afin d'identifier les routes potentiellement dangereuses.

Des travaux similaires ont été menés afin de rendre les maquettes numériques de bâtiments interopérables au sein de l'International Alliance for Interoperability. Des spécifications destinées à faciliter l'échange et le partage d'informations entre logiciels ont été mises en place. Le principal résultat des travaux de l'Alliance est un langage qui rassemble aujourd'hui plus de 600 classes d'objets et a pour nom IFC (Industry Foundation Classes). Les IFC permettent aujourd'hui d'échanger des données de la conception du bâtiment, en allant de sa construction jusqu'à sa gestion technique [CN06a], [CN06b]. Cette norme continue à évoluer pour prendre aujourd'hui en compte l'extérieur de bâtiments et les échanges de données liées à ce bâtiment tout au long de son cycle de vie.

De plus, la rencontre du monde du SIG et de celui de la gestion technique du patrimoine a donné naissance à un standard proposé par l'OGC depuis 2008 pour le stockage, l'échange et la représentation des données liées aux modèles de villes. Il s'agit de CityGML [KG05]. CityGML est défini comme un schéma d'application de GML3. Avec ce langage, il est possible de modéliser des données 2D à 3D de type vectoriel en utilisant une sémantique associée à ces données. Nous pouvons parler d'une interopérabilité au niveau syntaxique car le langage est basé sur GML ; il

est donc possible d'interagir avec des services comme WFS (Web Feature Service ou Service d'accès aux entités géographiques par le web). Nous obtenons aussi une interopérabilité sémantique parce que le langage est basé sur une définition commune des objets, de leurs attributs et des relations qu'il y a entre eux.

Les caractéristiques clés de CityGML sont :

1. Modélisation thématique : le modèle couvre une large gamme d'objets urbains, y compris (mais non limité à) les bâtiments, les réseaux de transport, l'hydrographie, la végétation, le relief du terrain, l'occupation des sols, le mobilier urbain...
2. Modularité du modèle : chaque modèle thématique est packagé dans un module UML séparé.
3. La gestion du multi-échelle (de la région au bâtiment) avec le concept de LOD (« Level of Detail » ou Niveau de détail) permettant d'exprimer la résolution ou granularité avec laquelle un modèle 3D est représenté. Le même objet peut être représenté avec une géométrie différente à chaque niveau. CityGML fournit aussi deux associations d'accumulation et de décomposition entre les objets qui peuvent être utilisées pour indiquer qu'un objet de LOD de niveau inférieur a été décomposé dans deux (ou plus) objets à LOD plus élevé. Les modèles applicatifs ou de simulation peuvent exploiter les données au LOD le plus approprié. CityGML spécifie cinq niveaux :
   - LOD0 : régional, représentation du terrain. Une orthoimage ou une carte peut être drapée sur un modèle numérique de terrain, avec des données de niveau régional d'occupation des sols, d'hydrographie et de réseaux de transport.
   - LOD1 : vue urbaine. Les bâtiments sont modélisés sous forme de blocs à toits plats.
   - LOD2 : quartier, projets. Les bâtiments sont modélisés avec leur structure de toit, et des surfaces délimitatives sémantiquement classifiées. Des objets de végétation, de mobilier urbain et de réseau de transport plus détaillés peuvent également être modélisés.
   - LOD3 : modèle architectural (extérieur) et infrastructures ou objets urbains. Les structures détaillées des façades et des toits, *e.g.* balcons, fenêtres sont modélisées, ainsi que les textures « haute résolution », les objets de végétation, de mobilier urbain et de réseau de transport détaillés.
   - LOD4 : modèle architectural (intérieur). Ce niveau a été conçu en cohérence avec le modèle IFC pour décrire la géométrie intérieure d'un bâtiment, ainsi que les portes, escaliers ...
4. Références externes: les objets de bases de données externes peuvent être référencés à partir du bâtiment ou de l'objet urbain auquel ils correspondent. Ils peuvent être utilisés pour propager des mises à jour de la base de données source à l'objet urbain 3D. Ils aident également à relier les modèles d'information différents. Un bâtiment peut par exemple être lié à un objet d'une base de données cadastrale.
5. Capacité d'extension « orientée métier » grâce aux extensions ADE (Application Domain Extensions) de CityGML. Des extensions ADE pour des modèles de bruit, la représentation de ponts, tunnels, hydro et réseaux (Utility Network), ainsi qu'une extension GeoBIM (basée sur les IFC) sont disponibles ou en cours de développement.

D'autres extensions dédiées aux différentes problématiques sont envisageables et permettraient d'enrichir le modèle urbain socle en utilisant des informations nécessaires aux simulations.

La modularité de CityGML, sa structure thématique, ses capacités de référencement externes et d'extensibilité permettent le support de modèles urbains enrichis intégrant des données provenant de diverses sources en permettant des liens avec les autres domaines d'application.

### *Normes et standards orientés visualisation pour l'information géospatiale*

L'échange de données 2D/3D sur Internet est un enjeu majeur qui a amené à la mise en place de nombreuses normes et standards. Nous en citons ici quelques unes pour exemple sans toutefois être exhaustifs. Il faut toutefois noter que la plupart de ces formats permettent une représentation de la géométrie, de la texture et de son environnement (lumière, caméra…), mais ne prennent pas en compte la sémantique liée.

- La première norme, nommée VRML[11], a permis l'échange de modèles 3D de scènes pendant plusieurs décennies. C'est un format texte permettant de décrire géométriquement des objets 3D et de leur associer une texture. Le format ne permet

[11] Virtual Reality Markup Language

pas nativement le stockage de la sémantique. VRML a été adopté par l'ISO en tant que norme ISO 14772. Une extension géographique à ce format a été développée (GeoVRML).

- Le Web3D Consortium ne maintient plus la spécification VRML mais a défini une nouvelle spécification basée sur XML, X3D, compatible avec VRML. X3D a une structure plus modulaire que VRML. Quatre profils de complexité croissante ont ainsi été définis : profil de base Echange (Interchange), profil Interaction (Interactive), Immersion (Immersive), Total (Full). X3D est également normalisée au sein de l'ISO/IEC JTC1 SC24 (Computer Graphics and Image Processing). Il s'agit des normes suivantes : ISO 19775 (architecture et capacités abstraites), ISO 19776 (encodages en VRML et XML), ISO 19777 (API).
- COLLADA est un format d'échange XML permettant d'encoder des objets 2D et 3D, texturés et éventuellement animés, développé par le Khronos Group. Il ne permet qu'un encodage limité de la sémantique. Certaines applications, comme Google Earth, en ont fait leur format interne.
- U3D (Universal 3D) est un format de fichier 3D standardisé par Ecma International en juin 2006 sous la référence Ecma-363. Son but est de devenir un standard universel pour la publication et l'échange de données 3D. Il est supporté notamment par Adobe et Bentley (Microstation).
- Enfin Keyhole Markup Language (KML) est un format de fichier développé par Google suivant une grammaire XML permettant d'encoder les données géographiques ainsi que leur représen-tation, afin de les visualiser. La version 2.2 de KML est devenue un Standard OGC. Elle a été popularisée par le globe virtuel de Google. Des objets 3D modélisés dans leur propre espace de coordonnées sous forme de fichiers COLLADA peuvent y être référencés.

Le tableau ci-dessous synthétise les capacités des standards et divers normes de modélisation et de visualisation mentionnés ci-dessus. On distingue les formats orientés affichage graphique 3D favorisant l'échange de la géométrie comme X3D, U3D, KML et Collada (avec capacité sémantique inexistante ou faible) et les formats comme IFC et CityGML répondant à l'ensemble des besoins pour la modélisation, l'organisation et l'échange de données urbaines et de la sémantique liée.

La légende du tableau est la suivante : (vide : non supporté, 0 : support de niveau basique, + : support nominal (sophistiqué), ++ : support exhaustif).

**Tableau 1 :** Comparaison des standards de modélisation et de représentation 3D

| Standard / Capacité | X3D | U3D | KML | COLLADA | IFC | CityGML |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Géométrie | + | + | 0 | + | ++ | + |
| Topologie | 0 | 0 | | 0 | + | + |
| Sémantique | 0 | | | 0 à + | ++ | ++ |
| Géoréférencement | + | | + | | (IFG) + | ++ |
| Apparence (textures) | + | + | 0 | ++ | 0 | + |
| Linking / embedding Gestion de données intégrées ou liées (référencées) | + | | ++ | ++ | | ++ |

### *Normes et standards de services d'accès à l'information géospatiale*

Pour l'accès aux données, l'ISO/TC 211 a publié des normes orientées implémentation, issues de l'OGC. Le respect de ces normes peut par exemple permettre à un utilisateur d'accéder à des données émanant de nombreux entrepôts de données, rendant ainsi le partage d'informations plus aisé. Ces protocoles se sont révélés d'une grande utilité dans le cadre de l'aide à la gestion de crise comme celle en

Haïti. Deux de ces normes sont aujourd'hui très utilisées. Dans le cadre de l'accès aux données raster / image, ISO 19128 ou OGC WMS (Web Map Service) permet de définir un service d'accès cartographique. L'accès aux données géographiques (2D/3D) sous forme d'objets fournis encodés en GML peut se faire grâce à ISO 1942 correspondant à OGC WFS 2.0 (Web Feature Service).

### *Autres normes pertinentes pour la modélisation urbaine*

L'ISO/TC 211 a également commencé à normaliser différents aspects thématiques de l'information géospatiale. Plusieurs schémas conceptuels normalisés ont été définis, conformément à la norme ISO 19109. Les normes suivantes sont pertinentes pour la modélisation urbaine :

- ISO 19144-2 Systèmes de classification – Land Cover Meta Language (LCML) définit un métalangage pour les classifications d'occupation du sol. Ces données peuvent être utilisées pour distinguer les zones bâties / non bâties ;
- ISO 19152 – Land Administration Domain Model (LADM) est un schéma conceptuel standardisé pour les données cadastre.

L'ISO / TC 204 a élaboré la norme ISO 14825 – Fichiers de données géographiques (GDF) définissant un modèle conceptuel de données et un format d'échange pour les applications de transport.

Pour terminer l'aperçu des langages de modélisation ou d'encodage de données géospatiales pouvant avoir un intérêt en milieu urbain, nous mentionnerons également GeoSciML ou GeoScience Markup Language, schéma d'application GML pour encoder, manipuler et échanger des données géographiques qui contiennent des informations géologiques.

### *Vers des infrastructures interopérables de modélisation et de simulation pour l'environnement urbain*

Outre la mise à disposition de fonctions liées à la modélisation, l'import ou l'utilisation de données 2D/3D normalisées et de leur sémantique, une réflexion sur l'infrastructure de Données Spatiales (Spatial Data Infrastructure ou SDI) doit être menée. Elle doit permettre d'offrir la possibilité de caractériser et d'exploiter des phénomènes, se manifestant par des observations issues de capteurs, grâce à des services standardisés d'accès aux données de capteurs en réseau (tels que le service SOS – Sensor Observation Service – issu de la communauté SWE (Sensor Web Enablement) de l'OGC) et des fonctions d'analyse spatiale couplées à des modèles mathématiques, porteurs d'une expertise scientifique et métier. Les modèles de scénarios s'appuient alors sur ce SDI afin de permettre un couplage faible entre ces modèles de simulation et les données. Le couplage est libellé comme faible puisque les interfaces entre ces modèles et les données sont standardisés, le rendant plus aisé.

Le concept de plateforme que l'on retrouve dans le domaine des SIG sous ce nom d'Infrastructure de Données Spatiales est constitué de l'ensemble des technologies, normes et protocoles nécessaires à une harmonisation des bases de données géospatiales existantes. L'objectif premier de ce dispositif est de traiter, sauvegarder, cataloguer, distribuer et améliorer l'exploitation de l'information géographique en mettant en œuvre les dispositifs les plus transparents possibles pour l'utilisateur (notamment au moyen de services de consultation, accès, visualisation et représentation des données, mais aussi service de traitements).

Concernant l'utilisation d'un modèle urbain pour la mise en place d'aide à la gestion de risques, un premier prototype international, montrant la faisabilité a été créé par l'OGC dans le cadre de tests de faisabilité « OWS » phase 4 [OWS4]. Des liaisons dynamiques (via WFS) ont été mises en place afin de permettre l'utilisation de données issues de CityGML [C08], [HD07], [DH07]. Même si les protocoles d'échanges sont maintenant normalisés, il reste encore des problèmes à traiter dans les domaines relatifs aux transferts et à la compression des données [HPG08], [GB09]. Ces résultats, axés sur la possibilité d'envoyer des requêtes à différents niveaux de détail et de recevoir des résultats de façon progressive, permettront là encore à la plateforme de fournir différents résultats en fonction des données nécessaires aux modèles de simulation.

La vision de l'OGC est de proposer un ensemble de services Web :

- découverte des données accessibles à travers un service tel que CS-W permettant les requêtes aux catalogues de métadonnées,
- requête et accès (téléchargement) à des données 3D (BIM / IFC et CityGML), 2D (SIG 2D traditionnels), d'imagerie ou de représentation du terrain (Modèles Numériques de Terrain) – ces dernières étant typées comme 2D1/2 – à travers des services WFS (données SIG2D et 3D), WCS (Web Coverage Service),
- accès à des données issues de capteurs in-situ à travers un service tel que SOS, services de traitement des données,

encapsulés par le protocole WPS (Web Processing Service),

- visualisation WMS (données cartographiques), limitée à une visualisation 2D,
- services performants (en flux) de représentation / visualisation intégrée de l'ensemble des informations sélectionnées au travers de services orientés représentation graphique (spécification émergente candidate W3DS[12] pouvant fournir des données X3D ou COLLADA / KML) ou simple visualisation sous forme image (spécification émergente candidate WVS[13]).

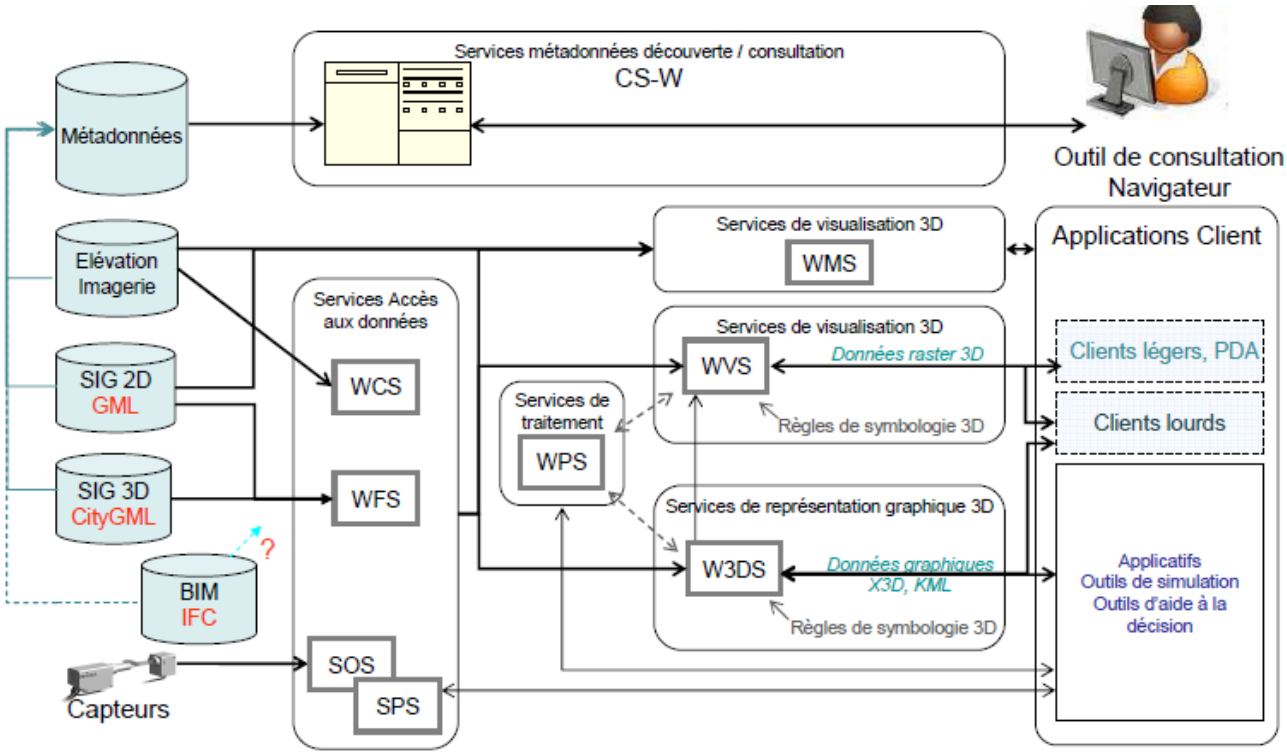
Ce dernier type de services apparaît nécessaire car CityGML n'est pas à ce jour un standard offrant des performances de représentation et de visualisation de niveau « temps réel ou même interactif ».

La Figure 7 illustre la vision d'une infrastructure de services OGC de découverte, fusion, représentation et visualisation de données SIG 2D/3D, imagerie et capteurs in-situ, dans laquelle peuvent s'inscrire des données GeoBIM ; ceci à condition d'intégrer les interfaces de métadonnées, d'accès aux données et de visualisation. Une expérimentation est envisagée à l'OGC en 2011.

Cette infrastructure peut servir de support pour l'intégration et la mise en œuvre de modèles urbains intégrant des modélisations de phénomènes physiques. Toutefois les web services OGC n'ont pas à ce jour la capacité de traiter des données IFC (d'où le point d'interrogation sur la Figure 7 entre les données BIM / IFC et la boîte de services d'accès).

L'exploitation d'une telle infrastructure combinée à des modèles géophysiques et des modèles de simulation apparaît comme une solution technologique interopérable pour la modélisation urbaine et l'exploitation concertée des solutions scientifiques et techniques, notamment pour les outils d'aide à la décision pour la gestion environnementale de la ville durable, la sécurité civile et la gestion des risques naturels ou industriels, par exemple hydrologiques. Il est en effet possible d'agglomérer des données issues de milieux différents comme, par exemple, des représen-tations d'intérieur de bâtiments (IFC), de villes (CityGML) ou des relevés de capteurs. La mise en place de protocoles de communications permet d'accéder à ces données afin de les utiliser les visualiser.

**Figure 7 :** Infrastructure OGC de services de découverte, fusion, représentation et visualisation de données SIG 2D/3D, (Geo)BIM, imagerie et capteurs in-situ




[12] Web 3D Service : service de représentation 3D (fournissant des flux X3D ou KML)
[13] Web View Service : service de visualisation 3D (fournissant des flux raster PNG, JPG …)

Le modèle de simulation pourra, grâce à ces standards, communiquer avec ces données, les mettre à jour ou créer de nouvelles données. Préalablement à la visualisation qui pourra se faire sur des médias de différentes capacités, il sera possible de décliner une même donnée en fonction de son utilisation (portrayal ou représentation de la donnée). S'il est par exemple nécessaire de représenter un pylône, il sera possible d'utiliser un point, un point lié à un label (étiquette définissant ce qu'est l'objet), ou même directement un objet 3D.

### *INSPIRE et les données urbaines*

La Directive INSPIRE a pour but d'établir les bases légales de l'Infrastructure de Données Géographiques Européenne à des fins de politiques environnementales ou de politiques ayant un impact sur l'environnement. Cette Directive vise à rendre accessibles et interopérables les données géographiques existantes, en format numérique, relatives au territoire d'un Etat Membre de la Communauté Européenne, détenues par une autorité publique et relatives à l'un des 34 thèmes définis par ladite Directive.

Ces 34 thèmes incluent des données de référence, comme des données topographiques (transport, hydrographie, bâtiments, MNT), des données administratives (unités administratives, unités statistiques, parcelles cadastrales, adresses), des données d'ortho-image ainsi que des données plus thématiques (géologie, usage et occupation du sol, conditions atmosphériques, zones de risques naturels, …).

Afin d'assurer l'interopérabilité syntaxique des données au sein de chaque thème et entre thèmes, un cadre commun de modélisation a d'abord été mis en place. Ce cadre commun comprend en particulier un Modèle Conceptuel Générique, basé en grande partie sur l'utilisation des normes définies par l'ISO/TC 211. Par exemple, les spécifications des thèmes INSPIRE sont décrites selon la norme ISO 19131 (spécification de produit de données), les schémas de données sont conçus selon le modèle « General Feature Model » de l'ISO 19103), l'encodage recommandé est GML 3.2.1 (ISO 19136).19109 et sont représentés en UML

De plus, pour chacun des thèmes de la directive, l'interopérabilité sémantique est assurée par un schéma commun de données, basé à la fois sur l'analyse de l'existant, sur les besoins des utilisateurs dans les domaines liés à l'environnement, et sur les normes, standards et exemples de bonne pratique.

Le thème « bâtiment » est celui lié le plus directement à la modélisation de la ville. Le groupe de travail en charge de ce thème a identifié les principaux besoins utilisateurs liés essentiellement aux domaines du risque, de l'expansion urbaine, de la qualité de l'habitat dont les aspects énergétiques, des diverses pollutions (air, bruit, …) et des projets de nouveaux aménagements.

Les conclusions provisoires de ce groupe de travail sont que, d'une part, des données 2D accompagnées d'un attribut de hauteur sont largement disponibles et satisfont (parfois de façon seulement approximative, il est vrai) un grand nombre d'applications mais que, d'autre part, la tendance est vers une production et une utilisation croissantes de données 3D. En particulier, il y a une volonté d'aller vers des infrastructures 3D réutilisables et partageables pour la gestion au long cours de la ville en lieu et place des maquettes 3D, plus ou moins jetables, destinées à un seul projet. Ces besoins nécessitent le plus souvent des données 2D et 3D multi-échelles.

CityGML, standard OGC de modélisation urbaine basé sur les normes de l'ISO TC 211, est le candidat naturel pour la modélisation des données 3D au sein du thème Bâtiment d'INSPIRE.

Le groupe de travail pour le thème « bâtiment » envisage la définition de deux profils normatifs :

- un profil de base 2D
- un profil 3D basé sur CityGML (au niveau LOD1).

Ces deux profils doivent être cohérents : les concepts généraux de CityGML sont utilisés dans les deux profils 2D et 3D (e.g. distinction entre bâtiment et partie de bâtiment ou utilisation du mécanisme de référence externe).

## Conclusion

La construction de villes virtuelles nous amène à être à l'interface de plusieurs mondes (CAO, SIG, BIM, imagerie, étude de phénomènes physiques, capteurs, …). Le partage et l'échange des données 2D et 3D ainsi que leur sémantique liée sont un enjeu important. Il est nécessaire de penser à l'intégration de données multi-sources de natures et de formats différents. Afin de stocker ces données, une réflexion sur l'Infrastructure de Données

Spatiales (SDI) doit être menée en prenant bien en compte que le volume de données à stocker est très important dans le cadre de villes virtuelles. De plus, le couplage nécessaire de modèles de simulations amène à organiser ces données et à mettre en place des outils d'analyse liés. Il est ainsi possible de transmettre aux modèles de simulation les informations qui leur sont nécessaires.

Par ailleurs, au niveau de la représentation des données, une approche multi-échelle / multi-résolution sera à privilégier. Il sera ainsi possible de fournir aux modèles de simulations des données de précision opportune en fonction de leur besoin. Il reste néanmoins à construire les outils d'agrégation pertinents. Dans ce cadre, CityGML semble être un excellent candidat permettant la fusion de données terrain 2D et de modèles urbains 3D, ainsi que l'agrégation de modèles métiers. Le couplage de modèles a déjà été démontré à plusieurs reprises[14].

Toutefois, la mise en œuvre opérationnelle de CityGML réclame notamment de disposer de standards performants de représentation / visualisation 3D pouvant être alimentés en flux par des données CityGML.

L'intérêt d'infrastructures intégrées de services de consultation ainsi que l'accès, la représentation ou la visualisation multi-source de données issues de SIG 2D, 3D, avec données terrain et d'imagerie, données de capteurs in-situ, et données de simulation physique a été abordée dans cet article. Ces échanges sont rendus naturels lorsque l'utilisation de standards et de normes est privilégiée. On a vu dans cet article l'intérêt d'utiliser les normes et standards pour les modèles d'une part, pour les services web d'autre part. En particulier, en fonction des besoins, des services comme WMS, WFS, WCS, SOS pourront être exploités.

Les travaux sur la normalisation pour l'information géospatiale sont coordonnés au niveau français par l'AFNOR (Commission nationale pour l'information géographique et spatiale) ou au niveau international par l'OGC et l'ISO TC/211.

Prendre part à ces travaux amène à participer à l'évolution de ces standards en fonction des demandes des utilisateurs, des laboratoires de recherche, des organismes gouvernementaux et des entreprises. De nombreux standards souvent issus de la recherche émergent actuellement au sein de l'OGC où l'on retrouve plus d'une centaine de laboratoires de recherche aux côtés d'industriels pour répondre aux nouveaux besoins.

**Remerciements**

Les auteurs remercient pour leurs contributions et interventions constructives lors de la révision de ce document Nicolas Paparoditis (directeur du laboratoire MATIS) ainsi que Dominique Laurent (IGN/DT/TN) expert et facilitatrice de l'équipe thématique « Bâtiments » INSPIRE.

[14] voir session «Maquettes numériques urbaines et simulation de phénomènes physiques ; les enjeux de la 3ème dimension ».

## Bibliographie


[BD07] Brutzman D. and Daly L.
X3D: Extensible 3D Graphics for Web Authors
*Morgan Kaufmann, 2007*

[BSGLP10] Bénière R., Subsol G., Gesquière G., Lebreton F., Puech W.
Decomposition of a 3D triangular mesh into quadrangulated patches
*International Conference on Computer Graphics Theory and Applications (GRAPP 2010)*

[C08] Curtis E.
Advances in 3D Geoinformation Systems
*Chapter Serving CityGML via Web Feature Services in the OGC Web Services – Phase 4 Testbed, pages 331–340. Lecture Notes in Geoinformation and Cartography 2008*

[CN06A] Cruz C., Nicolle C.
Active3D: Vector of Collaboration, Between Sharing and Data Exchange
*INFOCOMP, Jounal of Computer Science, 5 (3), pp.1-8, January 2006*

[CN06B] Cruz C., Nicolle C.
Use of semantics to manage 3D scenes in web platforms
*Encyclopedia of Multimedia Technology and Networking 2nd Ed, Editor: Margherita Pagani, Idea Group Inc, 2009*

[DDGP10] Duplex B., M. Daniel, Gesquière G., Perdu F.
Deformation Exchange between Adjacent Physical Code Geometries
*WSCG 2011*

[DH07] Döllner J., Hagedorn B.
Integrating Urban GIS, CAD, and BIM Data By Service-Based Virtual 3D City Models
*26th Urban Data Management Symposium, Stuttgart Germany, Oct. 2007*

[DLL00] De La Losa A.
Modélisation de la troisième dimension dans les bases de données géographiques
*Thèse UMLV, janvier 2000*

[FRD10] François A., Raffin R., Daniel M.
3D ISO analysis and modeling for GIS - First steps in the norm implementation
*International Conference on Design & Decision Support Systems in Architecture and Urban Planning (DDSS), 2010*

[GB09] Barros Gavilanes J.G.
Transmission de géométrie 3D pour les Systèmes d'Information Géographique
*Rapport de Master SIS Recherche, 2009*

[GC05] Geroimenko V., Chen C.
Visualizing Information Using SVG and X3D
*Springer, 2005*

[GR05] Gesquière G., Raffin R.
Utilisation des IFC dans le cadre de l'aide à la décision et de la visualisation 2D/3D temps réel
*Actes de la conférence Médiaconstruct, 2005*

[GRFBK09] Gesquière G., Raffin R., François A., Bachelot G., Klein N.
Echange de données 3D- perspectives
*Journées de l'Interopérabilité, OGC-France, IGN Saint Mandé, 02 décembre 2009*

[HD07] Hagedorn B., Döllner J.
High-Level Web Service for 3D Building Information Visualization and Analysis
*Proceedings of the 15th ACM International Symposium on Advances in Geographic Information Systems (ACM GIS), Seattle, Nov. 2007*

[HPG08] Hayat K., Puech W., Gesquière G.
Scalable 3D Terrain Visualization through Reversible JPEG2000-Based Blind Data Hiding
*IEEE Transactions on Multimedia, vol. 10, n° 7, pp. 1261-1276, November 2008*

[KG05] Kolbe T., Gröger G., Plümer L.
Citygml – interoperable access to 3d city models
*dans : proceedings of the Int. Symposium on Geo-information for Disaster Management, pages 21–23, Delft, march 2005. Springer verlag*

[KH08] Kuzminykh A., Hoffmann C.
On validating STEP product data exchange
*Computer-Aided Design, 40(2), 133-138, 2008*

[KPIS08] Kim J., Pratt M.J., Lyer R.G., Sriram R.D.
Standardized data exchange of CAD models with design intent
*Computer-Aided Design, 40(7), 760-777, 2008*

[PAR05] Pratt M.J., Anderson B.D., Ranger T.
Towards the standardized exchange of parameterized feature-based CAD models
*Computer-Aided Design, 37(12), 1251- 1265, 2005*

[OW4] Ogc web services, phase 4 demo cad / gis / bim,
www.opengeospatial.org/ projects/initiatives/ows-4

[SRI08] Srinivasan V.
Standardizing the specification, verification, and exchange of product geometry : Research, status and trends
*Computer-Aided Design, 40(7), 738-749, 2008*

[TH009] Thomas J.W.
Data-exchange Standards and International Organizations: Adoption and Diffusion
*IGI GLOBAL, 2009*

[TRRG07] Thon S., Raffin R., Remy E., Gesquière G.
Combining GIS and forest fire simulation in a virtual reality environment for environmental management
*ACE : Architecture, City and Environment, Vol. 2 (4), pp. 741-748, jui 2007 ISSN 1886 4805*

[VER91] Vergeest J.S.M.
CAD surface data exchange using STEP
*Computer-Aided Design, 23(4), 269-281, 1991*

[ZD10] Zhao P, Di L.
Geospatial Web Services : Advances in Information Interoperability
*IGI Global, 2010*

# - D -

## Sociologie, économie et risques

# La modélisation urbaine au service de l'analyse économique des politiques climatiques locales

Mathieu Saujot
Institut du Développement Durable et des Relations Internationales,
Centre d'économie industrielle des Mines de Paris
Patrick Criqui
Laboratoire d'Economie de la Production et de l'Intégration Internationale
Benoit Lefèvre
Institut du Développement Durable et des Relations Internationales
Philippe Menanteau
Laboratoire d'Economie de la Production et de l'Intégration Internationale

**Cet article décrit une méthodologie originale pour définir et hiérarchiser les actions nécessaires à l'atteinte des objectifs locaux de réduction des émissions de gaz à effet de serre, à partir de critères technico-économiques. Il montre comment l'utilisation d'un modèle intégré transport-urbanisme, la description de scénarios ainsi qu'une méthode particulière de construction des courbes de coûts marginaux permettent d'associer actions incrémentales et structurantes et ainsi de prendre en compte le caractère systémique des villes dans l'analyse des stratégies de réduction coût efficace.**

## Introduction

La nécessité de réduire les émissions de gaz à effet de serre, si elle a d'abord émergé au niveau international avant de se voir décliner au niveau national, s'exprime aujourd'hui de manière croissante au niveau local et ce pour deux types de raisons. La première est que le monde est de plus en plus urbain, entraînant mécaniquement l'augmentation de la part des villes dans les émissions mondiales, et mettant ainsi celles-ci aux premiers rangs de l'action climatique. La seconde est que la contrainte qu'impose l'objectif de 2°C d'augmentation est si forte qu'agir sur les leviers globaux risque d'être insuffisant, poussant ainsi à s'intéresser aux leviers locaux [1]. Cette déclinaison locale des contraintes d'émission doit permettre de mobiliser des potentiels qui, sinon, seraient inatteignables par des politiques nationales.

En effet, il existe plusieurs avantages à agir au niveau local. Cela permet en particulier de réduire les coûts de transaction, en tous cas de mettre en place des outils capables de les surmonter. Dans le bâtiment par exemple, la capacité à connaître le parc de logement du territoire, à mobiliser les professionnels locaux, à fournir des informations au plus grand nombre et à intégrer des actions d'efficacité énergétique dans des actions urbaines plus larges est une condition essentielle au succès d'une politique d'efficacité énergétique. La mise en place d'une action au niveau local permet aussi d'agir sur la densité et l'organisation spatiale du territoire, ces déterminants des émissions des transports et du bâtiment sont eux-mêmes commandés par les règles d'urbanisme et les décisions d'aménagement, qui sont aux mains des villes. Enfin, l'échelon local est le plus à même de stimuler l'implication des acteurs de la société civile, rouages essentiels d'un changement en profondeur vers un futur moins carboné.

En France, suite aux lois issues du Grenelle, la nécessité de réduire les émissions locales s'exprime par l'obligation de mettre en place un Plan Climat Energie Territorial (PCET), document fixant les objectifs énergétiques et de réduction des émissions de Gaz à Effet de Serre (GES) à l'échelle d'un territoire. Construire un cadre cohérent d'action constitue un enjeu majeur pour les collectivités ayant adopté des PCET et, plus généralement, les autorités publiques. Il s'agit en effet de coordonner les politiques climats avec les autres interventions publiques à deux niveaux : au niveau local (PLU, PDU, PLH, SCOT[1], plans énergétiques, etc.) tout d'abord, mais aussi aux niveaux national et international (politique énergétique, politique industrielle, plan de relance économique, politique

[1] Plan Local d'Urbanisme porté par la commune, Plan de Déplacement Urbain porté par la collectivité locale correspondant au périmètre d'organisation des transports (communes, communauté d'agglomération ou urbaine), Plan Local de l'Habitat porté par l'agglomération ou la commune, Schéma de COhérence Territoriale porté à l'échelle de la région urbaine.

régionale, etc.). La question des moyens à mettre en œuvre pour atteindre les objectifs des plans climat locaux, que ce soit en termes de méthodes ou d'actions concrètes, reste à résoudre et constitue un sujet majeur pour la recherche.

C'est à cette dernière problématique que se propose de répondre le projet ÆTIC[2] en développant une méthodologie originale pour définir et hiérarchiser les actions nécessaires à l'atteinte de ces objectifs locaux de réduction, à partir de critères technico-économiques. Le terrain retenu est celui de l'agglomération grenobloise. Nous partons du principe qu'aux objectifs ambitieux doivent correspondre des démarches rigoureuses pour choisir et prioriser les actions à mener, et assurer l'efficacité économique indispensable pour la mise en œuvre de politiques climatiques soutenables dans la durée. Comme toute politique publique, l'action pour le climat doit s'astreindre à un certain niveau d'efficacité qui impose le plus souvent de développer de nouveaux outils. Nous considérons aussi qu'une évaluation économique systématique des potentiels de réduction d'un territoire permettra de mieux prendre la mesure de l'importance de l'action locale et des conditions de son expression, facilitant ainsi la mise en place des plans climat locaux.

La démarche visant à définir des stratégies coût-efficace a déjà été appliquée avec succès aux négociations internationales (marché de permis d'émissions au niveau européen – ETS) et aux politiques nationales. Des modèles énergie-économie ou sectoriels énergie (comme le modèle POLES du LEPII et le logiciel ASPEN qui lui est associé pour l'analyse des marchés de quotas $CO_2$) ont ainsi permis de construire des jeux de courbes de Coûts Marginaux de Réduction (CMR ou en anglais MACC pour Marginal Abattement Cost Curves). En étudiant les conditions économiques de mise en œuvre d'interventions sectorielles multiples, les CMR constituent des outils particulièrement robustes et efficaces pour réduire le coût d'un programme complexe de réduction des émissions [2].

Le projet « Approche Economique Territoriale Intégrée pour le Climat » (ÆTIC) se propose de reproduire cette démarche fondée sur une forte cohérence micro-économique pour l'échelle des politiques climatiques locales. La définition d'une stratégie coût-efficace passe alors par l'analyse des différents domaines potentiels de réduction dans les secteurs des bâtiments, des transports et des systèmes énergétiques locaux. La hiérarchisation et la création d'un « ordre de mérite » permet de mettre en discussion l'efficacité de différentes actions au sein d'un même domaine mais aussi entre ces différents domaines.

Cette analyse ne peut cependant pas ignorer la dimension systémique propre au fonctionnement des villes, et ce en particulier pour ce qui concerne les transports. En effet, du fait des interrelations complexes entre les différents éléments du système urbain, certaines politiques peuvent modifier les coûts et les potentiels d'actions.

L'interaction entre transport et urbanisme implique que des changements dans les systèmes de transport font évoluer l'usage des sols sur le territoire, et que cette évolution entraîne en retour une modification de la demande de transport. Du fait de ses conséquences sur le système urbain, la prise en compte de cette interaction et son accompagnement par des mesures systémiques devraient faire partie intégrante de stratégies de réduction des émissions.

Afin de mobiliser tous les potentiels de réduction des émissions de gaz à effet de serre, les stratégies de réduction des émissions dans ce domaine ne peuvent donc pas se résumer à un ensemble d'actions incrémentales, c'est-à-dire d'actions qui n'influencent qu'une variable du système (par exemple : les mesures d'amélioration de l'efficacité énergétique des bus et des véhicules particuliers) mais elles doivent aussi comporter une dimension systémique, intégrant des actions ayant un effet structurant sur l'état du système (par exemple : la modification de la forme urbaine par des politiques d'usage des sols, une nouvelle infrastructure de transport).

La représentation des émissions du secteur du transport avec la méthodologie ASIF [3] permet de bien comprendre la nécessité d'associer actions incrémentales et systémiques pour réduire les émissions. En utilisant cette méthodologie, la quantité de $CO_2$ émise par le secteur du transport se représente par le produit vectoriel entre A (activité ou mobilité en tonne ou passager.km), S (partage modal), I : (intensité énergétique des moyens de transport) et F (contenu $CO_2$ de l'énergie) : $tCO_2$ = A*S*I*F. I se décompose par ailleurs en un produit de E, l'efficacité technique du système de transport, 1/U avec U le coefficient d'utilisation (fréquentation) et 1/O où O représente les conditions de circulation (revêtement, congestion...).

[2] AETIC est un projet.financé par l'ANR dIans le cadre du programme "Villes durables" (APR 2009). Il rassemble six partenaires (LEPII, IDDRI, ENERDATA, CSTB, VEOLIAI, PACTE) et est coordonné par le LEPII.

Des actions incrémentales du type amélioration des moteurs des voitures et passage en biocarburant peuvent respectivement modifier E l'efficacité énergétique, et F le contenu en $CO_2$ de l'énergie.

Des actions systémiques du type modification du fonctionnement de la ville (plus de mixité et de densité par exemple) et des investissements dans des infrastructures de transport en commun peuvent respectivement réduire A, la demande de transport, et modifier S, le partage modal. Pour augmenter U, le coefficient d'utilisation (fréquentation), et O, représentant l'optimalité des conditions de circulation, il s'agit aussi d'apporter une action structurelle sur le système de transport. Les deux types de leviers, incrémentaux et systémiques, doivent donc tout deux être actionnés pour jouer sur toutes les paramètres de ASIF c'est-à-dire sur tous les déterminants des émissions du transport.

Pour conduire cette analyse économique des politiques climatiques locales, il apparaît nécessaire de s'appuyer sur un outil de modélisation urbaine permettant d'embrasser la complexité des rétroactions en jeu dans le système-ville et de représenter ses principales dimensions. Le modèle permet de faciliter la compréhension des mécanismes à l'œuvre, de tester des mesures et de quantifier les résultats. Il doit être capable de simuler conjointement l'évolution du système technique de transport et l'évolution de la forme urbaine, rendant ainsi possible le test de différentes modifications de l'offre et de la demande de transports. De plus, la modélisation doit être intégrée à la méthode d'analyse économique des politiques climatiques, méthode dont la définition et la mise en œuvre sont les principaux défis du projet.

Ainsi, la capacité à concevoir des jeux de CMR (ou MACC en anglais) compatibles avec cette combinaison des approches systémiques et incrémentales au niveau local apparaît comme une problématique de recherche majeure. Cet article examinera les différentes étapes d'une méthodologie permettant d'y répondre, et ce dans un premier temps pour l'interaction transport / usage des sols. Nous commencerons par décrire les enseignements de l'économie urbaine pour notre problématique, et le développement des modèles intégrés. Puis nous expliquerons le fonctionnement de Tranus (le modèle utilisé dans ce projet) et l'illustrerons à travers un exemple d'application. Dans un troisième temps, nous préciserons le concept de courbe de coût marginal et les difficultés d'intégration des actions systémiques. Nous verrons les exemples existants d'utilisation de CMR pour l'analyse de politiques urbaines de réduction des émissions et nous décrirons leurs limites dans l'intégration de la dimension systémique. Enfin, nous expliquerons comment une utilisation de scénarios permet de surmonter cette difficulté.

## La dimension systémique : modèle intégré « transports - usages des sols »

### *Les enseignements de l'économie urbaine*

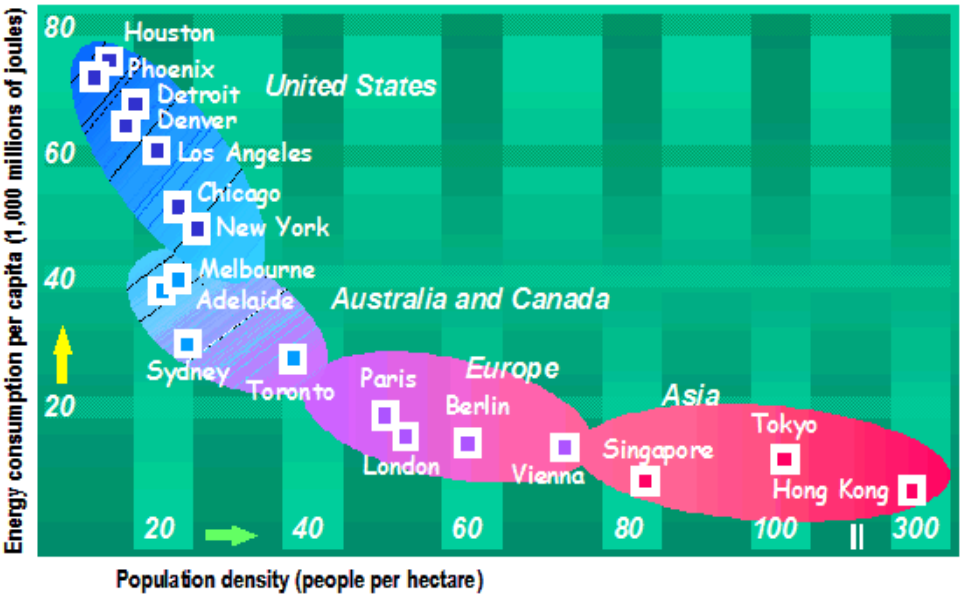
Dans le domaine des transports, de nombreuses études ont été menées quant à la plus ou moins grande propension des structures urbaines[3] à engendrer différentes intensités de déplacement dans les différents modes. Les travaux établissant une relation entre densité de population et consommation énergétique dans les transports pour une centaine de grandes villes dans le monde sont, par exemple, emblématiques de cette démarche (*cf.* Newman et Kenworthy [5]).

La prise en compte d'autres facteurs a permis d'enrichir les analyses de Newman et Kenworthy, notamment : taille de la ville, gradient de densité [6], étalement, morphologie (degré de polycentrisme, nombre et poids de centres de gravité alternatifs au centre historique), mixité des usages (présence de ségrégations entre fonctionnalités ou intégration des différentes activités au niveau local) [7], interactions entre réseaux de transport et usage des sols, via notamment les marchés foncier et immobilier et leurs conséquences sur les consommations énergétiques [8].

Toutes ces études ont montré que le niveau d'émission était déterminé par un grand nombre de caractéristiques urbaines en interaction et qu'une analyse des potentiels de réduction ne pouvait ignorer ces caractéristiques. De plus, la diversité des niveaux d'émission des systèmes urbains a mis en évidence le fait qu'il existait des fonctionnements moins émetteurs, et que cela dépendait fortement des politiques mises en place sur le long terme. Par une action politique systémique sur la ville, un changement pour des solutions moins émettrices est donc possible. Il s'agit d'identifier les stratégies et les mesures susceptibles de déclencher de tels changements.

[3] Plusieurs définitions coexistent, l'une d'elles caractérisant la structure urbaine par deux éléments complémentaires : la distribution spatiale de la population et la distribution spatiale des déplacements, [4]

**Figure 1 :** Consommation énergétique par habitant pour les déplacements passagers suivant la densité de population




*Source : Newman, Kenworthy 1999*

L'analyse de la structure urbaine passe donc par la prise en compte de deux dimensions essentielles : la distribution spatiale des populations et la distribution spatiale des déplacements. C'est le croisement entre ces deux dimensions qui détermine les caractéristiques de la demande de transport et de l'offre qui pourra y répondre. Pour modifier cet état des choses, il est nécessaire de s'intéresser aux causes de ces distributions et aux conditions générales d'offre et de demande du système urbain (services, travail, logement abordable…). Il faut donc se doter d'un outil suffisamment détaillé pour cela.

De plus, il est clair que les politiques de réduction des émissions s'inscrivent dans une trajectoire, c'est-à-dire que le changement doit être pensé sur la durée et ce, pour plusieurs raisons. Les systèmes urbains ont une inertie importante du fait de temps de renouvellement conséquents (parc bâti, véhicules roulants), de besoins très importants en investissements, de la complexité de la mise en place de projets urbains [9] et des interactions entre les différentes composantes de la ville (la formation de l'attractivité est en ce sens un bon exemple, par la complexité des éléments qui la compose et la lenteur de son évolution). Au niveau local, un certain nombre d'actions nécessite une évolution des systèmes de gouvernance et des outils de politiques publiques, évolution qui prend du temps. Enfin, sans stratégie de long terme il ne peut y avoir de maîtrise politique de la ville car il y a nécessité à anticiper, en particulier pour la politique foncière. On ne peut décrire des stratégies de réduction crédibles sans prendre en compte cette dimension temporelle.

Les outils de modélisation « transports - usages des sols » permettent précisément de simuler ces politiques intégrées qui agissent à la fois sur l'offre de transport et sur la demande, et ce sur une trajectoire longue. Ils conduisent à la fois à tester et à quantifier les conséquences d'actions et de mesures, dans le cadre de trajectoires de long terme vraisemblables.

## *Le développement des modèles intégrés*

Historiquement, les théories relatives aux systèmes d'urbanisation et de transport ont été développées de façon relativement isolée les unes des autres, bien que leurs relations aient été discutées largement depuis de nombreuses années. L'influence du développement urbain sur les moyens de transport est un processus largement admis. Toutefois, la perspective de l'interaction entre l'occupation des sols et les transports s'est réellement élargie depuis que Lowry [10] a postulé que les équipements de transport conditionnent à leur tour l'utilisation des sols.

Néanmoins, cet impact du transport sur l'évolution de l'usage des sols et des formes urbaines n'a pas toujours été suffisamment pris en compte et évalué dans la perspective de mise en place de politiques urbaines. L'évolution future des déplacements doit pourtant être envisagée en considérant les tendances socio-économiques lourdes affectant la mobilité des

agents, le développement des différents réseaux de transport, mais aussi en considérant les rétroactions potentielles sur le système d'occupation des sols.

Quatre méthodes principales existent pour tenter de prévoir ces phénomènes de rétroaction [11]. La première repose sur la méthode d'évaluation contingente, qui nécessite d'interroger des personnes sur les choix de localisation et de mobilité qu'elles feraient suivant différents scénarios de changements du contexte urbain. La seconde, la préférence révélée, consiste en l'analyse de cas passés sous différents contextes afin d'en déduire les réactions des populations face à différents changements. La troisième consiste en un panel d'experts interrogés par une méthode standardisée [12]. Enfin, la quatrième repose sur l'usage de modèles mathématiques simulant les comportements humains. Chacune de ces méthodes a des avantages et des inconvénients [11], l'évaluation contingente peut révéler des facteurs subjectifs importants mais elle repose sur des choix en situations virtuelles, ce qui rend incertain sa robustesse. Les préférences révélées peuvent fournir des enseignements détaillés mais seulement pour des situations déjà expérimentées et non pour des situations nouvelles pour lesquelles ces informations sont pourtant nécessaires. Enfin, la méthode du panel d'experts peut paraître peu transparente et relativement limitée [13] et sa fiabilité peut être diminuée par un certain nombre de facteurs [12]. La méthode reposant sur les modèles mathématiques diffère sur plusieurs points des autres méthodes : elle permet de tester des situations pour lesquelles il n'existe pas de retour d'expérience, elle permet de simuler les effets induits par la modification d'un seul facteur et en gardant les autres fixes, enfin cette méthode permet de fournir des informations quantifiées.

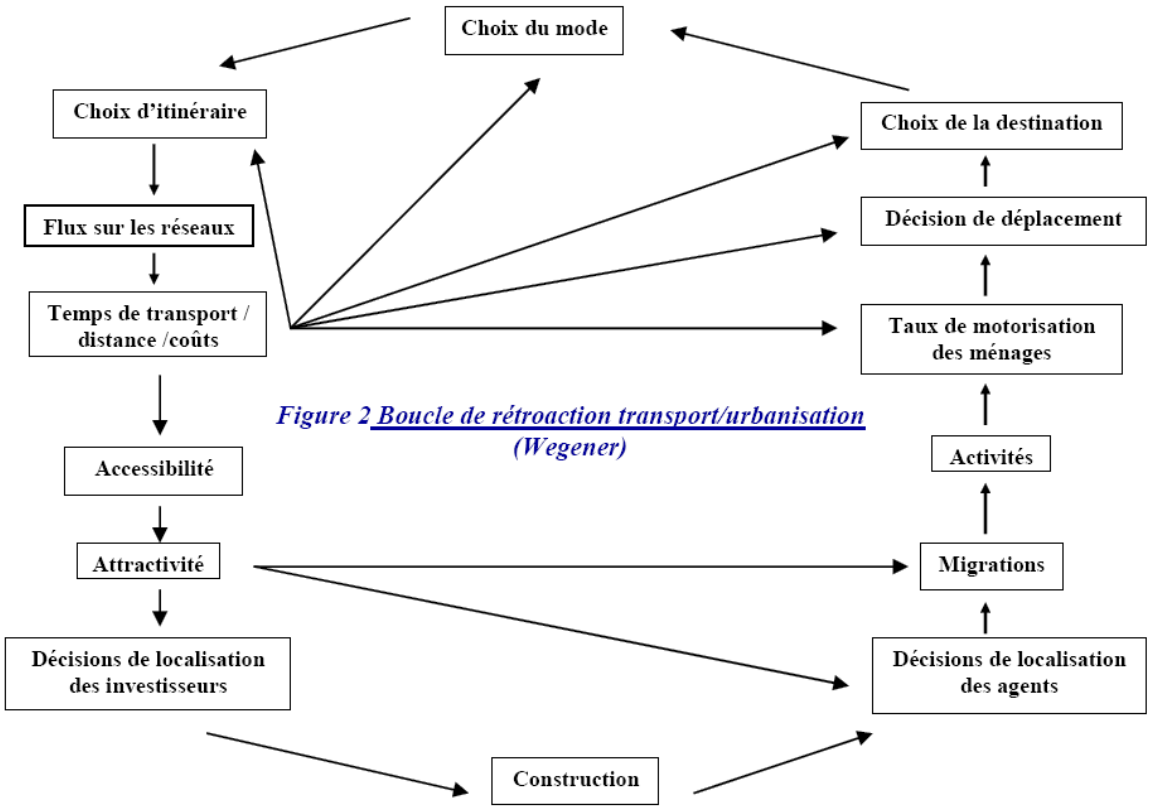
Ces apports particuliers des modèles mathématiques par rapport aux autres méthodes ont amené, depuis les années 80, au développement de modèles intégrés « transports – usages des sols » par des équipes scientifiques de différents pays. Les lois sur l'Air (1991, 1998) aux Etats-Unis, qui visaient à « rendre obligatoire la prise en compte des interactions urbanisation transport dans l'élaboration des plans de transports régionaux » [14], ont aussi été l'un des éléments qui a stimulé la recherche sur les outils permettant d'analyser ces interactions.

Ce développement est aussi le produit du constat que les méthodes dites à « quatre temps »[4] étaient dépassées, que ce soit pour les villes en développement rapide [15] ou pour des agglomérations occidentales comme en Ile de France [14]. En effet, ces modèles sont le plus souvent utilisés pour quantifier les gains de temps obtenus grâce à un nouveau projet d'infrastructure de transport, en raisonnant avec une structure urbaine fixe (exogène au modèle). Or, ce qui fut observé, par exemple en Ile de France, est que les ménages ont profité de cette amélioration du système de transport pour aller vivre plus loin, par goût et/ou par effet prix (périphérie moins onéreuse en termes de logement). Ainsi, le gain de temps théorique calculé par les modèles quatre temps, n'existait pas, alors même que la structure urbaine était modifiée. Un modèle intégré est, lui, capable de simuler ces évolutions car les performances du système de transport font partie des variables à partir desquelles les ménages font leur choix de localisation. Les différences fondamentales entre les deux approches sont donc les suivantes : un modèle intégré prend en compte le fait que les ménages font des choix de localisation à partir de variables exogènes (historique d'une zone) et endogènes (prix, accessibilité, présence de services) et que ces choix comme ces variables sont susceptibles de changer, à la fois du fait de la modification du système de transport et du fait de politiques urbaines. Un modèle quatre temps n'intègre pas ces phénomènes. Il faut noter que la France est plutôt en retard dans l'utilisation de ces modèles intégrés et ce pour des raisons diverses [14].

Les modèles intégrés se fondent donc sur l'idée que l'interaction des activités dans l'espace induit la demande de transport ; les coûts de l'accessibilité qui résulte de l'équilibre entre la demande et l'offre de transport conditionnent la satisfaction de cette demande, ce qui a en retour des effets sur les choix de localisation des résidents et des activités.

[4] Les modèles à « quatre temps » sont des modèles permettant de quantifier les conséquences d'une modification de l'offre de transport sur les caractéristiques de la mobilité (temps, partage modal, fréquentation, niveau de congestion…), les quatre étapes consistent en la génération, la distribution, la répartition modale et l'affectation.

**Figure 2 :** Boucle de rétroaction transport urbanisation




*Source : Wegener, 1994*

Il est intéressant de noter que ces interactions se font sur des temporalités différentes : si les déplacements s'adaptent immédiatement à des changements et si la localisation des ménages et des emplois change relativement rapidement (sur le territoire du Grand Lyon, 4 % des établissements et 11 % des ménages déménagent tous les ans), en revanche l'évolution des parcs de bâtiments et de leur fonction est plus lente [16].

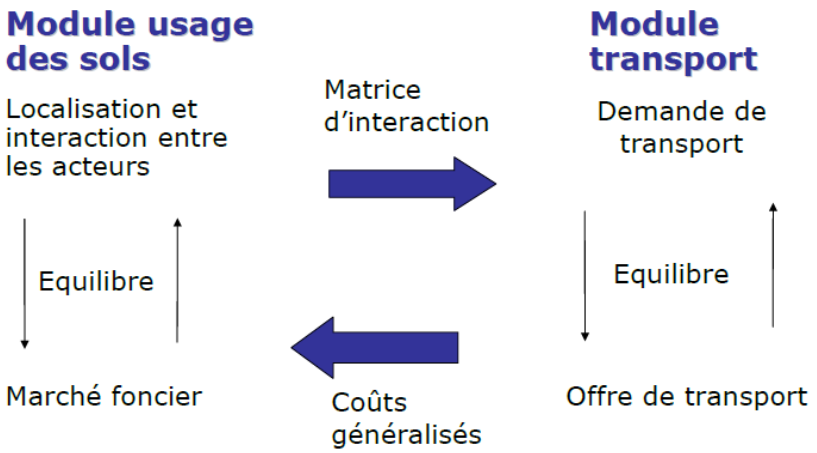
Au final, ces modèles se sont révélés capables d'apporter des éléments de réponse pour un grand nombre de questions ayant trait aux dynamiques urbaines et à la mobilité, en particulier dans le champ de la planification prospective.

## Tranus au service de l'analyse des politiques climatiques

Le modèle utilisé dans le projet AETIC pour l'analyse économique des plans climat locaux est le modèle TRANUS. C'est un modèle intégré « Transports – Usages des Sols », de prévision quasi-dynamique qui peut être appliqué à l'échelle urbaine ou régionale. Il a comme objectifs de simuler les effets des politiques d'urbanisme, des politiques et projets de transport, et des politiques économiques et fiscales ; et d'évaluer ces effets aux niveaux social, économique et environnemental.

Le modèle TRANUS a été développé par la Barra et Perez dès 1982 [17]. TRANUS est un logiciel en accès libre téléchargeable sur le site internet de Modelistica (www.modelistica.com). TRANUS est le modèle intégré « Transport – Usages des Sols » qui a été le plus appliqué dans le monde [18]. Il permet d'une part, d'effectuer un diagnostic du système urbain actuel et d'autre part, de tester différents scénarii de politiques urbaines.

**Figure 3 :** Description du fonctionnement de Tranus




*Source : Lefèvre 2011.*

TRANUS est un modèle économique probabiliste basé sur l'analyse économique classique du comportement des acteurs : les ménages minimisent leurs budgets consolidés transport-logement, les entreprises minimisent les coûts de production ; sont représentées la compétition économique pour la localisation dans l'espace, qui génère les prix fonciers, ainsi que l'interaction spatiale entre les activités et la population, qui engendre la demande de transport (voir Figure 3).

Le modèle comporte trois modules :

- Un module « usage des sols » détermine les localisations des activités et des individus selon une logique de marché qui repose sur des éléments quantitatifs et qualitatifs du tissu urbain. Le modèle atteint un premier équilibre sur le marché foncier, qui se caractérise – entre autres – par une demande d'interaction, et donc de mobilité.
- Une interface transforme les matrices origine-destination en matrice de demande de déplacements.
- Un module « transports » définit, à partir d'une offre de réseau de transports, et à partir de la matrice de demande de déplacement, la matrice des flux de transport et des coûts de déplacements. Le modèle atteint un équilibre sur le marché des transports qui est ensuite injecté dans le module « utilisation des sols » pour une nouvelle itération.

Les résultats du module transport modifient les indicateurs d'accessibilité des différentes zones, il y a donc un bouclage avec le module « usages des sols » pour que les ménages modifient leurs arbitrages, sous contraintes budgétaires, afin de prendre en compte ces éléments et de modifier si nécessaire leurs choix de localisation. Cela modifie en échange la demande de déplacement. Le processus est itératif jusqu'à atteindre un équilibre sur les deux marchés, foncier et transport.

Ainsi, le système de transport affecte le système d'urbanisation par le biais de coûts généralisés de transport (pris en compte dans l'utilité des ménages et intégrant coût monétaire et coût temporel) et ce d'une façon temporellement retardée. En effet, les accessibilités de la période 1 affectent les localisations des activités et des individus dans la période 2. C'est pourquoi le modèle est qualifié de pseudo-dynamique : il est capable de modéliser les évolutions dans le temps par ce jeu des interactions croisées entre les deux modules.

Le module d'occupation des sols a pour objectif d'expliquer de quelle façon les choix spatiaux sont effectués pour les localisations résidentielles et les emplois. Ce choix repose sur des facteurs endogènes (présences d'autres secteurs attractifs dans la zone, bonne desserte par les systèmes de transport, prix) et sur des facteurs exogènes (attractivité historique de la zone, caractéristiques urbaines – pollution, bruit, autres nuisances).

Le modèle Tranus permet de tester des scénarios comprenant les politiques suivantes :

- Transport
  - Investissement dans les infrastructures de transport, amélioration des services de transport public (site propre, augmentation de la capacité des véhicules, du nombre de véhicules, etc.), réorganisation du réseau routier, construction de pistes cyclables, etc.

- Amélioration de l'intermodalité : intégration tarifaire, construction d'infrastructure d'intermodalité (park & ride), etc.
- Amélioration de l'efficacité énergétique des véhicules.

- Usage des sols
  - Au niveau des zones urbanisables : limitation ou extension des zones urbanisables, viabilisation de parcelles, etc.
  - Au niveau des modes d'urbanisation : politique de densification, de mixité sociale, de mixité fonctionnelle, etc.

- Politique économique
  - Péage urbain, taxe sur les carburants, tarification incitative du transport public, tarification du stationnement, système incitatif à l'usage de petit véhicule urbain économe en énergie, etc.

TRANUS donne des résultats au niveau de l'organisation spatiale (localisation des activités et des ménages dans l'espace urbain), au niveau du trafic (mode, opérateur et paire origine-destination), au niveau économique (distribution des prix fonciers, utilités des différentes populations), au niveau financier (taux de recouvrement des coûts d'opération) et enfin au niveau environnemental (consommation énergétique, émissions de $CO_2$).

## Exemple d'application

TRANUS a été utilisé à Bruxelles pour évaluer les effets du déploiement d'un réseau RER (dans le cadre du plan régional de déplacement Iris) dans le cadre du Projet Européen Scatter (2002-2004). La démarche visait à définir les conditions dans lesquelles les effets recherchés dans la mise en place d'une telle infrastructure seraient maximisés et les effets non désirés minimisés.

Les impacts possibles du déploiement d'une telle infrastructure étaient l'étalement et la périurbanisation, avec comme conséquences une concentration de l'emploi pour la ville centre Bruxelles mais une perte d'habitants et une augmentation à long terme des distances de déplacement en voiture sur le territoire étudié.

Les résultats de la modélisation ont confirmé ce risque, la simulation prédisant :

- une diminution de 17 700 ménages en région de Bruxelles-Capitale (- 12 400 ménages dans les zones urbaines) ;

- une augmentation de 5 300 emplois en région de Bruxelles-capitale (+ 4 200 emplois dans les zones urbaines) ;

- une augmentation de 8,1% de la distance moyenne domicile-travail ;

- une diminution de 775 000 véhicules-km effectués en voiture à la pointe du matin (7h – 9h) *(-6,2 % des véhicules-km).*

Afin de définir des politiques pour contrer les effets négatifs du RER tout en préservant ses aspects positifs, le modèle a été utilisé pour tester des mesures d'accompagnement telles que :

- augmentation du coût d'usage de la voiture ;

- restriction du stationnement ;

- augmentation de la vitesse commerciale des transports en commun ;

- amélioration de la qualité du cadre de vie urbain ;

- mesures de fiscalité territoriale appliquées aux logements.

Il a ainsi permis de hiérarchiser les différentes mesures suivant leur capacité à enrayer les dynamiques négatives, mais aussi d'estimer les effets de combinaisons d'actions permettant au final de faciliter la formulation de stratégies transport/usage des sols intégrées.

La production de résultats quantifiés par un modèle complexe et crédible a, dans le cas bruxellois, permis une discussion entre acteurs locaux sur les mécanismes en jeu et les mesures à apporter. Cela signifie que la modélisation urbaine peut favoriser la mise en place de stratégies coût-efficaces de réductions des émissions, non pas en dictant un ensemble de mesures mais en soumettant à la réflexion un certain nombre d'alternatives testées. C'est un outil d'aide à la discussion, car il offre une quantification des alternatives, tout en étant un « boite clair » : tous les acteurs peuvent comprendre la chaîne de causalité, des politiques testées aux conséquences. En mettant en exergue les relations systémiques qui existent, ce type d'analyse permet donc d'anticiper les conséquences non voulues d'une nouvelle infrastructure.

Source : Présentation Sylvie Gayda, Stratec, Journée CERTU sur les modèles LUTI, 11 janvier 2011

## Des scénarios pour intégrer approches systémiques et courbes de coûts marginaux de réduction

Dans le projet ÆTIC, le modèle TRANUS est utilisé pour décrire les futurs possibles de l'agglomération étudiée, en assurant une certaine cohérence dans l'articulation des politiques de transport et d'usage des sols. C'est dans le contexte de ces futurs possibles, qui constituent autant de scénarios, que peut être développée l'approche de nature plus micro-économique visant à développer, pour chaque grand domaine ou secteur, les courbes de Coûts Marginaux de Réduction (CMR). Ces courbes prennent en compte des mesures ou ensembles de mesures, classés selon leur coût par tonne de $CO_2$ évitée en ordonnée, et faisant apparaitre, en abscisse, les quantités réduites. Ces mesures peuvent pour la plupart être considérées comme indépendantes les unes des autres mais, lorsque cela n'est pas le cas, il faut alors raisonner sur différents paquets de mesures combinées.

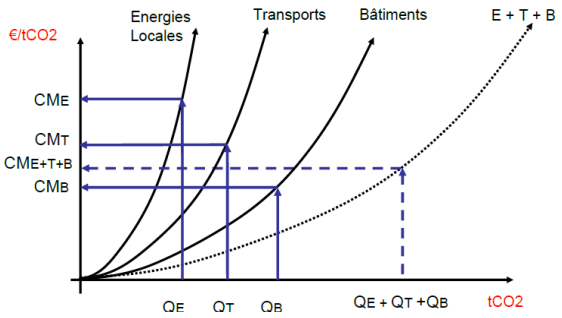
Dans les plans climat locaux, il convient de construire au moins une courbe pour le bâtiment, une pour le secteur transport et une pour la production locale d'énergie. La consolidation des courbes sectorielles permet alors de construire la courbe de CMR pour l'ensemble des secteurs. Cette courbe intégrée permet à son tour de calculer le coût marginal de réduction correspondant à l'objectif global et définit la solution coût-efficace. Ce coût marginal de réduction doit constituer un repère pour calibrer les objectifs de réduction dans les différents secteurs, de façon à éviter la mobilisation d'options trop coûteuses qui pourrait découler d'une approche non intégrée. A noter qu'en raison de conditions structurelles différentes, les courbes de CMR seront dépendantes du scénario considéré.

### *Les courbes de coûts marginaux de réduction des émissions*

Les courbes de coût marginal d'abattement appliquées aux actions locales pour la réduction des émissions ont été utilisées en particulier dans l'étude faite sur la ville de Londres par McKinsey. Ces courbes considèrent des actions incrémentales, c'est-à-dire des actions technologiques qui peuvent être choisies dans une stratégie de réduction sans qu'il y ait d'effets croisés à prendre en compte pour calculer les potentiels et les coûts (à part le fait qu'une diminution du contenu carbone de l'énergie diminue le potentiel d'actions d'efficacité énergétique). Ces courbes permettent ainsi de représenter le caractère coût-efficace de ces mesures et ce suivant plusieurs domaines mais n'intègrent pas les actions systémiques sur le réseau de transport (par exemple une nouvelle ligne de transport collectif).

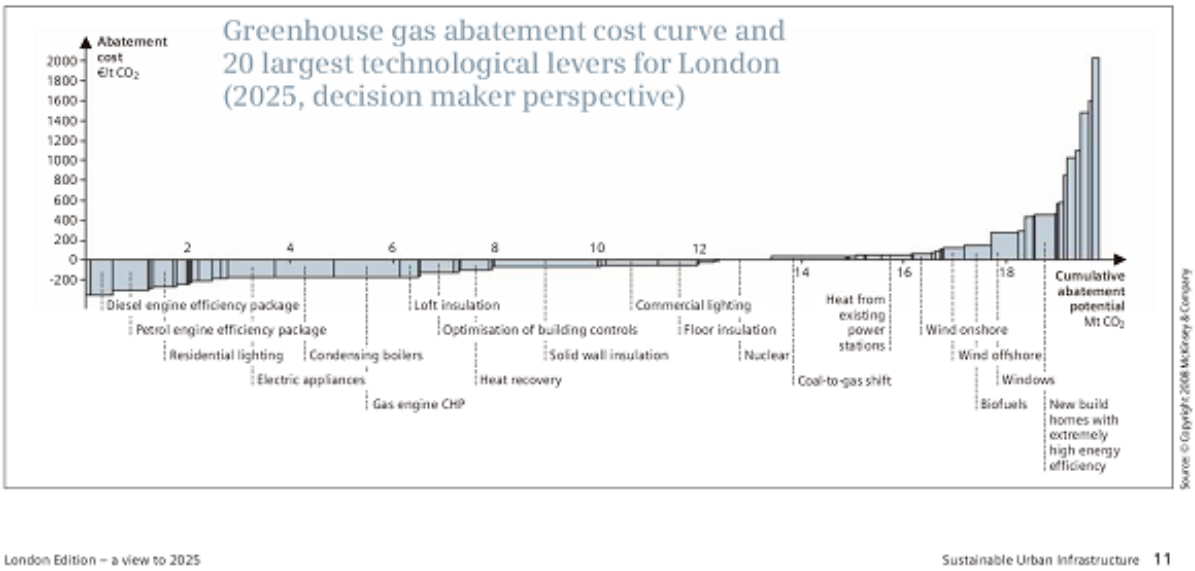
Les courbes de coût marginal d'abattement permettent de mettre en rapport les quantités de réduction d'émissions et les coûts de ces réductions. Concrètement, les courbes proposées par McKinsey permettent d'identifier l'ensemble des options à mettre en œuvre pour atteindre un objectif de réduction donné sur un secteur. Le coût de la dernière option qui permet de réaliser la quantité de réduction visée définit le coût marginal de la politique sectorielle. La somme des surfaces (quantités x coût) des options réalisées donne le coût global de cette politique. On observe que sur les courbes de McKinsey, une part importante des options apparaît à coût négatif suggérant ainsi que l'essentiel de l'effort de réduction des émissions de GES pourrait être réalisé sans coût économique réel, et même au contraire avec un gain économique. Ce résultat repose en grande partie sur un chiffrage des options qui traduit plus une vision d'ingénieur qu'une vision d'économiste. La prise en compte des coûts de transaction dans les opérations d'économie d'énergie ainsi que l'utilisation des taux d'actualisation réels des décideurs conduit à des profils de courbes moins favorables… mais peut-être plus réalistes.

**Figure 4 :** Exemple de jeux courbes de coût marginal de réduction par secteur




*Source : projet ÆTIC*

**Figure 5 :** Etude SIEMENS pour Londres – un exemple de courbes de Coûts Marginaux de Réduction et l'énigme des « coûts négatifs »




*Source: Sustainable Urban Infrastructure, London Edition – a view to 2025, 2008, Siemens AG*

Néanmoins et comme expliqué dans la première partie, la nécessité d'élargir l'analyse aux actions systémiques de réduction des émissions rend plus complexe la comptabilité des coûts et des potentiels et par conséquent la construction de ces courbes. Par exemple, on peut se demander quels seraient le coût et le potentiel d'une politique de stationnement payant (ou d'un péage urbain) pour une ville donnée. Le potentiel de réduction dépend du niveau de report modal sur les transports collectifs créé par cette nouvelle tarification et de la différence entre les émissions des voitures particulières d'un côté, et des transports publics de l'autre. Le report modal peut être impacté par d'autres mesures ayant modifié le coût d'usage des voitures (amélioration des performances énergétiques) ou visant à améliorer l'attractivité des transports en commun ou à réduire les congestions en entrée d'agglomération. De même, les émissions évitées dépendent des caractéristiques du parc roulant et donc des actions visant à l'amélioration des performances.

Dans ces conditions, il est difficile d'évaluer la part de réduction incombant à la seule politique de stationnement dans le bilan d'émissions de 2030. Une solution serait de tester chaque mesure une par une afin de tester son potentiel « pur ». Mais ce potentiel pur n'aurait pas plus de vraisemblance, car une politique pertinente de réduction des émissions dans le transport combine forcément ces différentes mesures dans la réalité. En revanche, on peut considérer un ensemble de mesures prises successivement qui viennent compléter une action structurelle associée à un scénario particulier. Une première action induit des réductions d'émission par rapport à la situation de référence, puis une seconde vient compléter la première et induit des réductions incrémentales par rapport à la situation précédente, etc. Il est ainsi possible d'associer à chaque action un potentiel de réduction d'émissions tout en conservant l'approche systémique décrite plus haut.

Il est toutefois évident qu'une stratégie de réduction des émissions de GES ne saurait se résumer à un principe de stricte minimisation des coûts selon lequel les actions seraient mises en place successivement par ordre croissant de coût. Il peut en effet exister plusieurs raisons de ne pas suivre la hiérarchie des courbes de coût marginal. Par exemple, si une action entraine une dépendance de sentier rendant plus difficile l'adoption d'actions ultérieures nécessaires à l'atteinte des objectifs. A contrario, certaines mesures peuvent, par leur action sur le système, rendre possible la mise en place d'autres politiques très efficaces (une politique d'usage des sols peut rendre possible une nouvelle ligne de transport en commun) et devrait donc être mises en œuvre, même si elles s'avéraient plus onéreuses. L'aspect systémique qui existe dans le domaine du transport mais aussi entre usage des sols et bâtiment nécessite donc d'associer une approche de prospective à cette approche par les coûts marginaux, afin de préciser les ensembles de mesures considérés et les trajectoires pertinentes de leurs implémentations successives.

## *Les scénarios*

La démarche prospective est centrale pour la modélisation, elle l'est évidemment tout autant pour la définition et la mise en place de toute politique publique locale : elle permet de mettre à plat les représentations et les options possibles, et d'analyser de manière réaliste les conditions de mise en œuvre et les conséquences. Cela est particulièrement utile dans le processus de définition des politiques climatiques sur le long terme.

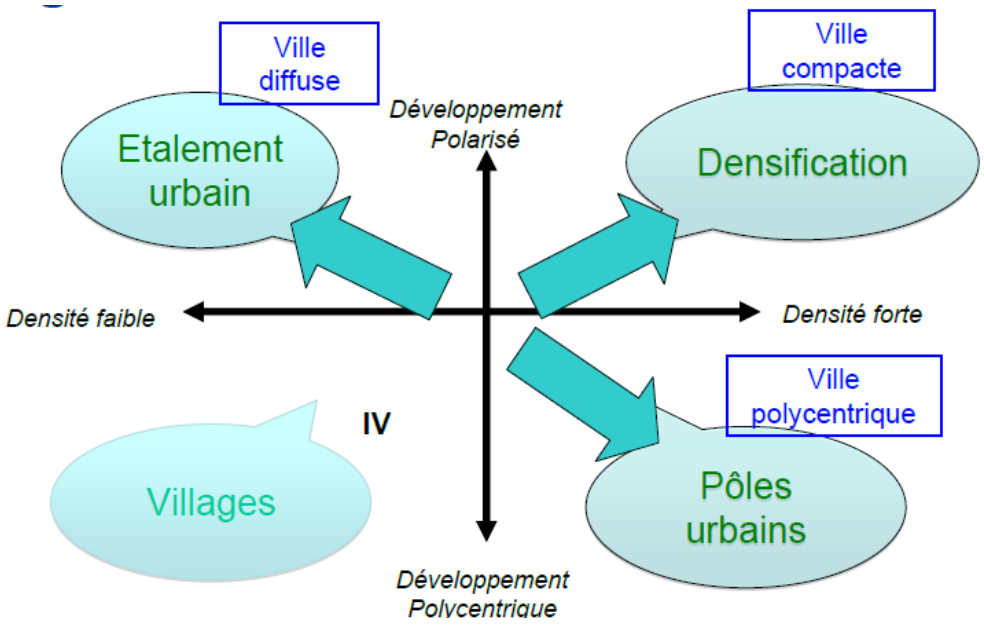
Une stratégie de réduction doit intégrer une trajectoire d'actions systémiques (où un choix conditionne plus fortement les autres, de manière à la fois synchronique et diachronique) et une programmation d'actions incrémentales (on peut choisir l'une ou l'autre sans dépendance de sentier). La construction des scénarios permet d'intégrer ces deux dimensions.

Plusieurs scénarios de développement de l'agglomération de Grenoble ont été retenus dans le cadre du projet ÆTIC et seront simulés avec TRANUS. Ils partent du principe que certaines politiques structurantes sont propres à orienter profondément le fonctionnement du système urbain. Il ne s'agit pas de considérer que certaines formes urbaines sont a priori incompatibles avec des stratégies ambitieuses de réduction des émissions de GES. Ces formes urbaines correspondent à des visions particulières du futur, dans lesquelles il pourra être plus ou moins facile de mettre en œuvre telle ou telle stratégie de réduction d'émission.

Dans le scénario « ville diffuse », la faible mixité fonctionnelle (activités économique et commerciale concentrées) perdure tout comme l'étalement urbain (localisation logements en périphérie) avec une dominante de maisons individuelles à très hautes performances énergétiques (réhabilitation thermique et bâtiments à énergie positive pour les nouveaux logements). Les politiques de transport préservent une place importante pour la voiture, qui demeure dominante sur le territoire urbain et dans la mobilité. La réduction des émissions passerait alors plutôt par des solutions technologiques (véhicules bas carbone) et réglementaires (limitation de vitesse, péages urbains avantageux aux véhicules peu polluants).

Dans le scénario « ville compacte », on recherche une plus grande mixité fonctionnelle (activités économique, commerciale et résidence) en confortant les espaces urbains et en les densifiant de façon à limiter la mobilité individuelle ou en la reportant sur les modes doux. Les politiques de transport en commun ainsi que des politiques visant à restreindre la place de la voiture, tout en renchérissant son usage, participent à ces évolutions. L'espace urbain mono-centrique se concentre sur les principaux pôles urbains de l'agglomération, et le logement collectif (bâtiments basse consommation ou à énergie positive, réseaux de chaleur, etc.) représente l'essentiel des nouvelles habitations.

**Figure 6 :** Les trois grands scénarios

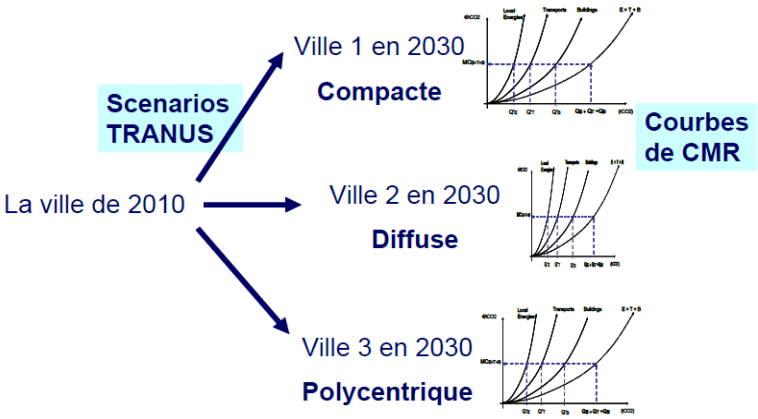



*Source : projet ÆTIC*

Dans le scénario « ville polycentrique », inspiré par la démarche du Scot grenoblois (Schéma de Cohérence Territoriale), on cherche à conforter les espaces urbains du territoire et pas seulement le centre de l'agglomération. Il s'agit de trouver un équilibre entre ces différents pôles en redistribuant l'offre de service et d'emploi tout en développant de nouvelles stratégies de transport en commun adaptées à ces pôles secondaires. Les nouveaux logements seraient majoritairement du type habitat collectif. Le défi est ici d'éviter l'étalement autour des pôles secondaires et de dissuader la mobilité individuelle en offrant des options de transport collectif attractives pour les flux entre les pôles et le centre de l'agglomération.

A chacune de ces visions sera associé un paquet structurant de mesures, qui la définit, et un ensemble de mesures additionnelles qui s'ajoutent au paquet structurant afin d'aller plus loin dans la réduction des émissions. C'est ainsi que l'on envisage de surmonter les difficultés de calcul tenant à l'articulation systémique / incrémental exposées plus haut. Plusieurs variantes pour chacun de ces trois grands scénarios seront développées. Et à chacune de ces variantes correspondront un paquet structurant et une courbe de coût marginal d'abattement.

**Figure 7 :** Un jeu de courbe pour chaque scénario




*Source : projet ÆTIC*

Ainsi, le travail avec les CMR offrira au final non pas le choix entre un certain nombre de mesures mais entre un certain nombre de paquets de mesures.

## Conclusion

La méthodologie décrite dans cet article permet d'utiliser au niveau local les courbes de coût marginal de réduction des émissions, outils puissants dans la recherche de stratégies coût efficace. Elle permet de surmonter la difficulté de comptabilité due à l'aspect systémique et d'intégrer la dimension structurante de certaines actions transport-usage des sols, et ce en passant par la description de scénarios contrastés.

Cette méthodologie ne constitue pas encore une méthode générale ou un modèle intégré permettant une transposition directe à différentes agglomérations ou collectivités qui désireraient développer une approche économique dans le développement de leur plan climat. Cependant, la démarche réunit la recherche d'un programme d'action coût-efficace et la prospective urbaine et se veut réplicable. Elle permet ainsi de poser les questions structurantes, d'avoir une vision la plus complète possible de la problématique de réduction des émissions et de mettre en avant le caractère coût-efficace comme condition nécessaire (mais non-suffisante) du succès des politiques climat. De ce fait, elle contribue à faire apparaître les orientations stratégiques et les arbitrages essentiels dans les politiques visant au développement de la ville post-carbone. La modélisation urbaine, en s'insérant dans une telle démarche, s'avère être un moyen puissant et extrêmement utile pour informer les politiques climatiques et les décisions publiques.

Cette démarche apporte par ailleurs des éléments à la discussion sur le caractère MRV (« Measurable, Reportable, Verifiable ») des projets urbains de réduction des émissions, discussion à l'importance croissante dans les négociations internationales pour le climat.

## Bibliographie


[1] Theys J. et Vidalenc E.
Le territoire, un levier complémentaire pour l'atteinte du facteur 4
*Développement durable et territoires 2, 2011*

[2] Criqui P. et Lefèvre B.
Les Plans Climat Locaux ou la nouvelle dimension des politiques climatiques
*dans : Environnement et société, Bertrand Zuindeau (éd.), 2010. ISBN : 978-2-7574- 0157-6.*

[3] Schipper L., Marie-Lilliu C., Gorham R.
Flexing the link between transport and greenhouse gas emissions: A path for the World Bank
*International Energy Agency, 2000*

[4] Newman P., Kenworthy J.R.
Sustainability and Cities : Overcoming Auto- mobile Dependence
*Island Press, Washington, DC, 1999*

[5] Bertaud A.
The Spatial Organization of Cities: Deliberate Outcome or Unforeseen Consequence ?
*World Development Report, Washington, DC: World Bank, Background Paper, 2003*

[6] Cervero R., Seskin S.
An Evaluation of the Relationship Between Transit and Urban Form
*Transit Cooperative Research Program, Research Results Digest 7, 1995*

[7] Lefèvre B.
Long term energy consumptions of urban transportation: A prospective simulation of "Transport-land uses" policies in Bangalore
*Energy Policy 37, 940-953, 2009*

[8] Bertaud A.
Metropolis: A Mesure of the Spatial Organization of 7 Large Cities

[9] Piron O.
Le renouvellement urbain, analyse systémique
*Éditions du Certu, 2002*

[10] Lowry I.
A model of a metropolis
*RM-4035-RC, Rand Corporation, Santa Monica, 1964*

[11] Wegener M.
Operational urban models: State of the art
*Journal of the American Planning Association 60, 17–29, 1994*

[12] Ewing R. et Bartholomew K.
Comparing Land Use Forecasting Methods
*Journal of the American Planning Association 75, 2009*

[13] Still B.G., May A.D., Bristow A.L.
The assessment of transport impacts on land use: practical uses in strategic planning
*Transport Policy 6, 83–98, 1999*

[14] Nguyen-Luong D.
Projet SIMAURIF (SIMulation de l'interAction Urbanisation transports en Région Ile de France.) : Perfectionnement et valorisation
*IAU-îdF n°5.07.003, 2008*

[15] Lefèvre B.
Soutenabilité Environnementale des Transports Urbains au Sud
*Éditions Européennes Universitaires, 2011*

[16] Wegener M. et Fürst F.
Land use transport interaction : State of the art
*Deliverable 2a of the project TRANSLAND of the 4th RTD Framework Programme of the European Commission, 1999*

[17] de la Barra T.
Integrated Land Use and Transport Modelling-Decision Chains and Hierarchies
*Cambridge Urban and Architectural Studies, Cambridge University Press, 1989*

[18] U.S. Environmental Protection Agency (EPA)
Projecting Land-Use Change: a summary of models for assessing the effects of community growth and change on land-use patterns
*EPA/600/R-00/098, 2000*

# Simuler pour évaluer l'espace des possibles : applications aux stratégies résidentielles et aux politiques de mobilité

Emre Korsu, Marie Hélène Massot, Jean-Pierre Orfeuil, Laurent Proulhac
Université Paris-Est

**La modélisation de trafic vise à anticiper les effets d'un changement parfaitement renseigné de la consistance de l'offre (nouvelle infrastructure, changements tarifaires, modification de service…) sur les volumes de trafic. Elle s'appuie en général sur un petit nombre d'hypothèses comportementales, la plupart du temps de nature économétrique, et débouche sur des modèles dont la composante mathématique est forte, ce qui en fait des « boîtes noires » parfois critiquées. Les simulations qui seront présentées ici visent un objectif plus amont, celui de l'évaluation des potentiels maximaux de politiques définies en termes généraux et de l'identification d'effets connexes parfois ou souvent ignorés de la modélisation de trafic. Elles reposent sur la mobilisation de connaissances empiriques que permettent d'acquérir les enquêtes de mobilité et leur transformation en bases de connaissances et de règles relatives aux évolutions possibles des comportements de déplacements. Elles sont plus transparentes, et donc mieux adaptées au dialogue avec un public large. Elles permettent de se dégager de visions de très court terme (où les localisations résidentielles et les taux d'équipement en véhicules sont fixés) pour intégrer d'éventuelles hypothèses dans ces domaines. En contrepartie, on doit renoncer à une estimation précise des effets, et seuls des potentiels maximaux sont accessibles. Après une présentation générale des principes mis en œuvre, on présentera trois études mettant en œuvre cette logique pour apprécier les potentiels de trois politiques visant la réduction de l'usage de la voiture : la dégradation des vitesses automobiles et le développement des transports publics, l'orientation de la demande vers des deux-roues motorisés « propres », et le rapprochement entre domicile et travail. Les trois études de cas ont été menées en région Île-de-France.**

## Introduction

Le format standard des enquêtes de mobilité date des années cinquante, période où Alan Voorhees [1] développe les modèles gravitaires qui contribuent à rationaliser la production des grandes infrastructures des métropoles américaines. La description des déplacements (origine, destination, motif, période, moyen de transport) est adaptée à l'alimentation des trois premières étapes de ces modèles (génération, distribution, choix du moyen de transport) sur un mode agrégé, puisque les observations des comportements individuels ne servent qu'à l'évaluation des flux entre zones. Elle sert encore aujourd'hui en routine à suivre les grandes tendances d'évolution de la mobilité[1].

La communauté académique internationale de recherche sur la mobilité s'est approprié ce corpus de connaissances pour tenter de comprendre plus en profondeur la formation des comportements de chacun. Deux moments sont particulièrement importants dans cette quête. Le premier est constitué de l' « approche par les activités », initiée par Hagerstrand et ses collègues de la « géographie du temps » [2]. En représentant les déplacements des personnes en ville dans un espace-temps à 3 dimensions (les deux dimensions géographiques et les 24 heures de la journée), ils établissent que l'espace des possibles pour les déplacements des personnes est borné par différents types de contraintes. Des contraintes familiales impliquent une coprésence avec les enfants, des contraintes de travail limitent les plages de temps disponibles, les heures d'ouverture des commerces et services prédéterminent des emplois du temps possibles, et les impacts peuvent se conjuguer, par exemple pour l'allocation de la voiture à l'un ou l'autre des conjoints. En parallèle, certains éléments de mode de vie, comme le choix de rentrer chez soi à midi ou non, peuvent jouer le rôle de variable

[1] Voir les documents périodiques produits par le Certu et le numéro de décembre 2010 de la revue du CGDD.

d'ajustement, libérer du temps ou des possibilités nouvelles. Enfin, l'organisation même des déplacements suppose une certaine cohérence : si je pars au volant d'une voiture le matin, il est probable que je rentrerai avec. Si je rentre à midi chez moi et que la durée de la pause est courte, il est probable que j'utiliserai un mode suffisamment rapide, y compris matin et soir, etc. En termes de modélisation, les interactions entre membres du ménage et les interactions entre déplacements d'une même journée interdisent de considérer qu'une optimisation est possible en considérant individu et déplacement isolés de leur contexte : il faut considérer au moins les boucles (ensemble des déplacements entre un départ du domicile et un retour) et souvent la journée et les rôles familiaux.Le second grand moment est initié par la vision développée par Zahavi [3]. La vulgate scientifique en a retenu la « loi des budgets temps constants », mais la pensée de Zahavi est plus complexe. Il postule que nous cherchons à tirer le meilleur parti de nos interactions dans l'espace urbain, dans une double enveloppe de budget temps de transport et de budget monétaire à ne pas dépasser, cette limite monétaire étant une fraction du revenu, par ailleurs dépendante du niveau d'équipement en moyens de déplacements. Nous en retiendrons la non fongibilité aux limites des temps et des coûts, l'importance à borner le temps total de déplacement de la journée, et un lien à explorer entre les enveloppes monétaires et le niveau d'équipement, que Zahavi avait amorcé avant sa disparition prématurée.

À partir de deux entrées, le temps comme moment et le temps comme durée, l'exploration de cet espace des possibles a souvent été conduite, notamment dans le monde anglo-saxon, sur de petits échantillons dont les capacités d'adaptation sont sondées en profondeur lors d'« enquêtes interactives de réponses déclarées », selon la terminologie consacrée. C'est notamment la démarche adoptée par Martin Lee-Gosselin (réactions à un prix très élevé du carburant) au Québec, suivi de Bruno Faivre d'Arcier en France pour tester l'introduction possible de véhicules à faible autonomie. On peut aussi tenter d'appréhender les adaptations effectivement mises en œuvre par des personnes en « situation extrême », et c'est ce qui est fait en rendant compte des modes de vie des actifs et des membres de leur ménage lorsque les migrations vers le travail sont très longues [4]. On peut enfin utiliser les comportements effectifs pour construire des bases de règles. La combinaison de ces règles crée un espace des possibles dont la fonction n'est pas de dire ce que les gens feront, mais ce qu'ils ne feront certainement pas. Cela permet de borner l'espace des possibles, d'en examiner d'éventuelles stratégies d'extension, d'évaluer la désirabilité de la nouvelle situation sur différents plans… C'est cette démarche que nous présentons à travers trois cas différents, tous testés en Île-de-France.

## Tous en modes doux, et heureux de l'être

### *L'esprit de la démarche « Pari 21 » [5]*

L'esprit de la politique testée est le suivant : les responsables politiques promeuvent les « modes doux » ; la population qui utilise aujourd'hui l'automobile suit, en ce sens qu'elle se transfère sur la marche, le vélo ou les transports collectifs chaque fois que c'est possible, sans regret et sans retour (la réduction de la durée de déplacement en voiture de Pierre liée au transfert de Paul vers les transports publics n'est pas prise en compte). En revanche, seule la logique de transfert de mode est examinée : les origines et destinations sont fixées et non sujettes à arbitrage, sauf dans un cas, celui des allers et retours à midi du travail, qui peuvent être supprimés.

### *La logique de simulation : une combinatoire de « règles expertes »*

Reste à édicter les règles du possible au niveau des déplacements, des boucles[2] et de la journée. Au niveau des déplacements, sont exclus a priori des transferts les déplacements impliquant le transport de charges lourdes et ceux qui consistent à accompagner plus d'une personne. Les transferts vers la marche sont acceptables si la distance est inférieure à 2 kilomètres, ceux vers le vélo le sont pour des distances de 2 à 11 km suivant les motifs et l'âge de la personne. Les transferts vers les transports publics le sont si les horaires du déplacement sont compatibles avec la plage de service, si les points d'entrée et de sortie du système TC (arrêts de bus, gares...) sont à des distances des origines destinations inférieures à un seuil (de 700 mètres pour un arrêt de bus à 2 km pour une gare), et si la somme des distances terminales n'excède pas la distance du déplacement lui-même. Au niveau de la journée

[2] On appelle boucle toute succession de déplacements revenant au point de départ, qui est ici soit le domicile (par exemple une boucle domicile, dépose d'enfants, achats, domicile) ou le travail (lieu de travail, affaires professionnelles, achats, lieu de travail).

journée, la règle est simple : ne pas dépasser un seuil donné de budget temps de transport (BTT maximum fixé par l'exercice, qui peut être supérieur au BTT effectivement observé). Pour passer de l'acceptable à l'accepté, il faut passer par les boucles (pour qu'aucun déplacement ne « bloque » la chaîne des transferts à ce niveau), et par la journée, afin que le budget temps total résultant de l'ensemble des transferts n'excède pas un seuil de budget temps prédéfini, défini par l'exercice, qui peut d'ailleurs être supérieur au budget temps effectivement observé pour l'individu. Cette dernière contrainte est modulée au cours de l'exercice, pour tester « aux limites » la logique. Si le seuil est dépassé au niveau de la journée, on reprend alors les boucles et leurs transferts potentiels, et l'on n'effectue que les meilleurs transferts possibles compatibles avec la contrainte de budget temps.

## *Les informations nécessaires*

Trois ingrédients sont nécessaires à la réalisation de l'exercice. Il faut une enquête, c'est l'enquête globale de transport de l'Île-de-France, édition 1991. Nous n'avons retenu que les boucles « touchant » la zone dense, c'est-à-dire dont au moins un déplacement a son origine ou sa destination sur le territoire de Paris et de la petite couronne. Il faut une base d'offre, donnant les temps de parcours en transport public et les distances de rabattement, pour tout couple d'origine destination. La Ratp l'a obligeamment et gracieusement fournie dans la situation à la date de l'enquête et pour des situations hypothétiques d'augmentation de l'offre, inspirées des objectifs Pdu et Sdrif, complétées par des augmentations de fréquence. Il faut enfin des vitesses de référence pour la marche et le vélo. Elles sont issues de l'observation des moyennes des vitesses effectivement pratiquées dans ces modes.

## *Les résultats principaux*

Parmi toutes les boucles touchant la zone dense, seules 26 % font appel à la voiture, et dans ce cas elle assure la quasi-totalité (96 %) des déplacements des boucles concernées. Les individus concernés sont surtout des résidents de cette zone (75 %), des hommes (65 %), des actifs (81 %). Ce sont de grands mobiles. Ils font 4,5 déplacements, parcourent 37 km[3] et y passent 2 heures, contre respectivement 3,5 déplacements, 22 kilomètres et 80 minutes pour l'ensemble des franciliens. On en tire deux premiers indices. L'usage de la voiture est déjà fortement rationalisé (il ne concerne que le quart des boucles, une situation très rare en France), et ceux qui sont en voiture ont déjà un budget temps élevé, bien qu'ils se déplacent plus rapidement (18,5 km/h[4] contre 15,8 km/h) que l'ensemble de la population.

L'analyse du potentiel de transfert est alors conduite sous une première hypothèse, celle des temps de parcours du réseau de transport public existant et d'une marge de croissance du budget-temps de chaque personne de 25 %. 16 % des boucles faisant appel à la voiture sont transférables, ce qui réduirait de 9 % les distances parcourues en voiture conducteur dans la zone. L'essentiel des transferts se fait sur les transports collectifs (70 %) puis sur le vélo (18 %) puis sur la marche (12 %). 56 % des boucles transférées se traduisent par des augmentations de durée de déplacements, mais 44 % par des diminutions, en particulier pour des transferts vers le vélo. Les boucles transférées sont plus courtes (en distance) que les boucles soumises à la procédure (14 km contre 26) mais lentes, avec une vitesse automobile de 12 km/h contre 19 km/h en moyenne. La procédure attaque sélectivement les déplacements très lents en voiture. Parmi les individus transférés, 43 % gagneraient du temps et passeraient de 129 à 110 minutes par jour en déplacements, 57 % en perdraient et passeraient de 95 à 108 minutes par jour.

L'analyse des échecs de la procédure (les 84 % de boucles non transférables) est aussi intéressante que celle de ses succès. 27 % sont liés aux motifs, 3 % aux budgets temps déjà saturés (supérieurs à 5 heures par jour), 1 % à des boucles dans des périodes où les transports collectifs n'opèrent pas, 10 % à des boucles sans desserte en transport public[5] et 42 % à des transferts potentiels qui conduiraient le budget temps au-delà du seuil fixé. La logique de simulation permet de faire varier le seuil. Le taux de succès de 16 % obtenu avec une croissance tolérée de 25 % du budget temps passe à 7,5 % en l'absence de toute tolérance, et à 38 % en l'absence de toute contrainte de budget temps (hypothèse irréaliste, dont l'intérêt est de montrer que 62 % des boucles sont hors de portée de tout transfert, à origines et destinations données). La simulation permet enfin de tester l'efficacité de politiques envisagées ou envisageables.

[3] Toutes les distances sont exprimées « à vol d'oiseau ».

[4] Les vitesses sont calculées avec la distance « à vol d'oiseau ». La vitesse « réelle » est de 1,2 à 1,3 fois supérieure.

[5] Il s'agit de déplacements dont l'origine ou la destination sont trop éloignées des points d'entrée dans le réseau, cette distance allant de 1200 mètres pour les bus en banlieue à 2000 mètres pour les gares.

La revue des développements envisageables de l'offre de transport public est inspirée des documents Pdu et Sdrif. Elle permet de tester différents scénarios dont le plus ambitieux correspond à une augmentation de 45 % de l'offre (mesurée en PKO - Places-Kilomètres Offertes) accompagnée d'une amélioration significative de la vitesse des bus, qui exige des financements additionnels majeurs et des gestions de voirie encore plus performantes que les couloirs bus actuels. On y a adjoint, en option, une « libération des contraintes » sur les achats exceptionnels et les accompagnements reposant sur une prise en charge de ces fonctions par des services, ainsi que de facilités de rabattement plus importantes sur les gares de banlieue en vélo ou en voiture, permettant d'étendre les aires d'attraction des gares et de diminuer les temps d'accès. Lorsque l'augmentation maximale de l'offre transport public est considérée, avec une marge de croissance de 25 % du budget temps, on passe de 16 % à 21 % la proportion de boucles transférables et de 9 % à 13 % les circulations automobiles transférables. Lorsqu'on y adjoint les options de libération des contraintes envisagées, on monte à 34 % des boucles et 23 % des circulations automobiles évitables. On peut retenir de cette partie de l'exercice trois enseignements : il faut des hypothèses extrêmement hardies (et sans doute peu réalistes) pour arriver à « supprimer » un quart des circulations automobiles. D'éventuels services complémentaires libérant les personnes de contraintes de charge ou d'accompagnement, ainsi qu'une amélioration des possibilités de rabattement sur les gares apporte au moins autant que les développements de l'offre. Enfin, last but not the least, les trois quarts des circulations ne sont pas transférables à origines et destinations données.

Le caractère pessimiste ou optimiste de ces résultats peut être testé en référence à d'autres exercices de modélisation et aux attentes des politiques. Olivier Morellet a conduit, avec Matisse, un exercice à fondement économétrique, mais avec des transformations non marginales des vitesses pratiquées en voiture et en introduisant des péages élevés. Les transferts auxquels il parvient sont inférieurs aux nôtres, dont il faut rappeler qu'ils sont des transferts potentiels. En revanche, l'adjoint aux transports du maire de Paris de la période 2002-2008 a considéré ces résultats comme exagérément pessimistes et a donc commandé une autre étude. Les modélisateurs ne sont ni optimistes, ni pessimistes, ils fondent leurs conclusions sur les conséquences rationnelles du déroulement d'hypothèses. Les hypothèses de cet exercice reposaient sur un transfert, à origine destination donnée, de la voiture vers les modes doux connus. La simulation suivante va s'efforcer d'analyser les conséquences d'une relaxation de l'hypothèse de stabilité des origines destinations par des changements résidentiels.

## Tous à 30 minutes du travail : pour qui le paradis, pour qui l'enfer ?

### *L'esprit de la démarche « ville cohérente »[6]*

La ville étalée inquiète les pouvoirs publics pour des raisons urbaines (« tout sauf Los Angeles »), environnementales (consommation croissante d'espace et dépendance automobile), sociales (précarisation énergétique des couches moyennes). Face à ces enjeux, la notion de compacité urbaine s'est imposée bien que, a priori, la compacité de l'agencement n'épuise pas la question de la maîtrise des distances à parcourir. Si Montreuil et La Défense se situent en zone dense francilienne, il n'est pas indifférent que l'actif résidant à Montreuil travaille à Montreuil, Vincennes ou à La Défense. Par ailleurs, du point de vue de la mobilité et de ses conséquences négatives, un actif de grande couronne travaillant à quelques kilomètres de son domicile ne pose pas de problème, et il y a beaucoup d'actifs en grande couronne dans cette situation… Ces observations sont à l'origine du concept de ville cohérente : Si la notion de ville compacte implique la proximité de tous à tous, celle de ville cohérente implique une proximité de chacun aux principaux endroits où il a à se rendre. La proximité, vertu de la compacité, est conservée, mais allégée ; en revanche, la cohérence fonctionnelle y est exigée. Dès lors notre analyse consiste à représenter ce que serait le territoire francilien si l'on se donnait pour contrainte que chacun réside à moins de x minutes de son travail, et à en dérouler les conséquences positives et négatives.

### *La logique de simulation*

On appelle « ville cohérente » un agencement urbain tel que *chacun* puisse être à moins de x minutes de son travail (x étant fixé entre 20 et 45 minutes dans ce travail). Le travail est choisi comme activité de référence parce qu'il génère des déplacements répétitifs et réguliers, et que le motif travail représente plus de la moitié des distances parcourues au cours d'un jour ouvrable. Le concept est

différent, mais proche de celui d'« excess commuting » de la littérature anglo-saxonne.

L'objectif est de créer une ville virtuelle où chaque actif serait à moins de x minutes de son emploi, dans un logement aussi proche que possible de ses aspirations et possibilités, révélées par ses comportements et ceux des autres actifs proches de ses conditions de vie. La procédure consiste d'abord à séparer la population de ménages en deux groupes, ceux qui sont considérés comme « bien localisés, et ceux qui ne le sont pas. Pour ce faire, un seuil « x » de durée de migration est choisi. Les estimations centrales reposent sur un seuil de 30 minutes, en voiture ou en transport en commun : sont considérés comme à relocaliser ceux qui doivent mettre plus de 30 minutes, que ce soit en voiture ou en transport en commun.

Dans la procédure, on considère les lieux d'emplois comme donnés, ce sont les lieux de résidence qui sont appelés à évoluer. Ce choix est purement méthodologique. À chaque lieu d'emploi j, on associe un bassin d'habitat Bj, ensemble des zones Zi telles que la migration de la zone vers le lieu d'emploi puisse se faire dans un temps Tij inférieur au seuil retenu. Bj est le bassin d'habitat du lieu d'emploi j. Chaque ménage d'actifs peut être dans l'une des situations suivantes :

- C'est un ménage avec un seul actif travaillant en j, il réside dans une zone Hi appartenant au bassin d'habitat Bj. Il est bien localisé, il ne sera pas soumis à relogement. Dans le cas contraire (ménage à un actif, mais ne résidant pas en Bj), il est soumis à la procédure de relogement.
- C'est un ménage dont les deux adultes travaillent. C'est un ménage à deux actifs. S'il réside dans le bassin d'habitat de l'un des lieux d'emplois des actifs, il est également considéré comme bien localisé ou ajusté. C'est le cas par exemple d'un ménage dont un actif travaille à 15 minutes, l'autre à 1 heure. Si leur lieu de résidence n'est dans le bassin d'habitat d'aucun des deux lieux d'emploi, le ménage sera relocalisé dans le bassin d'habitat du lieu d'emploi du conjoint défini comme l'adulte actif qui n'est pas la personne de référence.

Pour que la procédure ait un certain réalisme, il importe de se donner des règles de relogement acceptables, avec des typologies de ménages et de logements. Le principe est de reloger chaque ménage dans les mêmes conditions de logement que les ménages du même type vivant dans le bassin préalablement défini. Les ménages sont classés en 108 classes, selon la catégorie professionnelle de la personne de référence (6 modalités), le nombre d'actifs (3 modalités) et le profil familial (8 modalités). On définit par ailleurs 36 types de logements, selon la nature du logement (maison ou appartement), le statut d'occupation (locataires du privé ou du public, propriétaires) et le nombre de pièces (de 1 à 6 et plus). Le principe le suivant : un ménage « relocalisable » est virtuellement relocalisé dans le bassin d'habitat du lieu d'emploi de l'actif (ménages à un actif) ou du conjoint actif (ménages à 2 actifs). Il occupe en probabilité un type de logement correspondant à la distribution des logements des personnes de sa classe qui appartiennent déjà au même bassin d'habitat. Cette procédure originale offre un certain réalisme, assure un équilibre d'ensemble pour la région (il y a autant de logements « libérés » que de logements réoccupés), mais elle n'assure cet équilibre ni au niveau des bassins d'habitat, ni au niveau des types de logement demandés, ce qui permet d'identifier les facteurs de blocage liés à l'offre de logement dans l'univers résidentiel.

La recherche vise à répondre aux questions suivantes : cet agencement est-il possible en Île-de-France ? Quelle part de la population concerne-t-il ? Quelles évolutions seraient nécessaires en termes de construction de logements ? Quels en seraient les bénéfices en termes de réduction du trafic automobile?

### *Les bases de données nécessaires*

Pour mettre en œuvre le concept, il faut disposer d'un découpage du territoire en zones. Nous avons retenu un découpage par arrondissement à Paris et par commune dans le reste de la région. Il faut une qualification de ces zones en termes de nombres d'emplois et de nombre de logements, et, pour les approches très désagrégées développées ici, de caractéristiques des emplois (en catégories socio-professionnelles ou CSP) et des résidences (types de logements, prix). Le recensement de 1999 permet d'accéder aux emplois par CSP et par zone, aux logements par CSP et par type (taille, mode d'occupation…) et aux distances entre domicile et travail, qu'on peut convertir en durée par la matrice des temps de parcours de commune à commune de la Dreif en voiture et en transport public. Cette base, qui ne permet de calculer que grossièrement des « économies de mobilité » sur les déplacements vers le travail, a l'intérêt de permettre de travailler sur des populations très nombreuses. L'enquête globale de transport (EGT 2001) n'offre qu'un échantillon plus réduit, mais donne l'ensemble des déplacements effectifs (travail et autres) d'une journée. Par ailleurs, nous avons complété

la description physique des parcs de logement par une description économique incluant les prix au m$^2$ à l'achat ou à la location.

## *Les résultats principaux*

La taille de la population concernée est plus faible que ce qu'on pourrait croire. En effet, seuls 27 % des ménages d'actifs doivent être réaffectés au seuil de 30 minutes. Ils sont 42 % pour un seuil de 20 minutes en voiture et 30 minutes en transport public, 9 % au seuil de 45 minutes. La population « bien localisée » est majoritaire : on peut comprendre que, pour elle, les injonctions à la compacité comme solution à des maux qu'elle ne vit pas directement, ne soit pas une priorité. La structure de la population concernée est pour partie surprenante. Certains résultats confirment les intuitions courantes, comme la forte surreprésentation des actifs travaillant à Paris, le lieu de travail étant le principal déterminant de l'éloignement. En revanche, plusieurs résultats infirment les intuitions courantes. Les ménages fortement surreprésentés dans l'éloignement sont des personnes seules (et des familles monoparentales), et des ménages du haut de la hiérarchie des revenus. Enfin, les caractéristiques du logement ne sont pas discriminantes : la probabilité d'être à relocaliser est pratiquement identique pour les locataires du public et du privé, est insensible à la taille du logement et n'est que très marginalement supérieure chez les propriétaires et les accédants.

La concentration de l'emploi est un facteur majeur d'éloignement. 27 zones de travail (sur près de 1300) sont à l'origine de bassins d'habitat aux coûts immobiliers uniformément très élevés. Ces 2 % de zones concentrent 33 % de l'emploi. 46 % des actifs à relocaliser y travaillent (40 % chez les cadres, 58 % chez les employés). La concentration de l'emploi est une origine majeure de la formation de l'éloignement. Les politiques efficaces seraient peut-être plus dans le champ d'une maîtrise publique des implantations tertiaires plus affirmée que dans celui des relocalisations d'actifs.

Les prix immobiliers et les comportements résidentiels des ménages aisés contribuent à l'éloignement. Deux mécanismes peuvent être avancés pour expliquer les situations d'éloignement. Les ménages s'éloignent parce qu'ils n'ont pas les moyens de trouver plus près chaussure résidentielle à leur pied. Les ménages choisissent leurs résidences en fonction de caractéristiques du voisinage plus que de la proximité du travail. Les travaux sur la valeur de l'immobilier intègrent des caractéristiques globales d'accès aux réseaux ou aux emplois et des indications sur les caractéristiques du voisinage. Ils font apparaître au fil du temps une croissance relative de la part attribuée aux caractéristiques de voisinage, notamment du fait des tendances ségrégatives, si bien que le prix dépend de la « valeur » des voisins…

Cette question peut être éclairée en comparant le niveau de prix de l'environnement de la résidence actuelle avec le niveau de prix du bassin d'habitat où l'on souhaite reloger les ménages. Les résultats sont clairs. Pour les ménages éloignés à un actif, le niveau de prix de l'environnement de la résidence actuelle est dans 58 % des cas significativement inférieur à celui pratiqué dans le bassin d'habitat de son emploi, c'est l'inverse dans 29 % des cas et les prix sont comparables dans 13 % des cas. Les situations sont très tranchées pour les employés (70 % vivent dans un lieu moins cher, 18 % dans un lieu plus cher), plus équilibrées pour les cadres (respectivement 45 % et 42 %), suggérant pour eux une détermination très significative par les caractéristiques de l'adresse. Pour les ménages à deux actifs, la comparaison est plus complexe, mais fait apparaître des résultats semblables, avec un avantage de prix de la localisation actuelle par rapport aux deux bassins d'habitat potentiels, et des différences entre employés et cadres comparables. L'impression qui se dégage est celle d'un processus plus que d'un état : les ménages aux revenus les plus élevés choisissent leur résidence en fonction des aménités, dont celles du niveau social du voisinage. Ce faisant, ils bloquent par les prix et les quantités restant disponibles l'accès des catégories plus modestes plus orientées vers la proximité à l'emploi, et les conduisent à des choix éloignés. Les choix des uns conditionnent la restriction des univers de choix des autres.

Le parc immobilier, dans sa dimension physique n'est pas en capacité de soutenir le jeu des réaffectations, mais pourrait l'être par des efforts ciblés et constants. Chaque actif « à relocaliser » libère un logement et en occupe un autre, si bien que le bilan global sur la région est équilibré. En revanche, rien ne garantit l'équilibre en termes de localisations infrarégionales ou de segments de parc, ce qui induit des déficits ou des excédents sur le parc immobilier qui peuvent constituer un guide pour la planification, ou l'orientation des décisions de mises en chantier des acteurs publics ou privés. Sur les 760 000 ménages qui participent aux relogements, 29 % sont orientés vers des bassins d'habitat où l'offre est excédentaire par rapport à la demande. 35 % le sont vers des bassins où l'offre n'est qu'en léger déficit, mais

35 % le sont vers des bassins d'habitat où le déficit est plus sévère, supérieur à 10 %. Les situations de déficit sévère concernent les bassins d'habitat des arrondissements parisiens (64 % des actifs relocalisés dans ces bassins le sont dans des situations de déficit sévère) et quelques communes de petite couronne. À l'inverse, la quasi intégralité des actifs relocalisés en grande couronne le seraient en situation d'excédent.

Les segments de parc pour lesquels les situations déficitaires sont les plus prononcées sont les grands appartements locatifs des parcs privé et social (45 % de situation déficitaires). Les maisons individuelles sont en excédent assez général. Un focus sur le logement social, instrument piloté par les pouvoirs publics, donne une autre mesure des enjeux : le déficit représenterait 18 % de l'offre actuelle à Paris, 5 % dans les Hauts de Seine. Il y aurait des excédents ailleurs.

Les avantages en termes de déplacements peuvent être estimés d'abord de façon assez grossière à partir des recensements, en supposant que l'ensemble des « relocalisés » est désormais dans la même situation que l'ensemble des « bien ajustés », et que les uns et les autres font un aller retour vers le travail chaque jour. On obtient une baisse des distances au travail de 75 % pour les monoactifs relocalisés, de 58 % pour les biactifs relocalisés, et de 30 % sur l'ensemble de la population active. Si on suppose que le transfert de résidence n'entraîne pas de transfert dans l'usage des modes, les actifs des ménages éloignés utilisant la voiture verraient leur distance diminuer de 63 %, et l'économie représenterait 25 % des km en voiture des trajets « travail » de l'échantillon, et 10 % des circulations automobiles générales. Pour les transports publics, les distances au travail des utilisateurs décroîtraient de 69 %. La baisse d'activité des transports publics représenterait de l'ordre de 35 % des distances parcourues pour le travail et de 31 % des distances totales parcourues en transport public un jour donné.

Les avantages peuvent être estimés de façon plus fine avec l'Enquête globale de transport (EGT) qui permet d'intégrer tous les déplacements quels qu'en soient les motifs d'une part, et de poser une règle comportementale plus réaliste d'autre part en faisant l'hypothèse que les populations relocalisées adopteront les mêmes comporte-ments que leurs « jumeaux » (même CSP, même nombre d'actifs, même structure familiale) déjà bien localisés. On obtient des baisses de circulation automobile pour l'ensemble des déplacements liés au travail de 10 % pour l'automobile et de 47 % pour les transports publics, et de 7 % et 40 % pour l'automobile et les transports publics pour l'ensemble des motifs.

### *Conclusion*

Les résultats de cet exercice heuristique, fondé sur le déroulement des conséquences d'un ensemble de règles explicites et a priori souhaitables, nous renvoient comme facteurs limitants notre demi-siècle de planification de la région, nos croyances et les institutions qui y ont été associées : les transports publics rapides, et notamment les RER et trains de banlieue, éléments indispensables à une unité régionale du marché de l'emploi mise en cause ici par la logique de rapprochement, qui verraient fondre leurs clientèles ; les organismes de logement social, qui verraient leurs parcs excédentaires en grande couronne et dans les petites couronnes Nord et Est, et encore plus déficitaires à Paris et dans les Hauts de Seine ; les clusters, type La Défense, dont la concentration et la localisation ne seraient compatibles avec une proximité des actifs qu'au prix d'un effort sans doute hors de portée en matière de logement ; les communes de la partie centrale, dont beaucoup n'ont pas proportionné l'offre résidentielle aux emplois ; la ville de Paris enfin, qui verrait remplacer des actifs « haut de gamme » par des actifs moins bien côtés ; les couches supérieures enfin, qui seraient invitées à moins d'entre soi résidentiel. Ces difficultés expliquent sans doute que le rapprochement entre domicile et emploi, s'il existe encore parfois dans la rhétorique politique, soit si peu sur l'agenda politique : trop d'institutions, trop de gens qui comptent n'y ont pas intérêt.

## La mobilité électrique. Pour tous ? En scooter ou en voiture ?

### *L'esprit de la démarche « petit véhicule urbain » [7]*

Face aux insatisfactions générées par l'usage de l'automobile en ville, les exercices précédents ont tenté d'évaluer les apports potentiels des transferts vers les transports publics et les modes doux ainsi que ceux qui résulteraient d'une ville plus cohérente. Ils montrent des potentiels intéressants, mais une capacité élevée de résilience du système automobile. D'où une nouvelle direction de recherche. La mobilité des franciliens pourrait-elle reposer sur des véhicules individuels à

forte urbanité, préservant l'autonomie des individus mais ne présentant pas les inconvénients de l'automobile généraliste ? Cette piste, explorée par un groupe de travail animé par l'Ademe[6], se situe à l'interface d'un double constat et d'une volonté publique. Le constat, c'est le retour réussi du vélo en ville et l'explosion de l'usage des deux-roues à moteur dans les cœurs urbains congestionnés. L'ambition publique, c'est celle de développer la mobilité électrique. L'exercice recherche donc le potentiel de détention et d'usage de véhicules à motorisation électrique. Les salons du développement ou de la mobilité durables en exposent toute une gamme, de la trottinette à la voiture, en passant par les vélos, scooters, tricycles et quadricycles. Le concept se définit par la négative : c'est un véhicule qui a quelque chose de moins que la voiture – moins de places, ou moins de roues, ou moins d'autonomie, ou moins de confort ou de sécurité… Il peut aussi avoir, pour l'usager, quelque chose de plus : il peut circuler et stationner mieux, coûter moins… Il faut donc définir un cadre pour apprécier l'équilibre de ces avantages et de ces inconvénients. Par ailleurs, on ne dispose pas d'expérience significative d'usage de ces véhicules. On peut néanmoins repérer leurs apports potentiels en rapprochant leurs caractéristiques de celles de véhicules en usage : vélos, cyclomoteurs, scooters, voitures. La réponse à trois questions nous paraît donc nécessaire pour apprécier l'avenir de ce type de véhicules :

Les déplacements que nous effectuons au quotidien sont-ils techniquement réalisables avec ces types de véhicules ?

Si c'est le cas, a-t-on un intérêt économique à s'équiper personnellement de tels véhicules, sachant qu'ils ne peuvent pas satisfaire tous nos besoins de mobilité, ou faut-il penser leur diffusion à travers des flottes de véhicules partagés ?

Enfin, la diffusion potentielle de ces véhicules est-elle limitée ou importante ? Une diffusion limitée à des niches ne permettrait ni la baisse des coûts par effet de série, ni la mise en place généralisée de tous les éléments de système qui contribuent au développement d'un mode, ni le changement des ambiances urbaines et de l'image d'un quotidien urbain trop « envahi » par l'automobile. Par ailleurs, elle n'impliquerait pas les changements des modes d'exploitation des réseaux (vitesse de référence par exemple) qui assureraient aux aux véhicules légers un degré de protection convenable.

## *La logique de simulation*

C'est une logique désagrégée et « bottom-up », à origines / destinations fixées. Seuls sont soumis à une procédure de transfert potentiel les franciliens automobilistes. Les potentiels de transferts des transports publics vers ces nouveaux véhicules ne sont pas dans le champ de ce travail. Trois étapes principales balisent la procédure.

Il faut d'abord définir les propriétés des véhicules alternatifs à la voiture. Nous définissons, en référence à des véhicules existants, sept objets alternatifs dont trois sont en usage aujourd'hui et quatre sont des candidats à l'entrée dans le système de mobilité. Ils seront nommés ci-dessous « vélo », « vélo électrique », « cyclomoteur électrique », « cyclomoteur thermique », « scooter électrique », « scooter », « voiture électrique ». Leur nom importe peu : leurs propriétés sont entièrement définies par des spécifications techniques et économiques.

Il faut ensuite définir ce que ces véhicules ne peuvent pas faire. Des contraintes techniques portant sur l'âge des conducteurs (pas de deux-roues au delà de 70 ans…), la portée de la sortie (de 8 km à vol d'oiseau pour le vélo à 24 km pour le scooter) et la capacité des véhicules déterminent les substitutions interdites (par exemple l'usage d'un véhicule à deux roues pour un groupe de trois personnes en déplacement, ou à l'occasion de déplacements très longs). On obtient par soustraction l'espace de ce qui est techniquement possible.

Ce qui est techniquement possible n'est pas nécessairement intéressant économiquement pour les personnes : il faut en effet que le coût global (de la boucle, de la journée…) soit inférieur au coût global en voiture. Ce coût global est composé d'un coût marginal d'usage (coût temporel et monétaire) et d'un coût lié à la détention d'un véhicule alternatif.

Le coût temporel incorpore les caractéristiques de vitesse de circulation des véhicules (variables selon le territoire du déplacement) et des temps de recherche de stationnement (variables selon les territoires). Les vitesses des modes alternatifs sont en moyenne défavorables au vélo, favorables au scooter, neutres pour la voiture électrique. Les durées de recherche de stationnement sont favorables à tous les deux-roues, et une simulation d'exclusion des droits de stationnement sur voirie aux véhicules thermiques est effectuée pour apprécier la sensibilité du potentiel

[6] Nous remercions MM. Moisan, Morcheoine et Plassat et les membres du groupe de travail pour les hypothèses sur les coûts des véhicules sur la base des technologies 2020.

d'usage de la voiture électrique à cette mesure. Le coût monétaire énergétique varie avec l'énergie utilisée (carburant ou électricité).

Le véhicule alternatif peut remplacer un véhicule existant (hypothèse de substitution) ou s'ajouter aux véhicules détenus (hypothèse de complémentarité). Le coût lié à la détention est apprécié en calculant un amortissement à partir des coûts d'achat des véhicules et de leurs durées de vie. Dans le premier cas, il suffit que le coût global du véhicule envisagé soit inférieur au coût global de la voiture présente. Dans le second cas, l'exigence est supérieure : il faut que le coût global du véhicule alternatif soit inférieur au coût marginal d'usage d'une voiture existante.

Cette logique, qui incorpore des coûts fixes et des coûts variables, est ignorée des modélisations classiques, alors même que les coûts monétaires variables d'usage sont en moyenne inférieurs aux coûts de détention (amortissement, assurance, entretien…). Elle est indispensable dès lors que l'équipement est supposé variable. Qu'elle soit indispensable ne l'empêche pas de poser des problèmes redoutables, qui ne sont que partiellement résolus dans l'exercice présenté. D'une part, dans le cas de la substitution, la question des usages que permettait le véhicule précédent et que ne permet plus le véhicule testé (un long déplacement de vacances, qui sera alors réalisé autrement) reste entière. D'autre part, le calcul de l'amortissement lui-même pose un problème délicat. Un prix de véhicule et une durée de vie permettent de calculer sans problème un amortissement *annuel*. Le coût d'amortissement utile à notre calcul est un coût quotidien. Il dépend du nombre de jours effectifs d'utilisation potentielle que nous ne connaissons pas[7], puisque l'enquête utilisée ne recense que les déplacements d'une journée : il est possible que le véhicule alternatif soit utilisable le jour d'enquête, mais pas le lendemain, ce qu'on ignore. Par simplicité, nous avons estimé ici l'amortissement journalier comme le quotient de l'amortissement annuel par 365. Cette hypothèse, optimiste, tend à favoriser les transferts potentiels. Enfin, les éléments mis en œuvre négligent les caractéristiques de pénibilité et de sécurité du déplacement, ainsi que certains coûts fixes (assurance par exemple) qui peuvent ne pas être proportionnés aux coûts d'équipement.

Les estimations de coût d'usage (dominés par le prix du temps fixé à 10 € l'heure) sont assez robustes. Les estimations de coût de possession sont plus aléatoires, puisque ces véhicules ne sont pas vendus aujourd'hui et qu'une incertitude persiste quant à leurs jours d'amortissement effectifs. Pour ces raisons, l'exercice vaut d'abord pour sa dimension méthodologique, sa capacité à intégrer dans une même logique les coûts d'équipement et les coûts d'usage.

### *Les bases de données nécessaires*

L'exercice nécessite une base de données de mobilité, c'est ici l'enquête globale transport, édition 2001. Il nécessite une table des caractéristiques techniques et économiques des véhicules. Elle a été fournie par le groupe de travail de l'Ademe. Les coûts associés à la possession et à l'usage de ces véhicules sont estimés à horizon 2020, pour une citadine classique et pour les véhicules alternatifs, dans une hypothèse de standardisation des batteries.

### *Les résultats principaux*

L'usage de la voiture en tant que conducteur est majoritaire (55 %) dans la population sélectionnée, mais donc loin d'être exclusif, notamment du fait que seuls 55 % des conducteurs potentiels conduisent effectivement le jour d'enquête. À l'échelle de la journée, 80 % de la population s'étant déplacée en voiture conducteur a réalisé des déplacements dont la somme des portées n'excède pas 24 km en moyenne. Ces 80 % sont à l'origine de 59 % des déplacements en voiture conducteur mais de 29 % des circulations seulement. À l'inverse, les 20 % qui font plus de 24 km au volant représentent 41 % des déplacements en voiture conducteur, mais 71 % des distances parcourues. Les distances parcourues par les voitures avec un passager représentent 14,7 % des distances parcourues en voiture (c'est un facteur d'élimination des vélos et cyclomoteurs) et les distances parcourues avec deux passagers ou plus représentent 4,4 % des distances, et c'est un facteur d'élimination des scooters.

Les liaisons n'impliquant pas Paris constituent l'essentiel des circulations (81 %). Sur ces liaisons, les transports publics et les deux-roues motorisés sont très minoritaires par rapport à la voiture. Pour les liaisons avec Paris, les transports publics l'emportent sur la voiture, malgré une vitesse plus faible. La part des deux-roues motorisés devient significative. Ils sont plus rapides que la voiture (de 30 à 60 % selon les liaisons), et a fortiori que les transports publics, et contribuent à la réalisation de déplacements d'une distance légèrement supérieure à celle des déplacements en voiture. Sur ces liaisons, un modèle de trafic qui

[7] Une solution à ce problème est explorée dans le rapport complet.

représenterait trois modes (TC, VP, deux roues motorisés) et serait fondé sur un coût généralisé additionnant coût monétaire et valeur du temps sans tenir compte de caractéristiques de confort ou de sécurité donnerait les deux-roues motorisés comme mode majoritaire !

Les sorties techniquement transférables sont évaluées pour chaque mode en mettant en œuvre les seules contraintes d'âge, de distance, et de nombre personnes dans le groupe en déplacement. Le vélo classique pourrait être utilisé par 24 % des individus, et pour 21 % des sorties, et 5 % des circulations seraient supprimées. Le vélo électrique fait un peu mieux, avec un peu plus du tiers des individus concernés, 30% des sorties, et 9% des distances. Le cyclomoteur fait monter ces parts à respectivement 45 %, 40 % et 19 %. Le passage au « scooter » fait à nouveau monter les potentiels : respectivement 62 %, 63 % et 31 % des distances deviennent substituables. Enfin une voiture électrique disposant d'une autonomie de 100 km (hypothèse testée) peut se substituer à pratiquement toutes les sorties et toutes les circulations franciliennes concernées[8]. Le réalisme de ces potentiels peut être testé en calculant les variations de budget temps occasionnées par les transferts. Pour des durées initiales de boucles voiture de 63 min (Paris et petite couronne) et 55 min (grande couronne), les durées passent respectivement à 85 et 154 min en vélo, 57 et 119 min en vélo électrique, 43 et 51 min en scooter. Il est donc clair que les potentiels techniques ne peuvent pas être utilisés au maximum pour les deux-roues les plus légers, et l'analyse en coût marginal généralisé ne change rien au diagnostic fondé sur les seules durées, car les coûts énergétiques sont faibles par rapport au coût du temps.

On dimensionne ensuite des potentiels maximaux dans une logique de remplacement d'un véhicule du ménage, en intégrant les coûts de possession, et on raisonne donc au niveau de la journée. On ne cherche plus à évaluer le potentiel de chaque mode, mais on vise à identifier le meilleur mode dans la famille des alternatives à la voiture.

Avec les hypothèses retenues, les véhicules électriques sont pénalisés par des coûts d'amortissement plus élevés. Leur présence dépend donc de leur capacité à faire réaliser des économies d'usage par rapport à leur équivalent (par exemple cyclomoteur électrique à la place du cyclomoteur thermique) ou par rapport à un véhicule « supérieur » lorsque c'est possible (par exemple scooter électrique à la place d'une voiture). Ces économies peuvent trouver leur source dans le prix de l'énergie, dans les différences de coût d'entretien ou dans les différences de temps de parcours, stationnement compris.

La simulation élimine les vélos et vélos électriques, pénalisés par des vitesses trop faibles, ne fait jouer qu'un rôle marginal (6 % des circulations) aux cyclomoteurs pour la même raison, et ne retient que les scooters et les voitures, thermiques ou électriques. Pour les scooters, les versions thermiques l'emportent au niveau des journées substituables (24 % contre 14 %) mais pas des circulations (8 % contre 13 %), en raison de leur plus faible coût d'amortissement, ce qui montre l'intérêt de subventions sélectives. La voiture électrique l'emporte dans tous les cas sur la voiture thermique (30 % des journées contre 15 %, 61 % des km contre 12 %), mais là encore surtout quand les distances à parcourir sont plus élevées. Dans tous les cas, l'estimation de potentiel est optimiste puisqu'elle ignore les surcoûts induits par ce remplacement pour les déplacements à plus longue distance.

On fait alors l'hypothèse que le véhicule alternatif s'additionne à l'équipement en voiture. L'économie à l'usage, procurée par un véhicule alternatif, doit dès lors être supérieure au coût d'amortissement de ce véhicule. Cette contrainte est plus exigeante, et la voiture thermique reste le véhicule dominant dans les journées des personnes comme des circulations (52 %). La voiture électrique occupe une faible part des journées (8 %) et une part plus élevée des circulations (24 %). Elle n'intéresse que les « très gros rouleurs », qui y trouvent avantage du fait du prix de l'énergie. Les deux-roues surpassent la voiture électrique en termes de journées substituables (41 % contre 8 %) et font jeu égal pour les circulations totales (24 %).

On teste enfin si les conditions de stationnement peuvent être une variable clé dans le choix. La réponse est déjà positive pour les deux-roues dont la rapidité supérieure dans nos simulations vient pour partie de leur agilité dans le trafic, pour partie de leur facilité à stationner. Concernant la voiture électrique, d'éventuelles contraintes sur les voitures thermiques n'apportent pas beaucoup plus dans une logique de substitution, puisque la substitution par les véhicules électriques est

[8] Les tests de sensibilité à l'autonomie, sur une plage allant de 48 kilomètres de portée, soit environ 60 kilomètres en distance réelle, à 150 km de portée indiquent que 92 % des individus qui pourraient faire des sorties en voiture électrique d'une autonomie de 150 km pourraient les faire avec une voiture de 48 km de portée. La question de l'autonomie est donc assez secondaire dans l'analyse.

déjà très importante. C'est donc la seule logique d'addition au parc existant qui est testée. On fait l'hypothèse que le stationnement à destination des véhicules thermiques est interdit sur voirie à Paris (puis dans l'ensemble Paris et petite couronne), si bien que les véhicules thermiques doivent stationner dans un parc privé (employeur par exemple) ou un parc public payant, pour les déplacements de motif autre que travail et domicile, qui se font déjà majoritairement en parc. On ne travaille donc que sur les boucles comportant au moins un déplacement « autre motif ». La pénalité pour les voitures thermiques est exprimée en temps (temps de rabattement sur la destination finale) et en coût (certitude d'avoir à payer), avec des hypothèses allant de 2 à 4 € pour le coût, de 10 à 20 min pour le temps additionnel. Les voitures électriques peuvent stationner sur voirie dans les mêmes conditions qu'aujourd'hui[i]. Le résultat principal est que l'équilibre entre voiture thermique et voiture électrique est fondamentalement déplacé dès la première itération (pénalité de 2 € et 10 min) : la voiture électrique assure alors 50 % des sorties concernées (contre 9 % pour les voitures thermiques) et 72 % des circulations concernées (contre 10 %). Là où elle est possible (de façon certaine à Paris, de façon majoritaire en petite couronne, de façon sans doute minoritaire mais néanmoins significative en grande couronne, par exemple dans les parcs de rabattement, dans les centres des villes nouvelles…), une discrimination positive en faveur des véhicules alternatifs par la gestion du stationnement, même d'ampleur moyenne, a la capacité de faire basculer assez nettement les choix d'usage des véhicules.

## Conclusion

Cette étude est aussi intéressante par les limites auxquelles on est confronté tant en termes méthodologiques et politiques que par ses résultats.

La limite méthodologique la plus lourde est le format des enquêtes « ménage », fondé sur l'observation d'une seule journée. Toute pénétration de mode nouveau en propriété suppose qu'il puisse être utilisé avec une certaine régularité. Des enquêtes portant sur plusieurs jours ou sur le repérage d'habitudes seraient bienvenues. En outre, lorsque les ménages sont multimotorisés, le parc peut être utilisé en « pool » par les membres selon leurs besoins, ce qui n'est pas nécessairement le cas pour une voiture et un scooter, voire pour une voiture thermique et une voiture électrique. On peut y ajouter l'habitude prise dans les exploitations « standard » de mélanger vélo et deux-roues motorisés, qui ne contribue pas à la mise en lumière des vertus de l'un et l'autre mode.

Les questions de confort et de sécurité sont à l'évidence décisives pour expliquer que les deux-roues, dont les coûts marginaux d'usage (temps et argent) comme les coûts fixes sont inférieurs à ceux des voitures – une situation qui devrait les amener à une part modale importante – sont de fait minoritaires. En termes de modélisation désagrégée, on peut dire que leur « constante modale » est particulièrement négative ; en termes politiques, il serait souhaitable d'étudier les mesures pour la rapprocher de celle des voitures.

Cette étude débouche aussi sur quelques résultats robustes. Du point de vue du consommateur, la question du coût de l'énergie n'est pas centrale. Le jeu sur les dépenses temporelles (vitesse de circulation et temps de recherche de stationnement) peut peser d'un poids significatif en faveur de ces modes. Les dépenses fixes (amortissement et frais annexes) pèsent d'un poids très important (et négatif) dans la balance, et la rentabilisation d'un véhicule supplémentaire fait la différence entre les approches techniques et les deux approches économiques. C'est la compensation du coût d'équipement par des coûts de stationnement différenciés qui fait le succès de la dernière étape du raisonnement, et c'est peut-être sur une hypothèse de ce type que pourraient se pencher les collectivités si elles souhaitent aider à la pénétration de ces véhicules sans faire exploser leur fiscalité. L'espoir de voir une mobilité à dominante électrique, condition d'un changement radical des normes d'exploitation des réseaux, ne peut se concrétiser qu'avec des mesures fortes, qui plus est limitées aux territoires suffisamment denses. On notera enfin, ce qui n'est pas indifférent pour l'action publique, que les scooters électriques ont un potentiel de diffusion dans la population plus grand que la voiture électrique, même s'ils font au mieux jeu égal en matière de circulations transférées. Il apparaît enfin que des conditions de sécurité sinon comparables, du moins rapprochées, une vitesse de pointe qui n'a pas besoin d'être comparable à celle des équivalents thermiques, à deux comme à quatre roues, et des facilités de stationnement distinctives pour les véhicules électriques apparaissent au moins aussi décisives que les progrès sur l'autonomie

## Bibliographie

[1] Voorhees A. M.
A General Theory of Traffic Movement
*Proceedings Institute of Traffic Engineers, New Haven, Connecticut, 1955*

[2] Hagerstrand T.
The domain of human geography
*dans : Directions in geography, ed. R. J. Chorley, 67-87 (London : Methuen) 1973*
Space, time and human conditions
*dans : Dynamic allocation of urban space, ed. A. Karlqvist et al. (Lexington : Saxon House Lexington Book 1975)*

[3] Zahavi Y.
The Umot model
*Department of transport, Washington D.C, 1980*

[4] Massot M.H., Orfeuil J.P., Proulhac L.
Extreme commuting : links between daily travel times and lifestyles of families in France and Ile-de-France,
*report to the FIA fundation, 2008*
En Français, Orfeuil J.P.
Les grands migrants au quotidien
Massot M.H., Proulhac L.
Modes de vie et mobilités des actifs franciliens. Le clivage par les temps d'accès au travail
*dans : Mobilités et modes de vie métropolitains, Massot M.H. Ed, L'œil d'Or 2010*
Massot M.H., Armoogum J.
Evaluation des potentiels de report modal des trafics automobiles dans le cas de la zone dense francilienne
*Revue Transport Sécurité, n°77, pp 250-280, 2002*

[5] Massot M.H.
Pari 21
*Rapport Inrets n° 243 2002*

[6] Korsu E., Massot M.H., Orfeuil J.P.
Le concept de ville cohérente, réponse au débat entre ville étalée et ville compacte ?
*Rapport LVMT pour l'Ademe / Predit*

[7] Massot M.H., Orfeuil J.P., Proulhac L.
À la recherche d'un marché pour un petit véhicule urbain
*Rapport LVMT pour l'Ademe, 2009*
des mêmes auteurs : Quels marchés pour quels petits véhicules urbains ?
*TEC n° 205, 2010*

# La modélisation des risques naturels géologiques – influence du contexte urbain

Emilie Vanoudheusden
Bureau de Recherches Géologiques et Minières - Services Risques

**De nombreuses villes sont soumises à des aléas naturels et subissent plus ou moins régulièrement des crises ou catastrophes. Les exemples d'effondrement de cavités, de glissement de terrain, de coulées de boues, d'inondations ou de submersions marines, de séismes, d'éruptions volcaniques… sont nombreux. La politique de prévention des risques demande avant tout de mieux connaître les phénomènes et leurs incidences, de manière à sensibiliser les populations et à prendre en compte ces risques dans les décisions d'aménagement. Cette connaissance passe par l'établissement de base de données sur les phénomènes, par la réalisation de cartographie de l'aléa à partir des seuls événements ou données géologiques, par des modélisations numériques du sol et du sous-sol, ou par des calculs en 1, 2 ou 3 dimensions. Une des difficultés réside encore dans la modélisation multi-aléas et la dimension multidisciplinaire des études.**

## Introduction

Certaines villes se sont établies, dès leur origine, dans des sites soumis à un ou plusieurs aléas naturels, menacés constamment ou périodiquement par des phénomènes, alors souvent jugés imprévisibles. Mais, depuis plusieurs décennies, les villes, poussées par la pression démographique et foncière, s'étalent sur des sites initialement délaissés car présentant des contraintes et des aléas encore plus importants. Ainsi, c'est la vulnérabilité de la ville qui augmente par son exposition, et non systématiquement le nombre ou l'importance de l'aléa lui-même.

La politique de prévention des risques appliquée en France consiste à assurer la sécurité des personnes et des biens en tenant compte des phénomènes dangereux possibles. Elle vise à permettre un développement durable des territoires, tout en assurant une sécurité maximum des personnes. Les moyens mis en œuvre pour cette politique ont pour objectif de mieux connaître les phénomènes et leurs incidences, d'assurer, dans la mesure du possible, leur surveillance, d'informer les populations sur les risques encourus et sur les moyens de s'en protéger, et de prendre en compte ces risques dans les décisions d'aménagement et d'urbanisme, en particulier en réduisant la vulnérabilité des installations actuelles et futures.

La base de cette politique de prévention des risques est donc la connaissance de l'aléa, en termes de fréquence, d'intensité et de facteurs déclenchant, ainsi que l'évaluation de la vulnérabilité des enjeux. Elle demande aux géoscientifiques l'utilisation d'un panel de méthodes de modélisation, depuis la base de données jusqu'aux modèles numériques à trois dimensions.

## Quelques définitions

### *Aléa, vulnérabilité et risque*

On parle d'aléa naturel quand on s'intéresse à la seule manifestation d'un phénomène naturel. L'aléa est défini par une intensité (quel est l'importance du phénomène, son pouvoir destructeur ?), une occurrence spatiale (ou va se dérouler le phénomène ?) et une occurrence temporelle (quand va se dérouler le phénomène ?). La probabilité d'occurrence spatiale est conditionnée par des facteurs de prédisposition, qui s'expriment par une susceptibilité (forte pente pour les glissements de terrain, par exemple). La probabilité d'occurrence temporelle est régie par des facteurs déclenchant, naturels (pluie exceptionnelle par exemple) ou anthropiques (travaux en fouille mal maîtrisés).

La vulnérabilité d'un enjeu correspond à sa faculté de résister aux sollicitations engendrées par le phénomène. Cette vulnérabilité est donc dépendante de l'aléa considéré, et peut varier au cours du temps en fonction, en particulier, de l'activité humaine (vieillissement et mauvais entretien des infrastructures, nouveaux aménagements etc.).

L'évaluation de l'aléa, combiné à celle de la vulnérabilité des enjeux dans la zone où le

phénomène est susceptible de se produire, permet d'estimer le risque qui caractérise cette zone. De plus en plus fréquemment, on considère, outre l'aspect humain, la valeur économique de l'enjeu dans la définition du risque, de manière à donner une dimension monétaire et à hiérarchiser les risques entre eux.

### *Les aléas naturels géologiques*

Les aléas naturels peuvent être répartis entre les phénomènes climatiques (inondations, avalanches, cyclones, tempêtes, sécheresses…), les phénomènes biologiques (épidémies), et les phénomènes géologiques. Les phénomènes géologiques sont tous ceux véhiculés par un objet géologique. On inclut donc dans cette catégorie les séismes, les éruptions volcaniques et les mouvements de terrain (instabilités de pente et effondrements de cavités), mais aussi l'érosion des sols, l'évolution du littoral, les tsunamis, les remontées de nappe ou le retrait-gonflement de certaines argiles.

## Une variabilité de modélisation

La grande variabilité des phénomènes étudiés, leurs interactions, les multiples disciplines qu'ils font intervenir, ainsi que les différents niveaux d'étude envisageables, impliquent l'utilisation de modèles variés.

### *Des phénomènes variés et combinés*

Même si les différents aléas géologiques correspondent tous à un phénomène lié à la géologie, leurs origines et leurs effets sont largement différents, ce qui implique des approches méthodologiques d'évaluation de l'aléa et de la vulnérabilité nécessairement différentes en fonction du phénomène. Les volcans et les séismes demandent que l'on s'intéresse à la géodynamique interne de la Terre, impliquant plusieurs dizaines de kilomètres de profondeur, alors que les conséquences du phénomène de retrait-gonflement des argiles sont liées à la nature du sol sous très faible profondeur (au maximum 2 mètres).

A l'heure actuelle, l'aléa tremblement de terre n'est pas maîtrisable, et difficilement prévisible à court terme, mais la vulnérabilité des éléments bâtis exposés peut, elle, être réduite par des techniques de construction adaptées à la sollicitation ; au contraire, dans le cas des volcans, la réduction de la vulnérabilité est difficilement envisageable, et l'on axe alors les recherches sur la prédiction de l'évènement de manière à mettre à l'abri les populations par une alerte précoce. Ainsi, il est nécessaire d'adapter l'approche méthodologique au phénomène étudié, ce qui implique une variabilité de modélisations des phénomènes et des systèmes associés.

Certaines régions sont confrontées à plusieurs risques naturels. Une analyse efficace et durable requiert donc la prise en compte simultanée de l'ensemble des aléas. En effet, une mesure de réduction de la vulnérabilité peut, dans le cas d'une simple analyse mono-aléa, aggraver la vulnérabilité de la structure vis-à-vis d'un autre aléa. Par exemple, la construction d'un bâtiment sur pîlotis réduit sa vulnérabilité aux inondations, mais aggrave sa situation vis-à-vis du risque sismique.

Les effets domino ne sont pas à négliger, car ils sont susceptibles d'aggraver les conséquences globales d'un événement. On pense bien sûr aux tsunamis générés par les séismes ou les glissements de terrains aériens ou sous-marins, ou aux glissements de terrain induits par des éruptions volcaniques. L'effet cascade est, quant à lui, encore plus dur à évaluer, car il implique une augmentation en retour du phénomène initial par l'action d'un phénomène secondaire. Par exemple, une inondation peut produire des mouvements de terrain qui, à leur tour, vont obstruer les voies naturelles que les eaux auraient empruntées.

### *La nécessité d'une approche multi-disciplinaire*

Suivant le phénomène géologique étudié, l'intervention de scientifiques couvrant toutes les disciplines des sciences de la terre sera nécessaire.

Si l'on s'intéresse aux cavités, des géologues, des géophysiciens et des hydrogéologues interviendront pour les questions liées à la présence de cavités ; on ajoutera à l'équipe des géotechniciens pour l'évaluation des conséquences en surface de cette présence en profondeur. Dans l'étude des conséquences d'un séisme, la modélisation de la propagation de la source sismique demandera les compétences de sismologues et de mécaniciens des roches, aptes à utiliser les derniers outils d'optimisation des codes de calcul. Les volcans sont des structures complexes et les phénomènes mis en jeu font appel aussi bien à la géologie, qu'à la sismologie, la géochimie, et la mécanique des fluides et des solides.

### *Différents niveaux d'étude de la vulnérabilité*

La vulnérabilité peut être appréhendée à différentes échelles. La vulnérabilité physique concerne les dommages structurels (bâtiments, infrastructures…). L'analyse de la vulnérabilité physique peut se limiter à l'analyse d'une seule structure, ou s'étendre à l'ensemble des structures sur un territoire plus large. Ensuite, l'analyse peut porter non plus sur la seule vulnérabilité physique de la structure, mais sur la vulnérabilité systémique de l'environnement humain, en s'intéressant aux interactions avec les systèmes sociaux et économiques, en incluant la vulnérabilité des populations, des organisations et des institutions, voire en analysant la vulnérabilité économique depuis le niveau micro (endommagement des moyens de productions, indisponibilité des réseaux de transports…) jusqu'au niveau macro (impact sur les marchés…).

Pour des systèmes complexes, tels que les systèmes urbains, l'analyse systémique est primordiale, puisque la défaillance, même partielle, d'un système secondaire peut être lourde de conséquences à l'échelle du système global.

L'analyse de la vulnérabilité socio-économique permet d'évaluer sociologiquement et financièrement l'impact d'un phénomène sur la société, mais elle permet également d'apprécier, et donc, par la suite, d'adapter, l'efficacité des mesures de réduction du risque.

## Les bases de données et les observatoires

A l'heure actuelle, l'appréhension des risques géologiques demande une visualisation, un affichage de ceux-ci. Les bases de données générales et les observatoires plus spécifiques permettent de répondre à l'obligation de « porter à connaissance » le risque auprès du public.

### *Les bases de données*

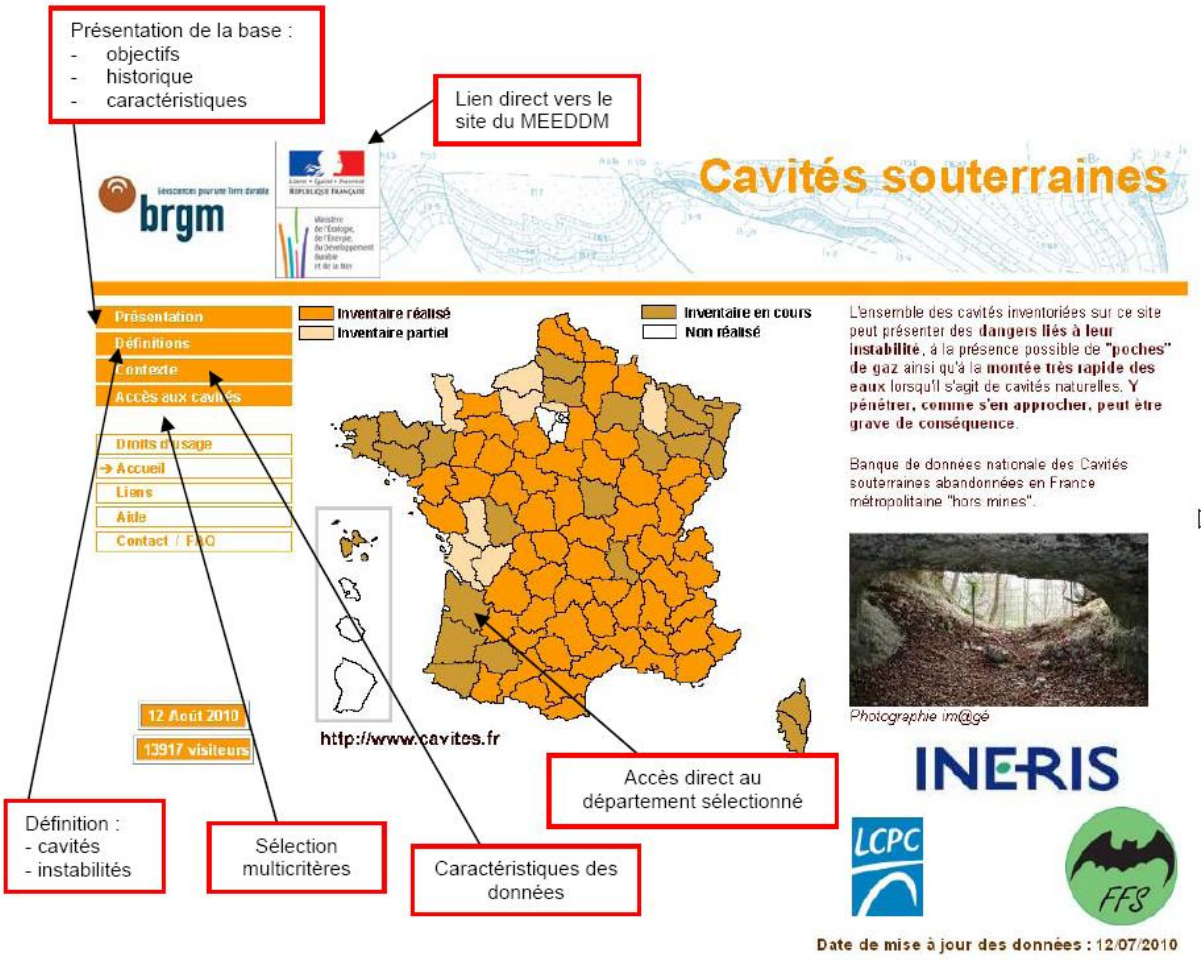
En premier lieu, et peut-être parce qu'un géoscientifique est souvent, avant tout, un naturaliste, l'analyse des aléas naturels est largement basée sur l'observation du phénomène naturel, afin de mieux comprendre les mécanismes liés à son l'origine. Ces observations demandent la mise en place d'observatoire ou la réalisation d'inventaire, et entraînent l'élaboration de bases de données.

Dans le cadre de ses activités de Service Public, le BRGM, en partenariat avec différents organismes, réalise différents inventaires relatifs aux aléas géologiques ; les informations collectées sont intégrées à des bases de données nationales, généralement accessibles au grand public par internet. Ces bases de données permettent le recueil, l'archivage, l'analyse et la restitution des informations de base nécessaires à la connaissance et à l'étude préalable des phénomènes.

En particulier, des inventaires départementaux permettent de recenser d'une part les cavités connues (bdcavite.net), et d'autre part, les mouvements de terrain (bdmvt.net), sur le territoire français. L'objectif principal est de conserver, de façon homogène, la mémoire des phénomènes, connaissance primordiale pour une meilleure évaluation du risque, et donc sa prévention, et l'organisation des secours en cas de crise. Ces bases de données servent à l'élaboration de cartes d'aléa, et participent en tant que telle à celle de documents à usage réglementaire de type PPR (Plan de Prévention des Risques naturels), comme à l'information préventive du public.

Concernant le littoral, la base de données BOSCO est une base nationale d'informations sur l'évolution du trait de côte et la lutte contre l'érosion littorale. Partant du constat que l'évolution du trait de côte est une préoccupation permanente en matière d'aménagement, mais que les données sont généralement acquises sur des périodes de temps trop courtes pour permettre un travail suffisant d'identification et d'exploitation, la base de données a pour vocation de disposer d'une base d'informations exhaustive, homogène et validée, qui permettent une meilleure connaissance et prévision de l'évolution des côtes. Les données recensées touchent un large panel de thématiques (géomorphologie, bathymétrie et topographie, hydrodynamique, hydrologie continentale, sédimentologie et géologie, météorologie et climatologie, aménagements et enjeux côtiers) traduisant la nécessaire multidisciplinarité pour l'évaluation de cet aléa.

**Figure 1 :** Interface graphique de BD Cavité – www.bdcavite.net




Enfin, certaines bases de données recensent des informations utiles pour l'évaluation de la vulnérabilité des bâtiments : la base de données relative aux caractéristiques et à la vulnérabilité du bâti aux Antilles [1] est principalement mise au point pour répondre au besoin de connaissance du bâti aux Antilles et de sa résistance vis-à-vis du risque sismique. L'objectif de réalisation de cette base a été de rassembler et d'homogénéiser les informations disponibles sur les caractéristiques du bâti et la vulnérabilité sismique des bâtiments de catégorie d'importance III et IV[1] au sein d'une base de données géoréférencée unique pour la Martinique et la Guadeloupe. Cette base de données permet de suivre et de garder la mémoire au niveau de la vulnérabilité du bâti et des actions qui pourraient être conduites pour le réduire. Enfin, les données sont utiles lors de l'élaboration de scénarios de crises sismiques, dans la gestion de crises, et dans la préparation des plans de secours.

## *Les observatoires*

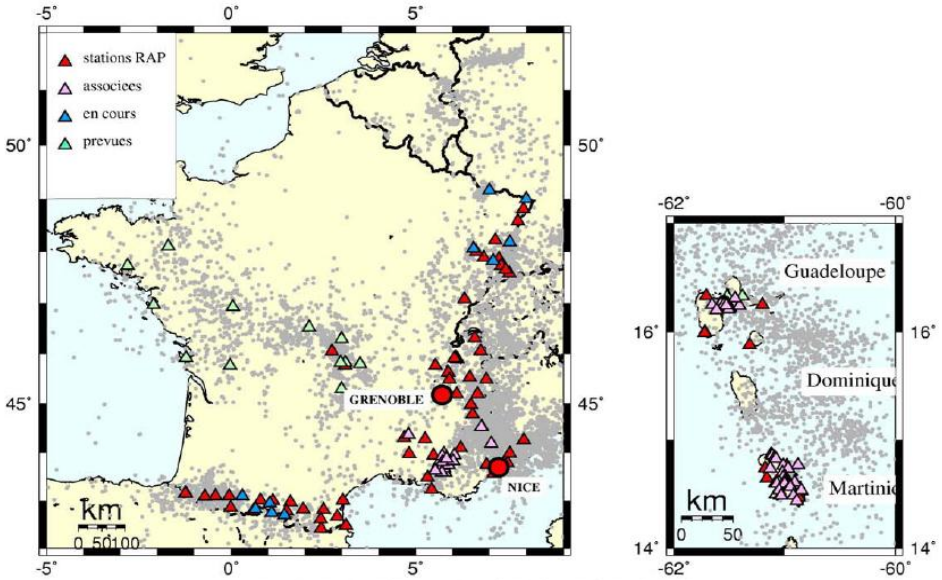
Le développement des systèmes d'observations terrestres, aéroportés et satellitaires a permis depuis quelques décennies d'accéder à des informations qui aident à confirmer ou infirmer quantitativement ou qualitativement des théories élaborées par les géoscientifiques.

Le Réseau Accélérométrique Français (RAP) est un réseau d'enregistrement du mouvement du sol, comptant environ 140 enregistreurs installés dans les régions les plus actives de France Métropole, aux Antilles, en Nouvelle-Calédonie et à Mayotte. Le RAP a pour mission de collecter, de contrôler et de distribuer les données accélérométriques, et d'assurer l'homogénéité des stations d'enregistrement. Ces enregistrements permettent de constituer une base de données, accessibles à tous, nécessaires à la calibration de modèles numériques.

[1] Les bâtiments de catégorie d'importance III sont ceux dont la défaillance présente un risque élevé pour les personnes et ceux présentant le même risque en raison de leur importance socio-économique. Les bâtiments d'importance IV sont ceux dont le fonctionnement est primordial pour la sécurité civile, pour la défense ou pour le maintien de l'ordre public.

Les systèmes d'alerte aux tsunamis ont pour objectif de collecter à la fois des données sismiques et des mesures du niveau de la mer. En cas d'alerte, la combinaison des données historiques et de modèles numériques permet de déterminer l'ampleur des vagues éventuelles. La bonne utilité de ce type d'installation tient sur l'implication de tous les pays concernés autour de la zone d'étude, en particulier pour la vérification du bon état de marche des stations, ainsi que des différents systèmes de communication.

**Figure 2 :** Réseau Accélérométrique Permanent (extrait du rapport RAP – Janvier 2004




RESEAU ACCELEROMETRIQUE PERMANENT
Etat des lieux et projets d'installation (septembre 2003)

Les trois volcans actifs français sont surveillés par des observatoires sous la responsabilité de l'Institut de Physique du Globe de Paris. L'observatoire volcanologique de la Soufrière (Guadeloupe) a pour mission la surveillance de l'activité du volcan (comprendre le fonctionnement du volcan, détecter un changement de comportement et évaluer le potentiel éruptif, enfin informer les autorités responsables de la protection des personnes et des biens) et la surveillance de la sismicité régionale. Le réseau de surveillance comprend plus de 200 sites de mesures réparties sur tout l'archipel et les îles avoisinantes. Près de 60 stations sont totalement automatisées, et les mesures sont complétées par des observations sur le terrain. Le réseau fait appel à une vingtaine de techniques différentes, provenant de la sismologie, de l'étude des déformations, de la géochimie des fluides, de la géophysique, de la géologie et de la météorologie. La masse considérable de données est stockée, archivée et pré-analysée par des traitements automatiques, permettant l'accès instantané aux graphes et données numériques sur un site Web en accès restreint. Un système d'alarme est associé à ces données, permettant de réagir rapidement en cas de séisme de forte magnitude, ou d'activité volcanique importante.

Des réseaux d'observation plus localisés peuvent aussi être mis en place dans des zones à enjeux, où l'aléa est déjà en partie identifié. Ces systèmes ont alors pour objectif d'améliorer la connaissance du phénomène, et de prévenir les populations en cas de phénomènes. Ils peuvent aussi permettre la mise au point de modèle statistique, analytique ou numérique.

Pour exemple, l'aléa chute de bloc lié à l'érosion des côtes rocheuses est un sujet d'étude important, principalement dans certaines zones où les constructions, au fil du temps, se retrouvent à faible distance de la falaise (Figure 3). Sur le site de cette falaise, des campagnes successives de mesures au scan laser ont permis de recenser des évènements aux volumes variables [2]. Ce catalogue d'événements permet ensuite de calculer l'aléa chute de bloc grâce à une relation volume/fréquence (Figure 5), classique de plusieurs phénomènes géologiques. Cette relation permet de définir, statistiquement, qu'un événement, dont la récurrence probable est d'une année, a un volume de plus de 2 200 $m^3$. Cette relation permet aussi d'estimer la période de retour d'un évènement impliquant une épaisseur donnée de terrain, comme celle séparant la maison du bord de la falaise de la Figure 3.

**Figure 3 :** Mesnil Val – Haute Normandie

**Figure 4 :** Catalogue des événements

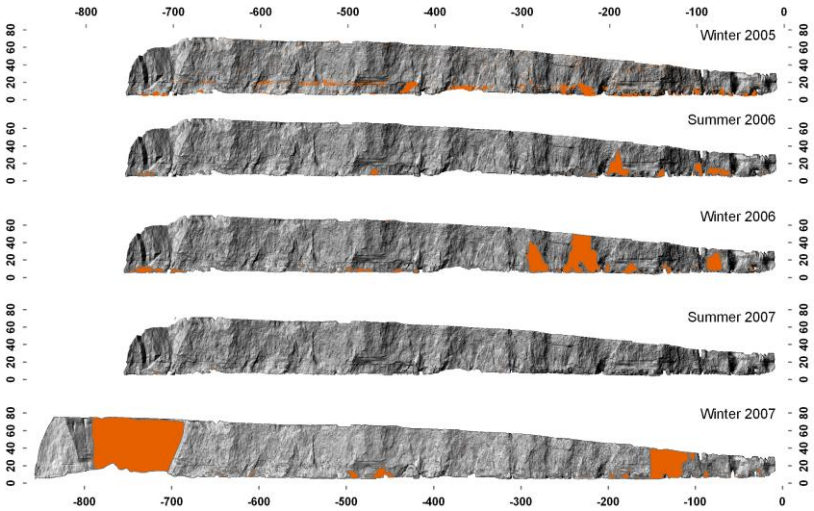
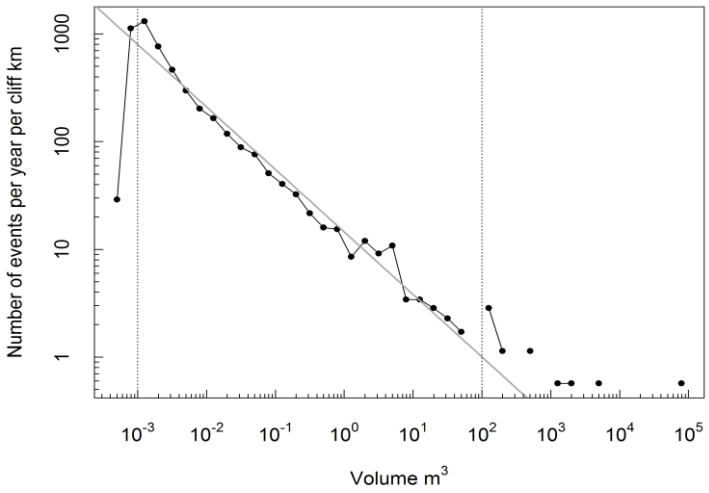



**Figure 5 :** Relation entre volume des écroulements et probabilité de dépassement en nombre d'événements par an



## La cartographie de l'aléa et des enjeux

### *Exemple : La cartographie de la susceptibilité de présence de cavité*

Les inventaires départementaux de cavités apportent une première information permettant de recenser la position de cavités connues ; néanmoins, cette connaissance n'est en aucun cas exhaustive, et il reste encore de nombreuses zones du territoire où des cavités existent sans pour autant qu'elles soient connues et cartographiées. En effet, la découverte d'une cavité en profondeur est souvent liée à l'apparition d'un phénomène en surface (tassement ou effondrement), et on recense donc plus souvent des cavités dans les zones habitées que dans les zones peu fréquentées par le public. De ce fait, on ne peut pas se baser uniquement sur les inventaires pour établir des cartes départementales de susceptibilité de présence de cavité, cartes nécessaires pour une hiérarchisation des secteurs (communes, bassin de risque), et pour l'établissement de zones prioritaires à l'élaboration de PPR.

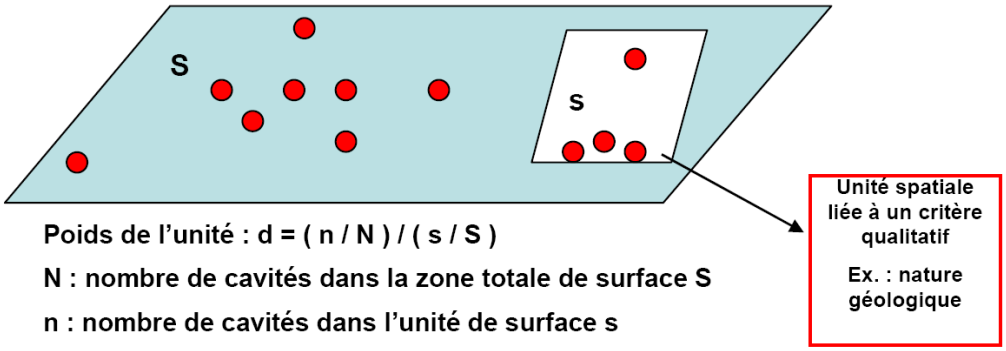
Une méthodologie a été établie [3], reproductible à l'échelle nationale, permettant une hiérarchisation quantitative des niveaux de susceptibilité de présence de cavités, tout en gérant la non exhaustivité des données connues, les effets de seuils habituellement induits par les jugements d'experts et la représentation de l'incertitude du diagnostic.

La méthode s'appuie d'une part sur l'inventaire des données cavités et, d'autre part, sur une liste de critères exhaustifs pertinents identifiés par des experts locaux (géologues et hydrogéologues). La méthode ne fixe pas de critères explicatifs préétablis mais un principe d'évaluation de la susceptibilité, une fois que les critères les plus pertinents ont été identifiés.

Les outils statistiques développés sont nommés « fonction de densité » (pour traiter les critères de nature qualitative) et « fonction de possibilité » (pour gérer ceux de nature quantitative).

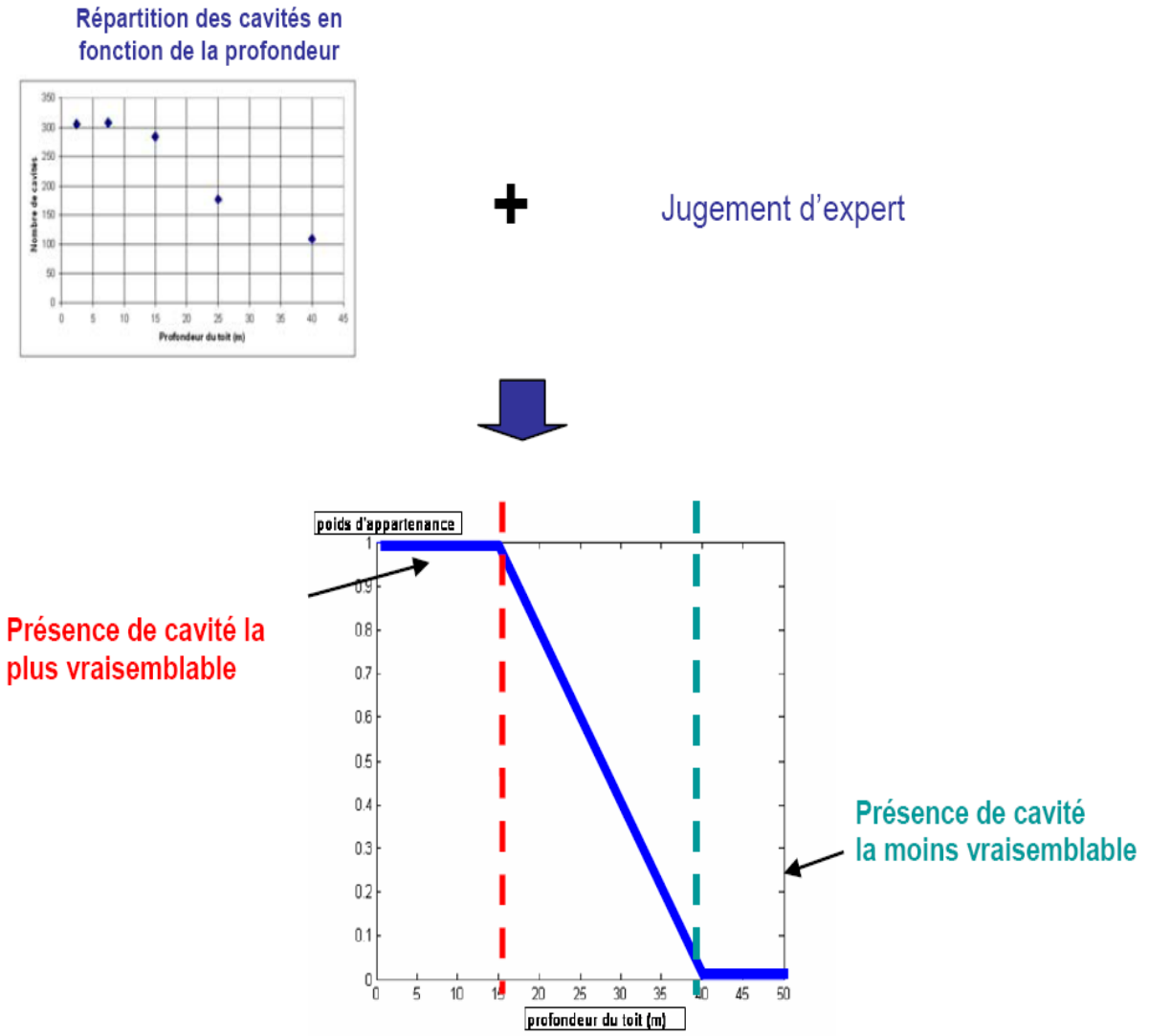
La fonction de densité repose sur la théorie du « poids des évidences » (« Weight of Evidence »). Elle consiste à calculer les densités par unité spatiale selon un critère qualitatif (Figure 6).

**Figure 6 :** Définition de la fonction de densité




La fonction de possibilité permet de représenter de façon rigoureuse une information imprécise liée à des données statistiques peu nombreuses. Elle est basée sur dire d'expert et permet de gérer les effets de seuils introduits habituellement par le raisonnement de l'expert. Par exemple, un expert, chargé d'évaluer la présence d'une cavité en fonction de la profondeur de son toit, fournit l'information suivante : « entre la surface et 15 mètres, j'ai la plus forte probabilité de trouver une cavité, et au-delà de 40 mètres, je suis sur qu'aucune cavité n'est présente », sur la base des données existantes et de son expérience. On pourra alors établir la fonction de possibilité présentée sur la Figure 7 où les valeurs appartenant à l'intervalle [0-15] ont une vraisemblance de 1, les valeurs dans [15-40] diminue jusqu'à arriver à 40, profondeur à partir de laquelle la vraisemblance devient nulle. Une transition plus « complexe » sur l'intervalle [15-40] pourra être envisagée (par exemple, si la valeur de 30 mètres paraît plus vraisemblable à l'expert, on pourra donner une courbure à la droite).

**Figure 7 :** Définition de la fonction de possibilité




### *La cartographie des enjeux et de leur vulnérabilité*

Nous avons présenté l'intérêt, pour l'évaluation du risque, d'étudier à la fois l'aléa, c'est-à-dire la manifestation du phénomène, et les enjeux et plus particulièrement leur vulnérabilité vis-à-vis du phénomène traité.

En zone urbaine, et encore plus dans les grandes villes, la diversité des enjeux et la surface d'étude à traiter sont telles qu'il est impossible de cartographier les enjeux un à un et d'évaluer, pour chacun, leur vulnérabilité. On raisonne alors à partir de zones homogènes et d'éléments caractéristiques.

Considérons, par exemple, le bâti, qui est l'enjeu le plus souvent traité vis-à-vis des aléas naturels, et plus particulièrement, le bâti courant, c'est-à-dire le bâti hors bâtiments sensibles tels qu'écoles, hôpitaux, bâtiments administratifs, voire centrale nucléaire…. On cherche à délimiter, au sein de la surface d'étude, des zones urbaines homogènes, c'est-à-dire des zones au sein desquelles soit le bâti est constitué par un seul type de bâtiment, soit par plusieurs types de bâtiments répartis de façon homogène et tels que l'on puisse évaluer la proportion de chaque type. Ce travail de zonage est réalisé sous SIG, à partir notamment des orthophotoplans de l'IGN, des cartes IGN, et des contours IRIS de l'INSEE. Malheureusement, les données disponibles ne sont pas toujours actualisées, et un travail de prospective est en plus nécessaire, pour, parfois, « imaginer » l'évolution urbaine. Les typologies de bâtiments régulièrement considérés, sur l'image de ce qui a été initié pour le risque sismique, sont : le centre-ville, l'habitat collectif, les lotissements, l'habitat disparate.

**Figure 8 :** Exemple de secteurs d'habitat collectif

Les méthodes d'évaluation de la vulnérabilité d'un bâtiment diffèrent par leur complexité, leur précision et leur objectif. Selon l'échelle et l'applicabilité de l'analyse et suivant l'approche utilisée (statistique, déterministe ou probabiliste), plusieurs méthodes, parfois complémentaires, pour estimer et exprimer la vulnérabilité peuvent être choisies : description qualitative de la vulnérabilité, indice de vulnérabilité, avis d'expert, calculs analytiques simplifiés ou analyses numériques.

Pour l'évaluation de la vulnérabilité sismique des structures, la méthode RISK-EU a été développée dans le cadre d'un projet européen.

Se basant sur une typologie considérant 23 types de bâtiments différents, un indice de vulnérabilité Vi est calculé par bâtiment, comme la somme de l'indice de vulnérabilité le plus probable (matrices typologiques obtenues par retour d'expérience sur bâti et lors de séismes réels), le facteur de vulnérabilité régionale (pour prendre en compte la qualité particulière de certains types de bâtiment au niveau régional), et les facteurs aggravants (de nature géométrique ou structurelle, ils modifient le comportement dynamique de la structure). Cet indice de vulnérabilité permet de définir l'état d'endommagement du bâtiment pour une intensité prévue de sollicitation sismique.

## Les modélisations physiques

Les modèles physiques sont un moyen relativement simple d'étudier un phénomène en condition proche de la réalité, que ce soit en utilisant des modèles grandeur réelle, des modèles réduits, des maquettes…

La principale difficulté des modèles physiques est le respect des règles de similitude par rapport au phénomène d'origine. Les trois facteurs d'échelle à prendre en compte sont la longueur, la gravité et la masse. Ainsi, lorsque pour un modèle donné, un facteur de réduction géométrique est utilisé, il est nécessaire d'accroître le poids volumique des matériaux utilisés pour conserver des sollicitations équivalents à la pleine échelle, via l'utilisation d'une centrifugeuse, ou le remplacement du sol réel par un sol analogique de masse volumique plus importante. Dans le cas où les conditions de similitude ne sont pas respectées, le modèle est simplement qualitatif (et non quantitatif comme lorsque ces conditions sont respectées).

La centrifugeuse permet de soumettre les modèles réduits à une macrogravité pouvant atteindre une centaine de fois la gravitation terrestre. Ils peuvent être soumis à des sollicitations monotones ou cycliques, quasi-statiques ou dynamiques, ainsi qu'à des vibrations de type séismes. Les modèles sont instrumentés avec des capteurs miniatures permettant une vaste gamme de mesures.

**Figure 9 :** Vue générale de la centrifugeuse de l'IFSTTAR

Les conséquences des tremblements de terre peuvent être modélisées par l'utilisation de tables vibrantes. Les sollicitations et les dimensions des structures à étudier sont fonction de la taille de la table. Par exemple, le CEA possède la plus grande table vibrante en Europe (6 mètres x 6 m), pouvant simuler des séismes de forte puissance et embarquer des structures pesant jusqu'à 100 tonnes (Figure 10).
Un autre moyen de respecter les règles de similitude est l'utilisation de modèle de sol analogique. Un sol analogique classiquement utilisé en mécanique des sols en remplacement d'un sol pulvérulent est le sol bidimensionnel de Schneebeli. Le sol est ainsi remplacé par un empilement colinéaire de rouleaux présentant au minimum deux diamètres différents. La nature bidimensionnelle du matériau et de ses propriétés réduit fatalement l'étude du comportement tridimensionnel du phénomène.

**Figure 10 :** Description de la table vibrante Azalée

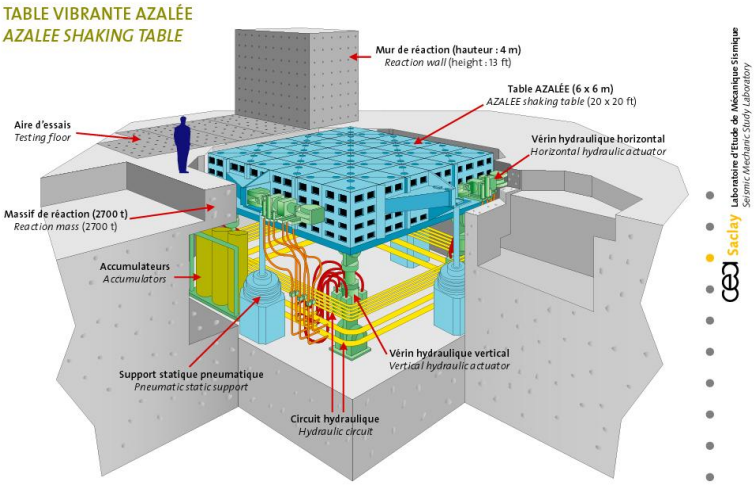
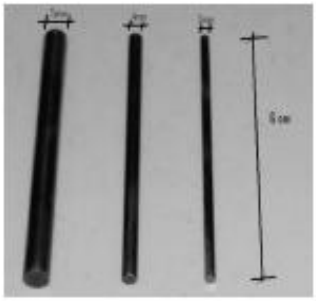



**Figure 11 :** Aperçu des rouleaux de Schneebeli



Enfin, les modèles physiques grandeur réelle sont parfois utilisés. Par exemple, dans le cadre d'un projet sur le retrait-gonflement des argiles, une maison en grandeur réelle a été construite par le LCPC au CER de Rouen. Les semelles de fondations reposent sur des vérins hydrauliques que l'on peut abaisser en cours d'essai pour simuler un tassement différentiel du sol.

**Figure 12 :** Maquette d'une maison grandeur réelle

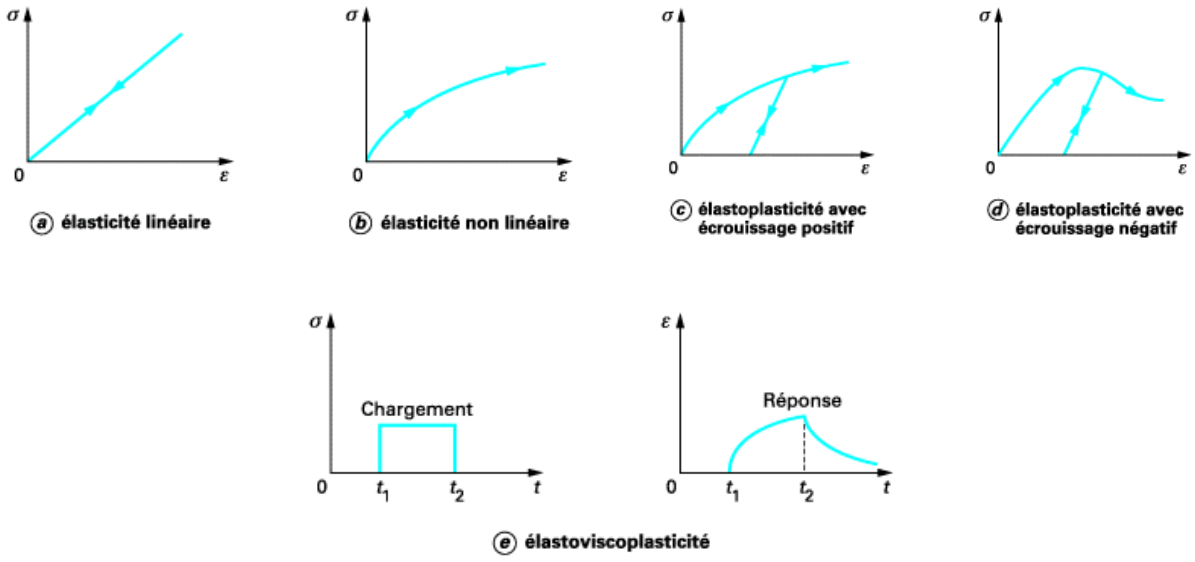
## Les modélisations analytiques

Pour l'étude des risques naturels, la géotechnique est friande de modélisation analytique, c'est-à-dire de modèles décrivant par une ou plusieurs fonctions mathématiques le phénomène étudié, en particulier car cette modélisation « simple » permet de déterminer un comportement global et de définir s'il est nécessaire ou pas de complexifier le modèle par des considérations plus « numériques ».

### *Loi de comportement analytique*

Le comportement d'un matériau par rapport à une sollicitation donnée peut parfois être mis en équation (avec des simplifications plus ou moins importantes), c'est ce que l'on nomme les lois de comportement (ou modèles rhéologiques). L'élaboration de ces lois s'appuie sur les schémas théoriques de la mécanique des milieux continus et sur les résultats d'études expérimentales. Une telle loi exprime les relations entre les contraintes et les déformations d'un élément de volume macroscopique de matériau.

**Figure 13 :** Description schématique des principales lois de comportement [4]



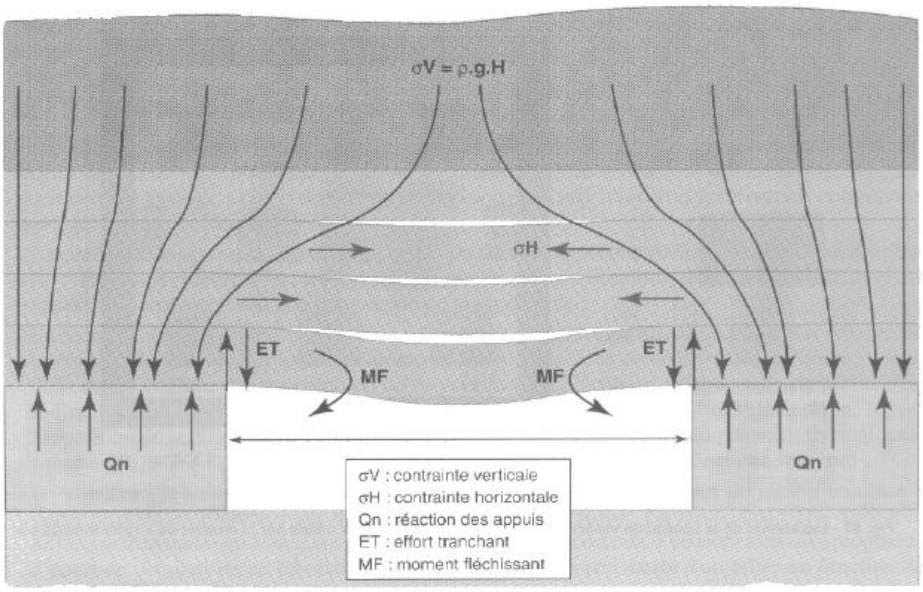
Les lois de comportement les plus simples et les plus utilisées sont les lois élastiques linéaires (isotrope ou anisotrope) et élasto-plastiques parfaits. Mais celles-ci sont généralement insuffisantes pour reproduire le comportement observé expérimentalement, et l'utilisation de lois plus compliquées est alors nécessaire

### *Modélisation analytique du phénomène*

Mettre en équation le comportement du sol est utile quand on sait aussi exprimer, par un système d'équations, le phénomène lui-même.

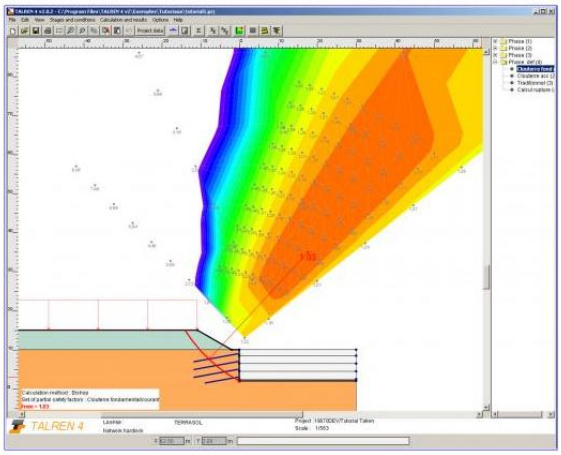
L'analyse de stabilité du toit d'une cavité est fréquemment étudiée via l'utilisation de méthodes analytiques. Le toit de la cavité est alors modélisé comme une dalle ou une poutre en flexion, et un calcul de résistance des matériaux permet de déterminer les déformations et les contraintes dans le massif recouvrant.

**Figure 14 :** Schéma de principe d'une modélisation par plaques ou poutres [5]




Le logiciel commercial Talren permet la vérification de la stabilité des talus, en prenant en compte ou non des systèmes de renforcement de ceux-ci. Un des avantages est la recherche automatique des surfaces de rupture, limitant la répétition « manuelle » du calcul. De plus, ce logiciel permet la prise en compte de sollicitations sismiques (accélération verticale et/ou horizontale).

**Figure 15 :** Exemple de résultat de calcul analytique



## Les modélisations numériques

### *Modélisation de la réalité géologique*

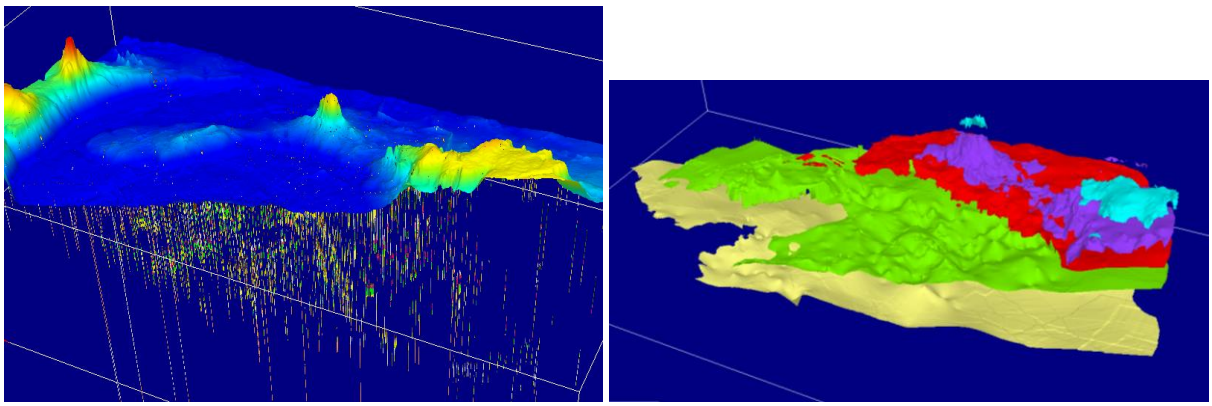
Une méthodologie pour cartographier la susceptibilité d'un aléa géologique donné passe par la modélisation géologique multicouche 3D, c'est-à-dire un calcul géostatistique des surfaces des interfaces des couches géologiques dont l'empilement constitue le sous-sol, à partir de la connaissance des données ponctuelles de ces interfaces en forages.

Cette modélisation demande avant tout la collecte des informations de forage qui seront à la base du modèle. Typiquement, pour une ville donnée, on considèrera plusieurs milliers de forages disponibles en archives. Un travail important de validation et de codification de ces forages est nécessaire de manière à tous les exprimer dans un même référentiel géologique, défini en fonction des objectifs et des aléas identifiés, avec un niveau de détail et un degré d'incertitude équivalents d'un forage à l'autre.

La construction de ce modèle demande l'utilisation de méthodes d'interpolations géo-statistiques, et en particulier des méthodes de krigeage avec ou sans prise en compte de contraintes d'inégalités. Comparé aux méthodes d'interpolation classiques, les outils géostatistiques utilisés présentent l'avantage de caractériser qualitativement et quantitativement la variabilité spatiale (variogramme), ainsi que de quantifier les incertitudes associées à l'interpolation et donc de réaliser des études de sensibilité.

On présente ci-dessous l'exemple du modèle géologique de la Ville de Paris [6], dont le référentiel géologique compte 21 formations, et établi pour évaluer la susceptibilité d'apparition de désordres consécutifs à trois types de phénomènes : la dissolution dans les gypses, les désordres associés à des travaux en fouille ou souterrains, et les phénomènes associés au comportement des argiles en relation avec les modifications de leurs conditions hydriques. Le modèle 3D a été réalisé à partir des informations de 3927 sondages, localisés essentiellement sur la zone d'étude, mais aussi dans les zones limitrophes de manière à éviter les effets de bords lors des phases de modélisation géostatistique.

**Figure 16 :** Vue 3D de Paris a) surface topographique exagérée 10 fois et sondages verticaux b) quelques interfaces géologiques modélisées



### *Méthodes numériques maillées de modélisation*

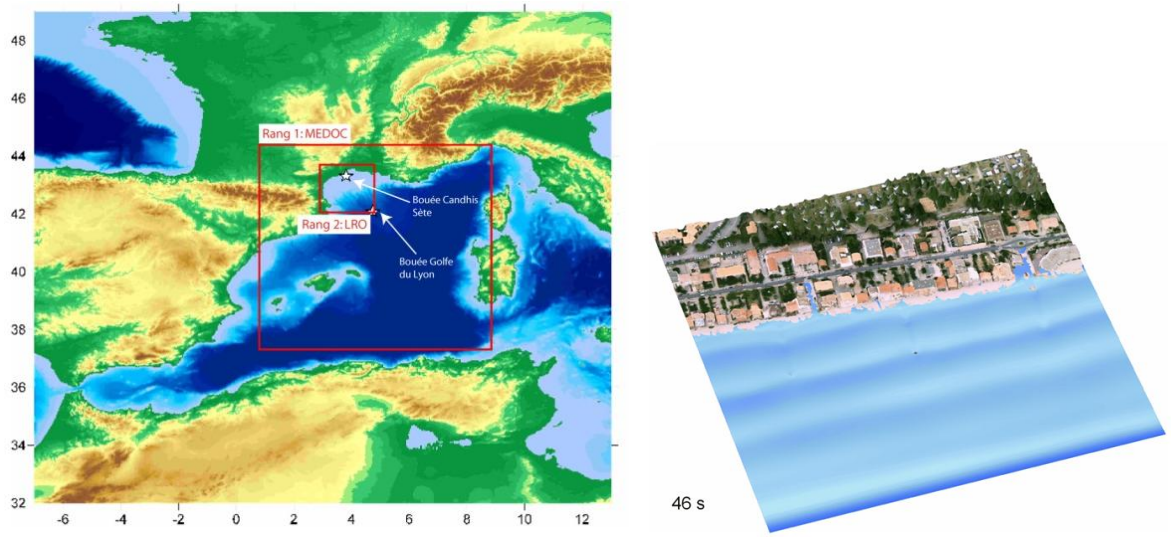
Les méthodes numériques maillées sont des outils qui permettent la résolution de systèmes complexes. Leur intérêt réside dans leur capacité à prendre en compte des paramètres variés (géométries complexes, lois de comportement évoluées, sollicitations diverses…). En contrepartie, elles demandent une certaine expérience pour leur utilisation optimale. Dans les domaines des risques naturels, on utilise les 4 grandes familles de modèles, à savoir les éléments finis, les différences finies, les éléments distincts et la méthode d'équilibre limite, suivant la nature de l'élément considéré et sa représentation.

La limitation d'emploi des modèles numériques pour l'analyse des risques naturels est liée, d'une part, à la complexité de la traduction du problème physique étudié en un système d'équations et, d'autre part, à la représentativité des lois de comportements des matériaux en place et de la modélisation des interfaces (rupture, anisotropie, viscosité…).

Ce type de modèle est utilisé pour l'analyse de tous les risques géologiques : la modélisation des effets de site, du comportement non linéaire des sols et de l'interaction sol-

structure apporte une meilleure connaissance des conséquences d'un tremblement de terre. Pour les risques littoraux, les recherchent s'orientent vers l'adaptation et l'application de modèles numériques hydrody-namiques (houle, courants, niveaux de la mer) et de transports sédimentaires sur la zone littorale. Les techniques d'emboîtement de grilles (maille de quelques kilomètres à quelques dizaines de mètres) se développent et permettent de simuler, au voisinage du trait de côte, des conditions « réelles » du niveau de la mer pour des conditions en mer données.

**Figure 17 :** Modèles imbriqués pour la simulation de tempêtes en Méditerranée




## Conclusion

Aujourd'hui, les risques géologiques s'accroissent, essentiellement par le fait d'une plus grande exposition aux aléas (forte concentration dans les zones urbaines, installation dans les zones les plus sensibles…). De plus, les villes constituent des systèmes complexes, par conséquent sensibles aux événements, même lorsque ceux-ci sont de faibles ampleurs.

La réduction des risques géologiques demande un effort multidisciplinaire dans lequel les géosciences jouent un rôle central, essentiellement au travers d'une meilleure compréhension des phénomènes et de leur probabilité d'occurrence. En effet, la connaissance permet la mise en place d'une stratégie soit de réduction de l'aléa quand celle-ci est possible (techniquement et économiquement), soit de réduction de la vulnérabilité des enjeux (méthodes de construction, systèmes d'alerte), soit d'aménagement raisonné des zones exposées.

Cette connaissance s'acquiert, à l'heure actuelle, aussi bien par l'observation des phénomènes naturels (observatoires, bases de données des phénomènes, test grandeur réelle…) que par leur modélisation (cartographie 2D tenant compte d'un nombre restreint de facteurs, modèles réduits, modèles analytiques et numériques).

Dans tous ces domaines, des travaux de recherche sont toujours en cours, au sein des géosciences d'une part, mais aussi en relation avec les scientifiques d'autres disciplines, incluant les sciences humaines et sociales.

## Bibliographie


[1] Bertil D., Gehl P., Gateau C., Auffret C., Verrhiest G., Chaille R.
Mise en œuvre d'une base de données du bâti aux Antilles
*Rapport final, BRGM/RP-56822-FR.2008*

[2] Dewez T.
Ausculter des falaises côtières au laser
*Géosciences, n°9. Avril 2009*

[3] Fontaine M., Nachbaur A., Rohmer J.
Méthodologie de l'évaluation départementale du risque lié aux effondrements de cavités souterraines abandonnées
*Rapport final, BRGM/RP-56275-FR.2008*

[4] Magnan J-P., Mestat P.
Lois de comportement et modélisation des sols
*Techniques de l'Ingénieur, traité Construction.C 218, 1997*

[5] LCPC-INERIS
Evaluation des aléas liés aux cavités souterraines
*Paris : Presse du LCPC, 130 p., 2002*

[6] Thierry P., Leparmentier A-M., Lembezat C., Nowak C., David O., Schönberg M., Plat E., Vanoudheusden E., Vernoux J-F., Vincent M.
Cartographie de la susceptibilité à l'apparition de désordres liés à différents phénomènes géologiques sur la Ville de Paris
*Rapport final, BRGM/RP-55895-FR.2008*

# - E -

## La nature et le vivant en ville

# De la conservation de la nature au projet de ville « écologique »

Philippe Clergeau
Muséum National d'Histoire Naturelle, Paris

**La nature dans la ville est considérée encore comme un élément additif à l'architecture, fournissant un cadre de vie plus agréable. La prise en compte d'autres services rendus par cette nature (santé, régulation des pollutions, biodiversité…) est récente et reste peu intégrée dans les réflexions d'architecture ou d'urbanisme. La gestion plus écologique des parcs est un élément de cette prise en compte mais aujourd'hui il existe un vrai défi relayé par quelques urbanistes qui est d'intégrer pleinement le non bâti, et donc les espaces à caractères naturels, dans tout projet d'urbanisation. Aux récentes modélisations sur les dynamiques spatiales des espèces animales et végétales en ville succèdent actuellement des débuts de modélisation à l'échelle des villes notamment pour répondre aux questionnements sur les mises en place des trames vertes et bleues urbaines.**

## L'évolution du concept de « nature en ville »

Pour rendre compte de l'évolution de l'objet « nature » dans les dynamiques urbaines, il faut reprendre l'évolution historique des présences et des différentes gestions des espaces à caractères naturels[1] dans l'urbain. Même s'il est très fortement schématisé, il permet de comprendre à la fois l'acceptation de l'objet nature et les enjeux qui ont abouti à sa prise en compte.

Ainsi, on peut simplifier une première étape qui débuterait avec les premiers jardins publics français dans la deuxième moitié du 19ème siècle et finirait dans la deuxième moitié du 20ème siècle (plutôt vers les années 1970-1980 avec le summum du zonage et les grandes plantations d'arbres). Auparavant, il n'y avait quasiment aucun parc ou jardin public. Durant cette période, on peut estimer que la « nature » rentre dans la ville car c'est une source de spectacles, un cadre d'activité puis de bien-être. Les jardins publics du début du 20ème siècle répondront d'ailleurs à un souci d'hygiénisme face à une ville trop industrieuse, sale et difficile à vivre. Durant tout ce siècle, on crée des espaces verts qui sont répartis dans les quartiers et bien espacés les uns des autres. On est en pleine politique du zonage.
Une deuxième grande période pourrait être définie de ces années 1980 jusqu'au tout début des années 2000. La « nature » devient biodiversité même en ville. On est alors sensible aux différentes espèces et la notion d'écosystème urbain apparaît. On instaure alors des gestions écologiques en limitant les intrants et les pesticides et en laissant des zones sauvages dans la plupart des parcs. On crée de nouvelles formes de parcs à vocation plus naturelle, et on communique sur les espèces et les habitats. Certains parcs deviennent des espaces d'éducation à la nature. L'environnement et les habitats sont inclus dans le réglementaire (PADD, SCOT…). Dans le même temps, une recherche naturaliste se développe sur les espèces animales et végétales. Des typologies et des analyses des facteurs en jeu sont ainsi réalisées. Les relations entre la composition des peuplements animaux, les types de végétation et l'organisation du tissu urbain sont aussi analysées le long de gradients d'urbanisation qui est une méthode de comparaison très utilisée en écologie urbaine. D'une manière générale, on observe que le nombre d'espèces décroît au fur et à mesure que l'on rentre dans la ville, les espèces volantes (oiseaux, papillons…) qui arrivent à s'affranchir des obstacles que constituent les bâtiments sont les plus nombreuses. La ville est ainsi capable d'accueillir une avifaune riche même en son cœur si les espaces de végétation offrent suffisamment de ressources. En revanche, le nombre d'espèces de mammifères et de nombreux insectes non volants diminuent très rapidement dès l'entrée dans le tissu urbain. La qualité de l'habitat ne suffit pas pour ces animaux terrestres, il y a un problème de capacité de déplacement qui implique directement la structure du tissu urbain. Il y a aussi des problèmes de taille des parcs-

[1] Ce terme est utilisé par [2] pour désigner l'ensemble des surfaces « vertes » du milieu urbain. Il peut alors s'agir de parcs et jardins publics ou privés, des espaces verts, mais aussi des emprises et bords de route, de chemin de fer, des friches, etc.

habitats souvent trop petits pour accueillir un nombre intéressant d'espèces. Toutes les modélisations sont alors tournées vers des mises en relation espèce-espace au niveau des parcs et jardins.

Une troisième étape correspondrait au début du 21ème siècle, surtout depuis 2005-2007. La « nature » rend des services à l'homme même en ville et devrait être mieux intégrée dans la ville. C'est suite au rapport du Millenium Assessment [1] en 2005 que la notion de services écologiques, ou écosystémiques, est définie. L'objectif était d'identifier les fonctions de l'écosystème que l'homme utilise et en général dont il dépend. Trois grands types de « services » sont reconnus : des services d'approvisionnement (fourniture des biens, alimentation, eau, etc.), des services de régulations environnementales (pollinisation, régulations flux hydriques, cycles…) et des services culturels (éthiques, esthétiques, récréatifs…). On examine alors aussi en milieu urbain les services rendus à l'homme et le rôle des différentes espèces. On lance de nouvelles propositions pour améliorer la présence de nature comme par exemple la végétalisation des bâtiments, l'intérêt des friches, etc. On souhaite enfin faire des corridors écologiques comme en campagne, pour permettre la dispersion des espèces. Le Grenelle de l'Environnement (2007) semble bien avoir agi comme un réel stimulateur d'une prise de conscience écologique, parfois en allant vite et loin, plus que les connaissances scientifiques le permettent. C'est souvent par un simple transfert de modélisation que les projets sont présentés. Par exemple, on transpose le modèle des trames vertes et bleues connues pour être efficaces en milieux naturels et ruraux directement au système urbain.

## L'importance des fonctionnements écologiques

Au cours de cette évolution, l'objet « nature en ville » a fortement changé dans son apparence, sa gestion et sa définition. Même la notion de biodiversité a supporté des définitions un peu différentes entre la 2ème et la 3ème période. Ainsi, la biodiversité a surtout été définie comme une diversité des organismes vivants au niveau gène, espèce et écosystème. Cette définition était incomplètement reprise par tous mais suffisante souvent à une approche purement naturaliste. Dans la période la plus récente, la seconde partie de la définition prend cependant toute son importance. La biodiversité n'est pas qu'une richesse biologique, elle intègre complètement les interrelations avec les milieux et les autres espèces. Le fonctionnement écologique (cohérence des chaînes alimentaires, équilibre des relations hôtes-parasites, sols-plantes, capacités de dispersion, etc.) est alors primordial et permet de poser différemment les problèmes. Par exemple, l'écologue travaille sur des espèces sauvages, spontanées mais, en ville, il ne peut pas garder cette vision s'il intègre logiquement les relations entre toutes les espèces. Les espèces cultivées exotiques ou domestiques sont les plus nombreuses et participent complètement au fonctionnement de l'écosystème urbain. Le chat est ainsi le principal prédateur de la petite faune urbaine et la diversité en fleurs exotiques multiplie les valeurs des miels produits au sein de la ruche… Par exemple aussi, les gestions à l'égard des espèces ont été ciblées aux échelles locales du parc ou du jardin (gestion écologique, zéro phyto…) mais c'est un fonctionnement écologique cohérent qui impose à l'échelle globale les planifications de corridors permettant la dispersion des espèces.

Cette double entrée échelle et fonctionnement apparaît comme l'une des plus prometteuses actuellement pour reposer correctement les relations écologiques dans un nouveau paradigme urbain où l'environnement naturel est pris à égalité avec les entrées transport, bâti, etc. Ainsi, il semble efficace de définir justifications et mécanismes de mise en œuvre à l'échelle locale (celle du parc, du jardin ou de la rue) puis à l'échelle globale de la ville ou de l'agglomération. La qualité écologique des espaces verts influe directement sur leur gestion (moindre entretien par ex.), sur leur perception (bien-être, création de lien social, santé humaine) et c'est en les augmentant qu'on améliore le cadre de vie, les espaces des loisirs et d'éducation et qu'on augmente les régulations de problèmes environnementaux en limitant l'imperméabilisation du sol pour les eaux de pluie, en fixant le particulaire atmosphérique, en stockant du $C0_2$ en faisant baisser la température extérieure, etc.

A l'échelle globale, ce sont l'organisation et les connections entre espaces verts qui sont à l'œuvre [2]. L'augmentation des corridors écologiques même en ville semble permettre de maintenir une biodiversité ordinaire jusqu'au cœur de la ville et pourrait augmenter la « transparence » régionale. Il s'agit dans ce dernier processus de limiter l'effet barrière que représentent les mégapoles dans les déplacements d'espèces peu mobiles notamment vers

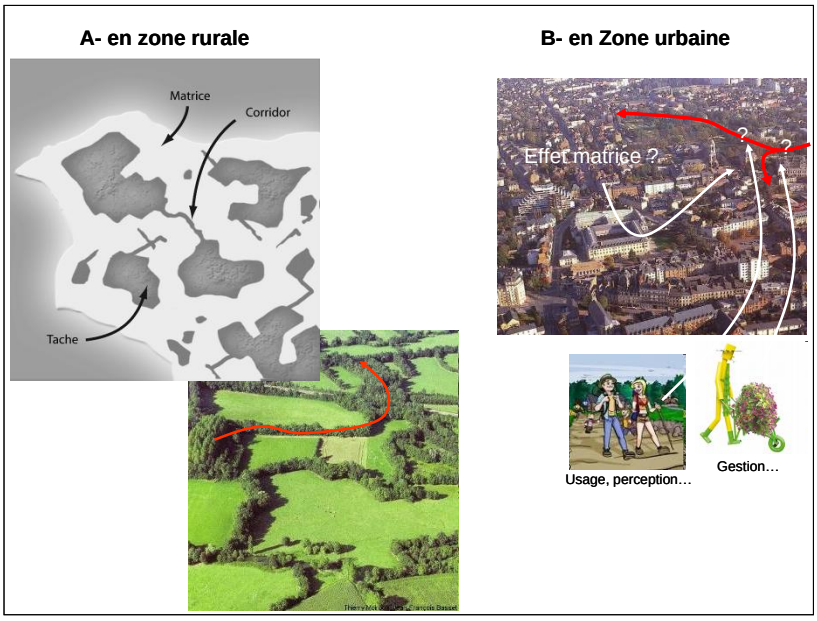
le nord (on démontre que les aires de distribution de beaucoup d'espèces sont en train de glisser vers le nord sous l'effet du réchauffement climatique). Ces corridors peuvent aussi servir de supports aux transports alternatifs (vélos, piétons) jusque dans le périurbain (liaison ville-campagne) et augmenter une interface citadin-nature en ville dense. Tout comme à l'échelle locale, les espèces devront être gérées pour favoriser certaines espèces mais en limiter d'autres comme les espèces invasives.

On perçoit bien les allers et retours entre échelles ainsi que leur complémentarité [3]. Cependant, alors qu'aux échelles locales il semble exister maintenant une certaine opérationnalité, cela n'est pas le cas aux échelles globales, notamment dans la planification urbaine. Quelle efficacité d'un maillage de corridors écologiques urbains et comment les identifier ou les construire ?

## Trames vertes et bleues urbaines ?

En écologie du paysage [4], on définit des taches d'habitat (ou noyau ou réservoir), là où vivent les espèces et des corridors qui leur permettent de passer d'une tache à l'autre. L'ensemble est entouré par une matrice plus ou moins perméable aux déplacements des espèces végétales et animales mais où elles ne peuvent pas accomplir leur cycle de vie. Ce modèle a été validé en milieu naturel et rural dans de nombreux pays et pour beaucoup d'espèces. La proposition de l'appliquer directement aux milieux urbains se justifie par les arguments que nous avons rappelés précédemment mais soulève de nouvelles questions scientifiques. Par exemple, les corridors étudiés en milieu rural sont généralement des haies ou des chemins peu utilisés et peu gérés. En ville, le concept de corridor écologique est difficile à dissocier d'un usage obligatoirement fort par les citadins (promenades, transports doux). Comment ce dérangement peut-il alors affecter les différentes espèces ? Par ailleurs, la matrice en milieu rural est quand même perméable aux déplacements de certaines espèces (un écureuil ou un insecte peut traverser un champ même si cela n'est pas son habitat de prédilection). En ville, la matrice est composée essentiellement de voirie et de bâti qui forment des barrières à tous déplacements. En supposant que les parcs puissent jouer le rôle de tache, est-ce que la fonctionnalité d'un corridor existe toujours sous ces contraintes ? Peut-on calquer un fonctionnement de « trames », c'est-à-dire taches + corridors, dans ce type de milieu ?

**Figure 1 :** Une trame verte est définie par des taches d'habitat (là où vivent les espèces) et des corridors qui leur permettent de joindre d'autres taches. Ce fonctionnement a été validé en zone rurale (A) mais pas vraiment en zone urbaine où les corridors écologiques sont sous de nombreuses contraintes (B).



C'est dans ce contexte que nous menons une recherche sur les trames vertes urbaines[2]. Les recherches sont ciblées sur certains services écosystémiques comme les services culturels (bien-être des habitants et amélioration du cadre de vie, réduction des inégalités sociales) et de régulation (fonctionnement de la biodiversité urbaine, rôle sur les pollutions atmosphériques et la climatologie locale), aux différentes échelles spatiales : le « local » (le pied d'arbre, le jardin…), le « paysage » (le quartier, le secteur) et le « global » (la ville, l'agglomération) et sur une mégapole, Paris, et des métropoles régionales françaises Strasbourg, Marseille, Angers, Rennes, Nantes, Montpellier. Le travail est radicalement interdis-ciplinaire avec dans chaque ville des équipes des sciences sociales et des sciences de la vie. Les objectifs sont d'évaluer les intérêts socio-écologiques des trames vertes en ville et de fournir des pistes de mise en œuvre [5]. Les premiers travaux valident le fonctionnement de déplacements de la petite faune du sol dans ces corridors, et a identifié des corridors potentiels inattendus comme les pieds d'arbres d'alignement. Des recherches sur le rôle potentiel de bâtiments végétalisés débutent également avec le souci, ici aussi, de la double échelle de fonction-nement, c'est-à-dire à la fois comme élément d'habitat et comme élément de corridor. Aujourd'hui, des modélisations sont en cours pour prédire les colonisations possibles des espèces végétales et animales en fonction des caractéristiques des paysages urbains. On met en évidence par exemple l'importance des connectivités effectives (similarité des communautés végétales entre sites) plutôt que des connectivités structurelles (distance euclidienne). Même des espèces comme les oiseaux réagissent à l'organisation du paysage urbain en suivant préférentiellement les corridors écologiques pour se rendre d'un point à un autre. Une difficulté majeure persiste cependant qui est de pouvoir intégrer dans les modèles spatiaux les composantes d'appréciation, d'usage et de comportements humains.

## Perspectives

La place de la nature en ville est de plus en plus discutée mais encore peu mise en application aux échelles de planification. Il y a un virage qui vient de s'amorcer pour intégrer dans notre environnement construit le fonctionnement écologique mais les acteurs tant décideurs que professionnels de l'aménagement sont encore pour la plupart très loin d'une prise en compte réelle.

L'urbanisme de demain, s'il veut s'inscrire dans une durabilité, devra intégrer dans sa réflexion simultanément le bâti et le non bâti. Il n'est plus possible de rester sur les schémas classiques de construction de la ville. Les paysagistes ont aussi encore beaucoup de chemin à faire pour participer concrètement à ces enjeux. Est-il normal que ce ne soit que des bureaux d'études de naturalistes qui travaillent aujourd'hui sur les identifications de trames ? Quelques architectes-urbanistes et quelques paysagistes prennent aujourd'hui cette dimension à bras le corps [6].

A la fois pour rendre compréhensible le fonctionnement écologique et pour être directement efficace dans l'opérationnalité, la prise en compte des différentes échelles apparaît comme un outil efficace et interroge directement le projet urbain. Les prises en compte au niveau des sites (parcs, rues) sont engagées et mises en œuvre par la plupart des services des Espaces Verts mais le défi aujourd'hui est que les services d'urbanisme et de voirie investissent aussi la problématique dans leurs actions, puisqu'ils deviennent acteurs des mises en œuvre des corridors écologiques, bases des trames vertes urbaines.

Enfin, le projet urbain est d'évidence pluridisciplinaire et on ne peut plus se permettre d'oublier les écologues dans les projets de construction. De même, on ne peut imaginer continuer des planifications réalisées par la seule discussion entre décideurs et professionnels. Une co-construction avec les citadins est évidement indispensable. Il suffit de voir dans TOUTES les villes la part énorme que représentent les jardins privés pour comprendre qu'aucune modélisation urbaine intégrée ne peut faire l'impasse sur cette large partie de l'espace urbain où un changement de comportement de jardinier peut transformer complètement la nature de la ville.

[2] Programme ANR Villes Durables : « Evaluation des trames vertes urbaines et élaboration de référentiels : une infrastructure entre esthétique et écologie pour une nouvelle urbanité ». Voir http://www.trameverteurbaine.com

## Bibliographie

[1] Millenium Assessment Report 2005
voir résumé dans
http://www.eco-life.fr/fiches/dossier_biodiversite_millenium_assessment_report.pdf

[2] Ahern J.
Green infrastructure for cities : The spatial dimension
*in Novotny V., Brown P. (eds.), Cities of the Future Towards Integrated Sustainable Water and Landscape Management - London, IWA Publishing, 2007*

[3] Clergeau P.
Une écologie du paysage urbain
*Apogée Ed., Rennes, 2007*

[4] Burel F., Baudry J.
Ecologie du paysage, concepts, méthodes et applications
*Tec & Doc Ed., Paris, 1999*

[5] Blanc N., Clergeau P.
Installer une trame verte dans la ville ? Le point de vue des chercheurs ?
*Numéro spécial d'Urbanisme "La démarche Écocité. Villes durables en projet", Hors série n°36, pp. 55-59, 2010*

[6] Bonnet F.
Pour de nouvelles formes urbaines
*Numéro de T comme territoire, ETD ed. n°2, pp. 33-36, 2010*

# - F -

# La modélisation intégrée de la ville

# Les modèles d'usage du sol et transport : où la géographie et l'économie se rejoignent

Fabien Leurent
Université Paris-Est - Laboratoire Ville Mobilité Transports - Ecole des Ponts ParisTech

**Un Modèle d'Usage du Sol et Transport (MUST) est une représentation théorisée et formalisée afin d'analyser un territoire dans ses aspects spatiaux, économiques et sociaux. L'usage du sol recouvre l'artificialisation de l'espace et son occupation par des agents et pour des activités sociales et économiques. Le transport met en relation les sites des activités, il en structure la configuration. Par delà les artefacts et les formes techniques, les modes d'organisation sont structurants : marché immobilier et système du logement, marché foncier et sa régulation, marché de l'emploi et politique économique, marché des déplacements et organisation du transport. Cet article met en évidence les éléments, les principes et la composition d'un MUST : les composants, interactions et sous-systèmes, tels qu'ils se dégagent d'un système territorial concret, et qu'un MUST est susceptible de refléter. Les principes relèvent de la géographie humaine (en incluant la démographie et la sociologie), de la géographie économique et de l'économie spatiale (en incluant l'économie urbaine, l'économie géographique, l'économie territoriale, l'économie des transports). Ils ont été théorisés depuis le 19ème siècle. Au milieu du 20ème siècle sont apparus des modèles de simulation à portée sectorielle : pour le transport, pour la localisation et pour la valorisation immobilière. Un MUST intègre ces secteurs. On distingue un MUST statique qui représente un équilibre général urbain de long terme, d'un MUST dynamique qui incorpore la temporalité des phénomènes. Le plan de l'article retrace cette histoire cumulative du développement des modèles.**

## Introduction

### *Contexte et enjeux*

La vie sociale et économique d'une population se réalise, elle a lieu, dans des sites de support qui sont progressivement fonctionnalisés et aménagés. Elle procède par combinaison entre des activités locales, des acteurs individuels ou groupés, et des relations d'échange de voyageurs, de biens et de services, de monnaie et d'information. Ainsi, l'espace géographique remplit deux fonctions pour la population : espace-support, pour réaliser une activité ou implanter un équipement, mais aussi espace-obstacle, qui sépare les sites d'activité, qu'il reste à franchir au moyen du transport.

Dit autrement, l'usage du sol et le transport sont deux fonctions étroitement interdépendantes. Grâce au développement technique, la population est capable d'investir fortement dans des artéfacts pour assurer intensivement les fonctions : construction de bâtiments dans l'espace-support, développement dans la dimension verticale ; construction et utilisation des infrastructures et des véhicules de transport, et ce pour divers modes de déplacement adaptés aux distances à franchir et aux conditions physiques locales.

Bâtiments, infrastructures, véhicules : ces artéfacts sont des équipements à longue durée de vie technique, par lesquels la population investit à long terme dans l'espace, et le capitalise. A court terme, la situation et l'occupation des équipements contraignent leur disponibilité pour un acteur particulier : les raretés induisent des valeurs économiques sur des marchés immobilier, foncier, de transport.

Fonctions, artéfacts, durabilité, raretés – les ingrédients sont réunis pour un beau problème de planification, le problème de l'aménagement territorial : quelles surfaces sont disponibles ou nécessaires pour réaliser telles activités, en quels sites, donc en quelles positions dans une configuration d'ensemble, avec quelles potentialités relationnelles ? Que rapporterait et que coûterait tel plan d'usage du sol et de transport, sur la base des valorisations accordées par les acteurs pour leurs projets et selon le jeu social ? Quels plans concevoir, et lequel choisir ?

Ainsi s'expriment des besoins méthodologiques de la planification, comme des sollicitations pour les aménageurs et les économistes. Ces derniers proposent une approche rationalisée basée

sur des modèles, les Modèles d'Usage du Sol et Transport (MUST), pour la simulation quantitative d'un plan, afin de projeter les effets vraisemblables d'un plan, de les évaluer, de comparer divers plans et d'aider à spécifier certaines dispositions. Or, dans la pratique, les projets d'aménagement qui s'imposent ne reposent généralement pas sur une évaluation intégrée à caractère économique : certes, des obligations juridiques se généralisent progressivement pour étudier une gamme d'impacts, elle-même en élargissement perpétuel, mais en matière de justification et d'intégration, on trouve des juxtapositions de critères bien plus que des évaluations économiques synthétiques. Les projets et les politiques de transport constituent une espèce singulière, où l'évaluation financière et l'évaluation socio-économique sont pratiquées selon une tradition longue même si les méthodes restent évolutives (*cf*. Leurent, 2007) [16]. Mais leurs impacts sur l'urbanisation ne sont pas évalués davantage que les projets d'urbanisme, alors que les incidences sur la construction de logements et de sites productifs, sur les valeurs foncières et immobilières, sont avérées. Une instance fameuse concerne les modes « massifs » de transport, le mode ferroviaire et le mode autoroutier : au voisinage des gares ont lieu des plus-values considérables, dont la capture et la redistribution constituent des enjeux importants pour l'économie du projet et pour l'équité sociale.

### *Notre objectif : décrire des éléments de modélisation*

Nous voulons ici présenter les « principes théoriques » concernant l'usage du sol et le transport : les hypothèses et les causalités d'ordre géographique, physique, économique et social, qui fondent des interprétations scientifiques et constituent des éléments de représentation pour un MUST. Dit autrement, nous voulons décrire et analyser la palette du modélisateur, les principales ressources à sa disposition pour composer une application ; nous nous intéressons moins directement aux « pinceaux » que sont les outils de simulation, et nous ne traitons pas ou peu des applications particulières.

Ainsi, nous nous concentrons sur l'enjeu scientifique de la modélisation, la fonction de description et d'explication ; l'enjeu pragmatique de simuler et d'évaluer reste en arrière-plan. Les contributions scientifiques au domaine des MUST proviennent de plusieurs champs disciplinaires. La géographie tout d'abord, puisque l'espace physique est à la fois la cible et le creuset de l'usage du sol et du transport. En mode mineur et sous forme de déclinaison de la géographie, interviennent la démographie et la sociologie, car il s'agit d'une population dans ses activités sociales, selon des modes de vie qui engagent des équipements techniques. L'économie enfin est au premier plan, comme science de la décision et des organisations : les acteurs agissent, décident et évoluent dans l'espace, selon des objectifs, des contraintes et des comportements, et leur taille (individu, groupe petit ou moyen ou grand) dose leurs impacts sur le territoire ; une forme d'organisation cruciale est le marché, lieu de rencontre entre une offre et une demande.

### *Une approche qualitative et modulaire*

Notre présentation est une description qualitative, sans formalisme mathématique, qui privilégie la structure du système territorial, sa composition en sous-systèmes interconnectés, la composition interne d'un sous-système et les relations entre sous-systèmes. Elle procède d'une analyse systémique, en tant que pré-modélisation ou modélisation conceptuelle. Les éléments et les relations que nous évoquons peuvent être représentés dans un modèle de simulation – tenons pour assuré que de tels modèles existent ou pourraient exister, et intéressons-nous à la signification de leurs principes communs, plutôt qu'à leurs différences superficielles.

Les principaux sous-systèmes sont des marchés économiques d'un certain bien : marché immobilier, marché foncier, marché des transports (ou plutôt des déplacements), marché de l'emploi. Un tel sous-système a pour principaux composants, une offre, une demande, un régulateur et, le cas échéant, des externalités. Nous distinguons des éléments-acteurs tels qu'un offreur ou un demandeur, avec une position, une dotation (par exemple un revenu), un comportement décisionnel qui engage un intérêt économique, un univers de choix (ou d'options), une perception et une évaluation ; et des éléments-couplages tels qu'une relation d'échange entre offreur et demandeur, ou une concurrence entre divers acteurs de même type (ainsi les enchères des demandeurs sur un marché immobilier), ou un couplage-acteur comme la demande de plusieurs produits sur plusieurs marchés par un même acteur (ménage ou entreprise), ou un mécanisme de régulation, ou une certaine externalité.

Nous maintiendrons à l'arrière-plan notre appareil analytique, qui relève principalement de l'économie. La spatialisation se manifeste dans la nature même des principaux biens considérés : immobilier, foncier, transport, ainsi que dans les intérêts économiques des acteurs, par le prix de

s'établir en tel lieu avec telle surface et par les coûts du transport entre l'établissement résidentiel et les lieux des activités, notamment productives.

### *Plan de présentation*

Le corps de l'article est articulé en quatre parties qui renvoient chacune à une époque, une étape du développement scientifique. La première époque est la préhistoire des MUST : aux 19ème et 20ème siècles des géographes et des économistes isolés ont conçu des principes descriptifs et explicatifs avant qu'apparaissent le formalisme mathématique (qui a facilité la structuration conceptuelle) et les ressources de simulation. La seconde étape est l'émergence de modèles sectoriels, pour le transport, la localisation résidentielle et la valorisation immobilière, de pair avec le développement de l'informatique et de la recherche opérationnelle dans les années 1950-1980. La troisième étape est la théorisation par une communauté scientifique d'économistes urbains, constituée à partir de 1960 : les modèles d'économie urbaine sont des MUST de nature théorique. Les MUST de simulation en reprennent les principes et ajoutent des capacités de description fine et de résolution numérique. A ce stade, il s'agit de modèles d'équilibre dans un cadre statique (situation d'équilibre « à long terme ») : ils demeurent les plus utilisés en pratique.

La quatrième époque est en cours : la synthèse théorique de l'économie urbaine a établi un noyau solide qui supporte diverses extensions, tout spécialement l'explicitation de la dimension temporelle et l'avènement de modèles dynamiques.

## L'expression des principes

Le développement et l'aménagement des territoires sont des processus sociaux à l'histoire longue, au moins celle des civilisations sédentarisées. Leurs acteurs ont certainement pensé et conceptualisé les décisions à prendre et les arguments déterminants : on retrace jusqu'à l'Antiquité des décisions de fonder une ville. Plus près de nous, des stratégies de développement ont été exprimées par des gouvernants : en France, Sully pour l'agriculture, Colbert pour le commerce et la production locale ; en Allemagne, Frédéric II de Prusse pour le commerce et l'industrie, etc. Le raisonnement scientifique a repris certains principes et en a ajouté d'autres ; en la matière, son développement remonte au 18ème siècle.

### *La spécialisation, l'échange et la spatialisation*

Vers 1750, François Quesnay a conçu le tableau des échanges économiques, en valeur, entre les secteurs productifs à l'intérieur et à l'extérieur d'un pays. Vers 1810, David Ricardo a théorisé les avantages du commerce entre des régions : le commerce met à disposition des régions l'ensemble des biens dont la consommation est désirée. Alors, chaque région peut concentrer sa force de travail à produire ceux des biens qu'elle peut produire avec le plus de facilité, de productivité selon ses conditions locales qui constituent sa dotation en facteurs « naturels ». Le modèle de Ricardo manifeste plusieurs lieux-sites, en chacun des consommations, des productions et de l'emploi, donc des revenus et du commerce entre les sites. Les facteurs naturels ne sont guère analysés entre les conditions agricoles ou industrielles. Les coûts de transport ne sont guère mentionnés, l'activité correspondante n'apparaît pas, l'industrie de ses véhicules et infrastructures non plus.

Vers 1840, Jules Dupuit a théorisé la notion d'aire de marché pour une firme, selon ses coûts de production et de distribution (incluant le transport), ainsi que le couplage entre le potentiel de demande dans cette aire et l'effet d'échelle dans la production. La proximité entre consommateurs et producteurs est un couplage aval sur la production. Vers 1900, Wilhelm Launhardt puis Alfred Weber ont théorisé les choix d'implantation industrielle d'une firme, selon les facteurs localement disponibles pour la production, les débouchés commerciaux et aussi la facilité d'approvisionnement externe donc un couplage amont sur la production.

A la même époque, Alfred Marshall a théorisé certains effets d'agglomération : l'attractivité d'une main d'œuvre abondante et qualifiée pour une firme, et réciproquement l'intérêt d'emplois diversifiés pour un travailleur. La variété des industries contribue de plus à la résilience face à une crise sectorielle de demande.

En particulier, l'effectif de la population détermine le potentiel de demande pour divers biens, et donc les débouchés pour des producteurs.

A ce stade la pluralité des biens et les relations input-output dans la production sont reconnues. La théorie base-multiplicateur en économie régionale ajoute une qualification industrielle et spatiale importante : les biens basiques *i.e.* exportables entre régions, sont distingués des biens domestiques produits et consommés localement. La production basique d'une région lui donne un pouvoir d'achat qui exerce un effet de levier sur la production domestique. Le bras de levier croît avec l'effectif de la population, qui dimensionne la production domestique et sa propension à fournir les intrants de la production basique (Allan Pred, 1966) [23]. La démarcation des secteurs productifs induit nécessairement une démarcation des échelles : infra-régionale (locale) versus interrégionale.

### *Conditions de production et organisation spatiale*

Récapitulons les principes précédents dans un ordre logique cumulatif :

- La diversité des biens,
- La diversité des régions,
- Par région, la spécificité de la dotation naturelle (les facteurs de production) et des conditions de production.
- La population et le secteur productif domestique constituent des facteurs locaux, dans la dotation locale d'une région : leur importance influence les conditions de production des biens basiques.
- Le commerce et la spécialisation productive peuvent procurer des avantages.
- Le transport est une opération coûteuse.
- Avantages de position : la diversité des régions et les coûts de transport confèrent à chaque position des qualités spécifiques : aire de marché et potentiel de demande, et symétriquement des aires et potentiels d'approvisionnement.

Ces principes décrivent une configuration établie des régions et des productions : cette configuration impose des conditions particulières à la production de tout bien en tout lieu. Les variations spatiales des conditions devraient être considérées par tout entrepreneur afin de décider en quel lieu établir sa firme. Si les possibilités d'implantation sont suffisamment ouvertes, alors les conditions d'ensemble influencent les localisations des acteurs microéconomiques : en jouant sur l'ensemble des acteurs à long terme, elles rétroagissent sur la composition industrielle dans chaque région, et donc sur l'organisation spatiale d'ensemble, *i.e.* la configuration établie.

Cette rétroaction des conditions économiques territorialisées sur l'organisation spatiale est au cœur de la théorie économique de l'espace, aux échelles urbaine, régionale et interrégionale.

Vers 1930, le géographe allemand Christaller a constaté des régularités dans l'armature urbaine d'un territoire : par gamme de taille (population), les villes sont disposées à des intervalles réguliers d'autant plus grands que la population est plus forte. Il a proposé plusieurs principes explicatifs selon diverses fonctions urbaines :

- Une ville, en tant que place de marché pour la rencontre des producteurs et des consommateurs, attire les producteurs voisins notamment agricoles ; son aire d'influence dépend de sa population et des coûts de transport.
- La situation respective du semis de villes et du réseau de transport influence la forme des aires de marché.
- La fonction « administrative » induit une certaine hiérarchie entre villes.

Vers 1940, August Lösch a formalisé davantage les arguments de Christaller.

Cependant, la contribution majeure est bien antérieure : Von Thünen (1826) a théorisé l'usage du sol en tant que marché économique pour la localisation des activités, et la dépendance des prix fonciers envers les fonctions de production des diverses activités.

### *Le rôle et la formation des valeurs d'usage du sol*

Dans le modèle de Von Thünen, un site de débouché est commun à divers producteurs : disons un centre ville en tant que marché de produits agricoles. En supposant des coûts de transport proportionnels à la distance entre le site de production et le marché, Von Thünen a montré :

- que chaque producteur, selon son type de produit et les conditions de production spécifiques (rendement productif par unité de surface, prix des produits), offre aux propriétaires fonciers un certain prix par unité de surface, son enchère foncière ;
- si chaque propriétaire retient l'enchère maximale, alors les prix fonciers décroissent en s'éloignant du centre, et chaque nature de production s'exerce dans un certain espace autour du centre.

Au total, le modèle offre-demande du marché foncier implique des valeurs foncières et une organisation spatiale, à partir des conditions de production locale, de la configuration des sites autour du marché et des coûts de

transport associés.

Après Von Thünen, des écologues urbains ont spécifié des influences variées de l'espace géographique sur les conditions de production avec, à la clef, d'autres formes d'organisation spatiale.

- Burgess (1925) [2] constate empiriquement que des catégories de ménages et d'activités professionnelles se localisent en ville selon des anneaux concentriques. Cela sera expliqué par Alonso (1964) [1] par transposition des idées de Von Thünen.
- Homer Hoyt (1939) [14] constate plutôt des spécialisations fonctionnelles par secteurs, selon les conditions locales d'urbanisation et les corridors de transport.
- Ullman et Harris (1945) [25] décrivent une agglomération comme un groupe de noyaux aux fonctions spécifiques, articulés par les modes de transport. Un noyau groupe lui-même des fonctions qui composent une gamme spécifique ; certaines fonctions en attirent d'autres et en repoussent d'autres encore.

La transposition du modèle foncier de Von Thünen au marché immobilier à l'intérieur d'une ville par William Alonso vers 1960, constitue l'acte fondateur de la théorie économique urbaine moderne et des MUST : nous y reviendrons dans la 3ème partie.

## Modèles sectoriels

Au milieu du 20ème siècle est survenue une révolution technologique dans le traitement de l'information : l'ordinateur, l'électronique, la télématique prennent leur essor. Leur diffusion est accompagnée par le développement des sciences pour l'ingénieur, notamment l'informatique et la recherche opérationnelle, et amène une rupture dans des domaines scientifiques traditionnels : le développement de la modélisation quantitative. En quelques années ou décennies, la modélisation s'est répandue dans trois secteurs essentiels pour les MUST, respectivement le transport, la localisation et la valorisation immobilière.

### *Planification des transports et modèles de déplacements*

Comme les infrastructures de transport sont des objets techniques extrêmement coûteux, leur planification a très tôt engagé des études de clientèle et d'usage, afin d'estimer la rentabilité financière et socio-économique des investissements. Les méthodes appliquées traditionnellement à un projet de tronçon modal (18ème siècle…) ont été transposées, élargies, approfondies afin de traiter des schémas d'aménagement, des réseaux multimodaux et même des politiques de transport. Il existe désormais une boîte à outils abondante pour simuler les déplacements sur un réseau (Ortuzar et Willumsen, 2004 [22] ; Certu, 2003 [5]). Le schéma typique d'une application est un enchaînement de causalités dont chacune est simulée par un modèle-composant. Alan Voorhees (1955) [27] a proposé un schéma en trois étapes :

- D'abord la génération des besoins de déplacement : ayant décomposé en zones le territoire étudié, en fonction de l'occupation du sol (population, emplois, surfaces commerciales etc) on modélise des effectifs de déplacements respectivement émis et reçus par chaque zone, par motif d'activité et pour une période de référence.
- Ensuite la distribution spatiale du trafic entre les relations origine-destination : par couple de motifs d'activité, on affecte à chaque couple de zones un volume de déplacements en fonction des émissions zonales, des réceptions zonales et des conditions de déplacement par relation (en temps de transport, coût monétaire…).
- Enfin l'affectation du trafic aux itinéraires sur le réseau : par relation origine-destination le volume de déplacements est affecté à un itinéraire de moindre coût, et la superposition des flux qui traversent chaque élément de réseau en constitue le volume local.

Au total, le modèle intégré détermine l'usage des moyens de transport à partir d'hypothèses sur l'usage du sol, sur les fonctions de génération (émission, réception), sur la fonction d'interaction spatiale dans la distribution, sur les conditions de transport locales et par relation origine-destination.

Le modèle d'affectation repose sur un principe microéconomique, le choix d'une option d'itinéraire parmi un ensemble de possibilités, par un demandeur individuel, pour son motif d'activité, selon un comportement optimisant. La rareté microéconomique concerne le temps consacré au transport autant et même plus que le coût monétaire : la logique est micro-économique mais peu marchande, et

l'offreur ne récupère pas le temps passé par le consommateur.

On peut relier, par élément de réseau, le temps de transport au flux local et ainsi intégrer un feedback de la charge de trafic sur l'état du système et les choix d'itinéraire. Il en résulte un équilibre offre-demande des services de transport, dans lequel l'offre a un comportement physique plus qu'économique.

Le schéma de modélisation a été sophistiqué dans plusieurs directions :

- Les rétroactions des conditions de déplacements sur la distribution spatiale du trafic et même sur la génération.
- L'ajout d'autres modèles-composants comme des étapes complémentaires : le choix du moyen de déplacement (à équipements fixés), le choix d'horaire de départ, le choix d'équipement en moyens privés (automobile, abonnement au transport collectif).

C'est pourquoi la démarche d'étude est connue sous le nom classique de schéma à quatre étapes. La logique microéconomique demeure la caractéristique fondamentale. La désagrégation de la demande selon des conditions physiques (relation origine-destination, période, conditions spécifiques d'accès et d'usage) ou économique (motif, comportement) est un aspect important pour le réalisme : il revient au modélisateur de spécifier un degré de finesse.

### *La localisation des domiciles et des emplois*

Cependant, la localisation résidentielle des agents microéconomiques, ménages et firmes, reste exogène dans un modèle de déplacements. Elle est endogène dans un modèle de localisation. Une instance importante est due à Ira Lowry (1964) [18], qui a modélisé l'activité productive basique et domestique ainsi que les décisions d'établissement résidentiel, en imposant des structures d'interaction spatiale.

Le modèle de Lowry distingue des zones et repose sur les hypothèses suivantes :

- Les emplois des activités basiques sont fixés de manière exogène.
- Le marché de l'emploi est équilibré : le nombre d'emplois est égal au nombre d'actifs.
- Les actifs sont domiciliés à partir de la localisation des emplois, selon une fonction d'interaction spatiale.
- Les emplois domestiques sont localisés à partir des localisations de la population, selon une autre fonction d'interaction spatiale.

Ainsi, le modèle reconnaît la structure spatiale du territoire, de la population résidente et active, de l'activité domestique et basique. Les fonctions d'interaction sont des modèles gravitaires de distribution spatiale, avec par relation origine-destination une impédance de transport qui engage surtout du temps passé. Ainsi, la domiciliation des actifs peut passer à la rigueur pour microéconomique, mais pas celle des emplois. Les ménages comme les firmes ne sont guère désagrégés en catégories. Surtout, le modèle ignore les valeurs foncières et immobilières, ainsi que toute contrainte d'urbanisation par zone !

Au total, le modèle de Lowry est un MUST macroéconomique spatialisé, très primitif et statique. Des versions modernes remédient à ces carences en apportant des sophistications : ainsi, le modèle Tranus explicite les choix de localisation des ménages et des firmes, ainsi que les valeurs immobilières selon la zone ; il détaille les relations économiques entre les secteurs productifs, selon un modèle input-output à la Léontief (De la Barra, 2005) [7].

### *Valeurs immobilières : analyse hédonique*

L'analyse hédonique d'un bien économique en relie le prix à une ou plusieurs caractéristiques de qualité. Le principe est que *(i)* les caractéristiques des biens déterminent l'utilité pour un demandeur, *(ii)* l'utilité motive une enchère de prix, *(iii)* les enchères des demandeurs induisent le prix du bien. A partir de transactions qui révèlent la disposition à payer des demandeurs, le modélisateur régresse le prix par les caractéristiques : le coefficient associé à une caractéristique dans la régression en révèle la valeur intrinsèque.

L'application au logement est évidente, avec des caractéristiques de surface, nombre de pièces, étage, qualité de construction, qualité de voisinage etc. On peut intégrer des variables d'accessibilité aux réseaux de transport et aux fonctions urbaines via ces réseaux.

Un modèle hédonique du logement révèle des valeurs et explicite la contribution des caractéristiques de qualité (cf. par exemple Friggit, 2004 [10] et Cavailhès, 2009 [4] pour des applications en France). Mais on ignore en général les caractéristiques des demandeurs. De plus, les résultats risquent d'être fortement biaisés en situation de déséquilibre, car la rareté de l'offre relativement à la demande ne se manifeste que par les prix et pas dans les quantités. A priori, les prix relatifs des caractéristiques sont des résultats plus

robustes que les prix absolus des biens.

### Bilan provisoire

Les modèles sectoriels de transport et de localisation sont des compositions relativement complexes. Nous n'avons pas détaillé le choix du moyen de transport, *i.e.* le choix des équipements privés, le choix du moyen modal de déplacement et le choix d'horaire, afin de ne pas surcharger la présentation : il convient de les modéliser pour éviter la monomanie automobile des premières applications américaines, qui supposaient d'emblée une large diffusion de l'automobile et son utilisation très majoritaire.

Les complexités des modèles sectoriels se cumulent dans leur intégration : c'est pourquoi un MUST présente une grande complexité. Les modèles sectoriels originels privilégient la dimension géographique, avec le détail par zones pour les variations spatiales dans la localisation des emplois et des résidences, et le détail par élément de réseau pour les conditions de déplacement.

Au plan économique, ce sont moins des modèles d'offre et de demande que des modèles de demande et de capacité offerte :

- La demande est un ensemble de demandeurs, chacun avec un comportement microéconomique (même grossier).
- Dans le modèle d'affectation en transport, les volumes de demande rétroagissent sur les temps de déplacement plutôt que sur les prix.
- Dans le modèle de génération des déplacements, les capacités d'occupation du sol sont fixées de manière exogène, sous la forme d'effectifs zonaux de ménages et d'emplois.

Ni les offreurs, ni leurs conditions et coûts de production ne sont représentés dans les modèles sectoriels.

Au total, la relation offre-demande est imparfaitement marchande, dans les modèles comme dans les systèmes concrets ; les modèles ne capturent pas la dimension économique de l'offre.

## De la théorisation à la simulation : modèles d'équilibre urbain

Dans les années 1960, les idées de Von Thünen ont été reprises et considérablement développées par William Alonso, Edwin Mills et Richard Muth qui ont fondé le modèle monocentrique urbain : par hypothèse, tout l'emploi est concentré en un point autour duquel se répartissent les résidences en fonction des capacités de logement disponibles localement et des coûts de transport vers le centre ; les demandeurs choisissent une localisation en emplacement et en surface, ils enchérissent sur le marché immobilier, et les offreurs retiennent les meilleures enchères.

Le modèle monocentrique est la pierre angulaire dans la fondation d'une théorie scientifique et d'une communauté scientifique associée, celle de l'économie urbaine et de la « science régionale », à priorité économique. En parallèle se développent la recherche opérationnelle et la modélisation détaillée, particulièrement en transport. A partir des années 1980, les deux courants coopèrent et produisent ensemble des MUST applicables, rendus opératoires dans des logiciels de simulation et par une ingénierie d'étude spécialisée. DSC et *al* (1999) [8] passent en revue les principaux modèles appliqués.

Dans ce qui suit, nous analysons l'équilibre urbain, *i.e.* fondamentalement l'équilibre du marché immobilier § 4.1, et nous discutons la modélisation des offreurs § 4.2, des demandeurs § 4.3, des externalités § 4.4 et de la régulation § 4.5.

### L'équilibre en prix et en volume du marché immobilier

Ici, l'équilibre d'un marché signifie la rencontre entre l'offre et la demande : chaque côté interagit avec l'autre et se compose d'acteurs en compétition. Chaque acteur a un comportement microéconomique, un objectif, des contraintes et un domaine de décision.

L'équilibre urbain concerne en priorité le marché immobilier pour l'établissement résidentiel : le demandeur typique est un ménage ou une firme, l'offreur typique est un propriétaire immobilier. Si, dans la réalité, le stock immobilier est figé à court terme, la théorie propose plusieurs représentations : retenons provisoirement l'hypothèse que, dans chaque zone, il existe une certaine quantité de surface résidentielle, quantité partageable à volonté et sans frais en autant de lots (logements) et de tailles aussi adaptées que le désirent les demandeurs.

Dans ce cadre, le modèle du marché immobilier détermine les variables endogènes suivantes :

- le prix par unité de surface en chaque zone, et ce pour chaque catégorie de

biens dans une typologie spécifiée par le modélisateur ;
- la taille de lot, par zone, catégorie de biens et catégorie de demandeurs ;
- par catégorie de demandeurs, un ensemble de localisations en termes de position, de qualité (catégorie de bien) et de surface de lot, qui sont toutes optimisées (sous contraintes). Cette affectation des lots aux demandeurs est le résultat le plus significatif pour la spatialisation.

En termes économiques, les prix unitaires et les tailles de lot induisent la dépense résidentielle par demandeur, sa dépense de transport, son surplus, ainsi que les recettes correspondantes pour les offreurs respectifs.

Voici les principales hypothèses et lois de comportement :
- des surfaces de localisation sont offertes en quantité déterminée par zone et catégorie ;
- par zone et catégorie, un offreur représentatif reçoit les enchères des divers demandeurs et retient les enchères maximales pour des surfaces dosées, dans la limite de la quantité dont il dispose ;
- une catégorie de demande est composée d'agents réputés homogènes en revenus, en lieu professionnel, en coût de transport vers ce lieu depuis chaque position résidentielle, en contrainte budgétaire et en comportement microéconomique.

Parmi les limitations du modèle, les plus fondamentales concernent :
- la liquidité des surfaces de logement : réputées reconfigurables à volonté et sans coût ;
- l'hyperfluidité du marché – un accès illimité et gratuit à l'information, à des services d'intermédiation (agences) ; l'absence de coûts de transaction ; une vigilance et une réactivité totales de chaque demandeur et de chaque offreur ;
- les conditions aux limites du marché. Il existe deux spécifications principales : d'une part, la ville fermée à population fixée de demandeurs, d'autre part la ville ouverte où les populations peuvent migrer entre les villes et, par catégorie de demandeurs, un niveau d'utilité s'impose sur un territoire d'ensemble.

De plus, une large part des modèles appliqués sont stationnaires, comme le modèle de Lowry. En attendant de traiter des aspects dynamiques dans la dernière partie, signalons ici la force de l'hypothèse de stationnarité : à l'origine facilité algorithmique dans les modèles analytiques comme dans les modèles applicables, elle ferme le système à toute évolution historique. En général, elle va de pair avec les hypothèses de liquidité et d'hyperfluidité, ce qui restreint considérablement le réalisme de la représentation.

### *Le côté de l'offre : secteurs, acteurs, profondeurs*

Nous considérons ici l'offre immobilière et ses prolongements, mieux ses approfondissements, à la production immobilière et à l'aménagement foncier.

Sur le marché immobilier, un bien est à occuper pendant une certaine durée. Une durée d'occupation illimitée signifie la vente, tandis qu'une durée déterminée signifie la location du bien, *i.e.* un service d'hébergement. Concernant la location, il convient de distinguer le secteur privé et le logement social, car le comportement d'offreur dépend du secteur, ainsi que les conditions d'accès pour les demandeurs.

Pour un acteur offreur d'un bien immobilier sur un marché privé, on suppose *(i)* la connaissance des diverses enchères, *(ii)* la rationalité, *i.e.* le choix de l'enchère maximale. L'hypothèse de liquidité, irréaliste au niveau individuel, l'est moins au niveau agrégé d'une zone. L'hypothèse d'hyperfluidité néglige diverses imperfections, telles qu'un refus d'évacuation par un locataire en fin de bail, ou la fidélisation d'un locataire soigneux par une réduction de loyer.

Cependant, l'attention des modélisateurs a été focalisée davantage sur l'élasticité de l'offre immobilière : conformément aux principes génériques en théorie économique, chaque offreur devrait établir la quantité de sa production en fonction du prix du marché, par zone et par catégorie de biens. Or la production immobilière est contrainte et peu élastique. Muth a modélisé une fonction de production dans laquelle deux facteurs, la surface foncière (au sol) et le capital, déterminent la surface logeable. Mais les fonctions de production immobilières restent peu connues, les travaux empiriques manquent à leur sujet. Leur modélisation met en évidence le besoin en capital, donc le couplage entre l'offre immobilière et le marché des capitaux. Sur celui-ci, l'immobilier localisé est un produit spécialisé auquel s'intéressent divers types d'investisseurs – dans la réalité mais pas dans les applications des MUST que nous connaissons.

L'autre facteur de la production immobilière est la surface foncière : le développeur immobilier est placé en position de demandeur

sur le marché foncier, qu'il convient de modéliser lui aussi, avec ses contraintes propres (règles d'urbanisme) et ses offreurs spécifiques. Là encore, rares sont les applications des MUST qui s'aventurent sur ce terrain.

### *Du côté de la demande : les ménages et les firmes*

La demande d'établissement résidentiel comprend les ménages pour leur logement, les firmes pour localiser leurs établissements productifs (au sens large en incluant les établissements commerciaux), les administrations et les associations.

L'établissement résidentiel d'un ménage combine des enjeux de trois types : logement, habitat et accessibilité. Un logement particulier présente une certaine surface, un certain confort intérieur (agencement, isolation phonique et thermique, équipements tels que balcon, jardin, parking…) et des fournitures locales (eau, énergie, télécommunications, gardiennage…). La qualité d'habitat recouvre le type d'habitat en mode individuel ou collectif, ainsi que la qualité de vie locale : densité, aménités de proximité (services, commerces), composition et qualité sociale du voisinage. L'accessibilité recouvre des obligations particulières (lieu d'emploi), des opportunités particulières (proximité de parents ou d'amis) et des opportunités locales (position dans le bassin d'emploi ; aménités sociales, culturelles, touristiques, commerciales). Chaque ménage arbitre de manière particulière entre les types d'enjeux, dont certains lui sont particuliers alors qu'en général, on ne modélise que la surface comme facteur d'utilité, et seulement l'accessibilité au bassin d'emploi comme facteur du coût de transport. Appelons cet écart entre modèle et système concret, le risque de mésutilité.

Le ménage est modélisé comme une entité décisionnelle, rationnelle (sous réserve des hypothèses de liquidité et d'hyperfluidité), soumise à une contrainte budgétaire entre les dépenses (de logement, de transport, en autres consommations) et les revenus, parmi lesquels les revenus d'activité professionnelle. Le nombre d'actifs, leur qualification professionnelle, leur statut d'occupation et leur revenu professionnel sont particuliers au ménage, ainsi que sa situation patrimoniale, ses rentes sociales (retraites, pensions) et ses coûts de transport dus à son lieu d'emploi. Une description fine de la contrainte budgétaire est importante pour le réalisme du modèle : or cela nécessiterait une segmentation fine des ménages, qui est rarement pratiquée, et une connaissance des diverses rentes parmi les ménages. Appelons cette source d'écart entre modèle et réalité, le risque d'incohérence budgétaire.

En prolongement, il y a un risque de mésagrégation, ou de mis-polarisation de l'emploi : si le lieu d'emploi n'est pas particularisé pour chaque actif membre du ménage, alors dans le modèle on remplace le coût particulier de transport par une variable proxy d'accessibilité au bassin d'emploi. Il en résulte non seulement une incohérence budgétaire, mais aussi, dans l'estimation économétrique du modèle, un grand brassage des situations désagrégées et, vraisemblablement, une évaluation défectueuse des arbitrages entre dépenses de transport et dépenses de logement, ce qui se répercute dans la fonction d'utilité. Ce risque de mis-polarisation est masqué dans le modèle monocentrique par ses hypothèses simplificatrices : polarisation ponctuelle de l'emploi, et un ancrage du ménage exclusivement à l'emploi.

Ainsi la représentation de la demande est infestée par trois risques dans un MUST appliqué : la mésutilité, l'incohérence budgétaire et la mésagrégation.

Pour une firme demandeuse d'établissement, la logique est similaire et s'élabore conformément au modèle microéconomique de Weber. Par essence, une firme est une entité décisionnelle et budgétaire, pîlotée selon une rationalité surtout financière. L'entité peut compter un ou plusieurs établissements, auquel cas une stratégie d'entreprise régit les diverses localisations – par exemple, la dissociation entre un front office en centre ville et un back office en périphérie. La taille est plus diversifiée que pour un ménage : une grande entreprise peut intervenir directement sur le marché foncier pour son implantation.

Les enjeux de localisation recouvrent : *(i)* l'hébergement physique des activités qui nécessite une certaine surface, et le cas échéant des facilités spécifiques (au sol, en sous-sol ou en étage…) ; *(ii)* un cadre local, pour la qualité de travail des agents et surtout pour une exposition réduite aux divers risques (naturels, industriels, civils…) ; *(iii)* une accessibilité aux clients, aux fournisseurs et aux agents, qui peut dominer l'ensemble (ex. d'un commerce de luxe ou de proximité). La pluralité d'enjeux induit une diversité des arbitrages selon les firmes, par nature d'activité et par taille d'établissement.

En ne modélisant qu'une ou quelques entreprises « représentatives », le risque d'incohérence budgétaire est plus grand. De plus, pour une firme, le risque de mis-

polarisation concerne l'accessibilité non seulement pour ses agents, mais aussi pour ses clients et ses fournisseurs. Par nature d'activité, il conviendrait de modéliser ces diverses accessibilités en intégrant une portée spécifique et des coûts de transport réalistes.

Certains modèles distinguent les natures ou secteurs d'activité et même décrivent la structure intersectorielle des consommations intermédiaires donc des échanges, typiquement par un modèle input-output à la Léontief. En principe, on pourrait même spécifier une fonction de production par secteur, incluant les consommations intermédiaires, le travail, le capital et la surface ; et relier le niveau de production à la position dans l'espace face aux clients et relativement aux concurrents. De tels modèles d'input-output spatialisé et d'équilibre spatial généralisé sont appliqués entre régions plutôt que dans une agglomération, et pour simuler les échanges de produits et services plutôt que des marchés immobiliers.

Les administrations et les associations sont, comme les firmes, des entités décisionnelles, budgétaires et employeuses. En un lieu donné, leur comportement de demandeur résidentiel est similaire : minimiser le coût pour disposer d'une surface convenable. Cependant, leur choix du lieu d'implantation engage des intérêts et comportements spécifiques : accessibilité des usagers certes, mais équité territoriale plutôt que compétition économique pour une administration, tandis que certaines associations à caractère social ont pour but de combler des carences et peuvent se localiser exprès en zone défavorisée, donc plutôt en creux relativement aux firmes.

### *Sur les externalités*

En représentant conjointement l'usage du sol, le transport, l'offre immobilière, les ménages et les firmes, ainsi que diverses interactions dans l'espace, on dispose d'un large répertoire de composants et l'on peut examiner une grande variété d'impacts, environnementaux, sociaux, économiques.

La notion d'externalité fait référence à un marché pour désigner un certain effet sur un acteur offreur ou demandeur ou externe, effet qui n'est pas directement intégré dans le prix de marché. Nous nous intéressons ici aux externalités relatives au marché immobilier.

Parmi les impacts environnementaux susceptibles d'être examinés, mentionnons les consommations de ressources (eau, énergie, matières…) par les activités établies dans les bâtiments, selon leur nature et leur intensité ; les consommations d'énergie dans les transports ; et en correspondance, les rejets de déchets, les émissions de polluants et de bruit. Comme les émissions sont spatialisées, elles peuvent influencer la qualité de vie locale et par conséquent les valeurs immobilières : cet impact a été théorisé mais pas encore appliqué dans un MUST à notre connaissance.

Parmi les impacts sociaux, les choix résidentiels induisent la composition sociale locale : ils déterminent qui est exposé à tel endroit aux conditions locales de toutes natures, aménités ou nuisances. L'exposition est constitutive de la qualité de vie locale, donc elle rétroagit sur les choix résidentiels et les valeurs immobilières. De plus, une composition sociale spécifique peut induire des comportements spécifiques, citoyens ou incivils, dont les effets locaux positifs ou négatifs impactent à leur tour la valorisation immobilière. Ainsi, s'engagent des accumulations vertueuses ou vicieuses d'effets.

Les géographes reconnaissent aussi des effets de la forme urbaine :

- la continuité et la densité du bâti permettent des économies de densité : facilité et productivité de la forme de réseau pour des infrastructures et des services ;
- le regroupement des locaux à des propriétés positives, par exemple une exposition au froid plus favorable pour des logements groupés ;
- la densité donne lieu aussi à des déséconomies : surcoût de construction, effets de masque entre des logements qui gênent la récolte de ressources naturelles (eau, énergie solaire ou éolienne) ; gênes mutuelles dans un voisinage (notamment le bruit d'habitation) ; effet d'îlot de chaleur. Et surtout, les effets de rareté (congestion) en transport et dans l'usage du sol.

Si la forme urbaine coïncide avec une forme institutionnelle, une gouvernance unifiée permet de concentrer des moyens financiers, donc de dégager un pouvoir d'investissement ; et d'affecter ces moyens à des usages internes déterminés de manière cohérente (aménités publiques, planification d'ensemble), ainsi qu'à des usages externes à forte valeur ajoutée (équipements de prestige, représentation extérieure pour attirer des investisseurs, des habitants ou des visiteurs).

Venons-en aux externalités qui affectent l'offre immobilière :

- dans la production immobilière, les économies d'échelle paraissent faibles (Castel, 2005) [3] ;
- en revanche, il existe certainement des économies d'envergure considérables, qui justifient les opérations d'aménagement par îlot ou quartier (exemples français, les Zones d'Aménagement Concerté) ;
- le logement social draine une partie de la demande résidentielle ainsi qu'une partie de la capacité foncière et immobilière ; il influence la composition sociale locale et le marché immobilier privé ;
- dans le secteur privé, une partie du stock se constitue de manière informelle (bidonville) ou hors marché : division (par méiose) de lots dans l'habitat individuel.

Ces divers effets sont connus en économie du logement et en économie de la construction, mais peu ou pas considérés en économie urbaine, laquelle s'intéresse davantage à des aspects plus génériques (dans la théorie économique) :

- Les externalités et les interactions non marchandes : non seulement la forme urbaine facilite la fourniture de biens publics locaux, mais encore elle permet des interactions sociales variées, avec potentiellement des répercussions économiques. La ville est un milieu favorable à la diffusion des innovations (spilling) et à l'apprentissage des connaissances (learning).
- Les préférences pour la variété dans la consommation et la production. Quand un type de bien est disponible sous plusieurs formes, un consommateur qui peut fractionner sa consommation avec des coûts de transaction négligeables, peut retirer de l'utilité en variant les formes. De manière voisine, un producteur peut trouver des économies d'échelle dans la production conjointe de plusieurs types ou formes de biens, en un seul site plutôt qu'en plusieurs : de telles économies de production conjointe recouvrent largement les économies d'envergure.
- L'abondance et la variété des possibilités favorisent la qualité des appariements (matching), notamment entre firmes et salariés.
- Les indivisibilités et les effets d'échelle. Les indivisibilités peuvent concerner les personnes, les résidences, les établissements de production, les équipements et les facilités publiques. Elles permettent une spécialisation productive (notamment des individus). De plus, certains équipements ne sont justifiés économiquement qu'à partir d'une certaine taille. La coordination efficace de ressources spécialisées est facilitée par la proximité spatiale : une dimension plus grande et des localisations proches confèrent un avantage productif à une entreprise. De plus, les complémentarités verticales (« input-output linkages ») profitent aux entreprises spatialement proches.
- La proximité facilite des complémentarités offre-demande (input-output linkages). Le regroupement des consommateurs constitue un débouché important pour un producteur, ce qui facilite sa production et son implantation. Symétriquement, le regroupement des fournisseurs constitue une facilité d'approvisionnement, pour un consommateur, ce qui facilite sa consommation et son implantation.

La diversité des biens démultiplie ces effets. Le jeu conjoint des externalités présente une complexité foisonnante, ce qui rend ardues la modélisation et l'estimation économétrique de chacune d'elles. L'intégration dans un MUST est délicate, afin de ne pas négliger les effets concrets des externalités, sans pour autant les surestimer par une sur-spécification du modèle. En particulier, si le modèle détaille les firmes et les relations intersectorielles dans la production, alors la plupart des effets d'échelle et de variété devraient être intégrés dans les fonctions de production : auquel cas, il n'y a guère lieu de spécifier complémentairement une fonction de productivité globale.

### *Sur la régulation*

Le régulateur, en tant que pouvoir public, est responsable des dispositions à portée générale et des actions structurantes. Ses registres d'action forment une panoplie variée : l'information des acteurs, leur incitation notamment par la fiscalité et les allocations ; la réglementation, incluant les obligations et la structuration de marchés ; les interventions directes. Sur ce dernier volet, le régulateur gère les biens publics, en nature, qualité et accessibilité notamment dans l'espace. Il décide des équipements structurants : logement social, transport, équipements d'éducation ou de santé, implantation de services administratifs.

La structuration et l'encadrement de marché sont des registres d'action indirecte, à travers les acteurs et afin de profiter de l'initiative privée, de la réactivité et de la flexibilité des firmes :

- organiser un marché pour des opérations d'aménagement permet de mettre en compétition des promoteurs immobiliers et des aménageurs ;

- diverses règles d'urbanisme encadrent les opérations d'aménagement – occupation du sol, habitat, logement, urbanisme commercial, prévention des risques ;
- la fiscalité locale peut être modulée dans l'espace selon des objectifs d'ensemble.

Sur un territoire, l'action du régulateur est déterminante. Or, dans un MUST, on la spécifie non pas explicitement, mais de manière exogène, à travers les lois de comportement des acteurs offreurs et demandeurs, ainsi que dans la définition et les caractéristiques des options ouvertes à leurs décisions.

### *Bilan provisoire*

Cette partie a été consacrée à décrire le marché immobilier et l'équilibre urbain, ainsi que les acteurs qui y participent directement ou indirectement. Nous avons décrit le système urbain tel qu'il se manifeste concrètement, afin de discerner et de délimiter la représentation dans un MUST, son pouvoir d'expression. Les aspects concrets forment un long inventaire, dans la lignée de la géographie plus que de l'économie. La théorie économique s'empare progressivement des divers aspects, mais elle ne dispose pas encore de formes fonctionnelles spécifiques pour la plupart des aspects, ce qui compromet dangereusement l'estimation économétrique de chacun d'eux.

Dans ces conditions, l'incorporation dans un MUST des aspects avancés, en particulier des externalités dans la production économique, demeure une aventure hasardeuse. Il convient de privilégier la représentation fine, segmentée, des demandeurs d'établissement résidentiel, et la représentation fine des options à leur disposition – tout particulièrement les différents secteurs du logement pour les ménages, en marquant la place du logement social.

## Dynamiques territoriales

Un MUST est composé comme un jeu d'acteurs socio-économiques avec des comportements, selon des lois d'interaction. Les axiomes de liquidité, d'hyperfluidité et de stationnarité simplifient le traitement et induisent un modèle stationnaire. Afin de gagner en réalisme, des modèles dynamiques ont été développés pour intégrer le temps propre des acteurs dans leurs décisions, leur évolution de par leurs décisions ou en raison d'autres facteurs, ainsi que les évolutions d'ensemble du système territorial étudié, en interaction avec l'extérieur.

Dans cette partie, nous décrivons les temporalités à considérer et leur modélisation par des processus § 5.1. Puis nous replaçons dans une perspective dynamique l'offre immobilière et foncière § 5.2, les décisions structurantes en aménagement et en transport §5.3, les ménages § 5.4 et les firmes § 5.5.

### *Temporalités et processus de transition*

Un système territorial engage des acteurs et des interactions qui opèrent dans le temps, à court ou long terme. Les éléments immobiliers, bâtiments et infrastructures, sont très coûteux. Ils sont donc conçus solides et durables, pour une durée de vie technique de plusieurs décennies et même de quelques siècles ; leur durée de vie économique se compte généralement en décennies. Les ménages adaptent leur localisation résidentielle en quelques mois ou années : leurs individus évoluent par étape dans un cycle de vie limité à quelques générations. Les influences externes telles que le prix du crédit ou le prix de l'énergie peuvent varier rapidement mais présentent en général des cycles pluriannuels.

Ainsi, l'état du système territorial est soumis à diverses évolutions et ce à plusieurs échelles de temps. A moyen terme évoluent non seulement les conditions externes, mais encore la composition même du système, dont la structure se transforme.

Dans un MUST dynamique, les évolutions sont représentées par des processus de transition concernant les facteurs macroscopiques ou les éléments microscopiques. Les facteurs macroscopiques recouvrent les décisions structurantes dans la planification du système et les influences externes : on modélise leur évolution comme une séquence d'événements singuliers aux effets spécifiés et à une date d'occurrence programmée ; par exemple la mise en service d'un nouvel équipement, ou une variation du prix du crédit. Une telle séquence constitue un scénario d'évolution. En général, un scénario est spécifié de manière déterministe quant aux dates et au contenu des événements : il constitue alors un processus déterministe de transition. Mais rien n'empêche a priori de randomiser les événements, auquel cas le processus de transition devient stochastique. Dans une application prospective, plusieurs scénarios d'évolution sont considérés et simulés individuellement.

Pour les éléments microscopiques que sont les ménages, les firmes, ou les offreurs

immobiliers ou fonciers, les évolutions sont modélisées comme des processus aléatoires de transition : chaque élément, selon sa catégorie, est exposé à des événements perturbateurs dont l'occurrence est aléatoire. Par période, chaque type d'événement survient avec une certaine probabilité dans la catégorie d'éléments : la probabilité est spécifiée à partir d'une connaissance historique du système. Ainsi, le modèle d'évolution est de nature agrégée : il mélange les conditions particulières au sein d'une catégorie, que ces conditions soient d'ordre économique ou spatial.

### *Offre immobilière et foncière*

L'offre immobilière et foncière subit des évolutions de diverses natures et dont la portée est variable. Si les décisions structurantes d'aménagement ont une portée macroscopique sur la surface bâtie et son affectation fonctionnelle dans une zone, la grande majorité des évolutions ont une portée microscopique, restreinte à un ou quelques établissements résidentiels. Il peut s'agir :

- de la construction, destruction ou réhabilitation d'un bien immobilier, ou d'une reconfiguration entre biens contigus ;
- d'une mutation dans l'affectation fonctionnelle – transformation d'un logement en local professionnel et vice versa, ou transition entre secteurs locatifs privé ou social ;
- d'une mutation dans la propriété du bien ou dans son mode d'utilisation pour une occupation à court ou long terme ;
- d'une mutation dans l'occupation du bien, un état particulier étant la vacance d'occupation.

Les évolutions microscopiques surviennent à des termes temporels variés : quelques mois ou quelques années pour une mutation d'occupation, quelques années pour une mutation de propriété ou d'affectation fonctionnelle. Elles résultent de facteurs tels que :

- les politiques d'aménagement et d'urbanisme, pour la génération des lots, leur destination fonctionnelle, leur taux d'occupation ;
- la capacité productive des entreprises de construction pour le développement immobilier ; similairement, le dynamisme des investisseurs ;
- la démographie des propriétaires des lots d'une part, des occupants de l'autre (le décès de propriétaires-occupants en particulier libère des logements) ;
- les décisions économiques des propriétaires : leurs arbitrages patrimoniaux entre des types de placement immobilier, foncier ou financier, sur la base des conditions économiques générales telles que le prix et la fiscalité du capital, mais aussi des conditions économiques locales qui peuvent notamment stimuler la reconfiguration des lots.

La modélisation de ces évolutions est en général centrée sur les biens, les lots : la création ou la destruction de biens immobiliers dans un lot foncier (et ce sous l'influence des conditions économiques prévalentes si le marché foncier est modélisé), et aussi les transitions d'occupation, à destination fonctionnelle constante. Les mutations par reconfiguration ou réaffectation fonctionnelle sont peu ou pas représentées. Echappent encore aux MUST appliqués :

- les stratégies patrimoniales des propriétaires, individuels ou firmes d'investissement, et leur perception respective des potentialités et des risques futurs ;
- les évolutions technologiques dans la nature des lots : ainsi la réhabilitation énergétique réduit les consommations au prix d'un investissement de construction et d'équipement, ce qui transforme la structure des dépenses de l'occupant (entre loyer et charges) et par suite la structure intersectorielle de l'économie productive (entre production d'énergie et construction-rénovation).

De tels prolongements ont un enjeu évident pour l'adaptation d'un territoire à la préservation des ressources. Ils pourraient être investigués par un modèle spécifique : un modèle démographique du parc immobilier.

### *Quelle dynamique des décisions structurantes ?*

Une décision est structurante si elle exerce des conséquences importantes sur le système territorial. Certaines conditions d'environnement notamment économique (ex. prix du crédit, de l'énergie) ou social (fiscalité, redistribution) peuvent aussi influencer en profondeur l'état du système, mais elles ne relèvent pas d'un décideur territorial et on les attribue à un contexte général, décrit dans un scénario d'environnement.

Les décisions structurantes concernent l'usage du sol en termes notamment de localisation des équipements, et le transport. Un grand établissement d'entreprise doit être considéré comme un équipement localisé pour l'activité productive, pour l'emploi et donc pour les revenus. Certains équipements, pour la santé et l'éducation notamment, sont localisés nécessairement à l'intérieur du territoire. Il en va de même pour une infrastructure de

transport. Mais un grand nombre de firmes peuvent se relocaliser dedans ou en dehors.
A priori, une grande implantation a des conséquences importantes en particulier pour l'acteur qui la décide, et sa décision relève d'une temporalité lente, à moyen ou long terme. En général, le système de transport est géré dans une perspective identique. Cependant, les tarifs et la qualité de service pourraient être modifiés rapidement.

Dans un MUST, les décisions structurantes sont représentées comme une séquence d'événements dûment identifiés et programmés dans le temps, constituant un processus déterministe de transition. Il est prudent de traiter une telle séquence comme un scénario particulier parmi plusieurs. Un tel traitement est exogène au modèle. Les décisions structurantes ne sont pas endogènes, les comportements des grands décideurs ne réagissent pas à l'état courant du système. En particulier, l'offre de services de transport n'est pas élastique à leur demande. Pourtant, même si le développement des infrastructures se programme à long terme, les capacités et fréquences de services en transport collectif sont susceptibles d'évoluer à court et moyen terme.

### *Démographie et sociologie des ménages*

Un ménage se compose d'une ou plusieurs personnes qui occupent un même logement. La composition détermine un besoin immobilier en surface, en nombre de pièces pour l'intimité individuelle et le confort. Les événements déterminants dans la composition du ménage peuvent se répercuter dans les décisions immobilières à prendre en tant que demandeur :

- Les événements de transition dans le cycle de vie, par formation ou séparation de couple, arrivée ou départ d'enfant, décès.
- Les transitions à caractère professionnel : entrée ou sortie de l'âge actif, entrée ou sortie de l'occupation professionnelle, mutation volontaire ou forcée. Un changement d'emploi se répercute sur le revenu, sur le lieu d'activité et donc le coût de transport.
- Le ménage est une entité économique qui gère un patrimoine ; la possession de la résidence principale est une composante importante et, pour y parvenir, un ménage peut souhaiter se relocaliser.
- Sur un mode passif et non actif, un ménage locataire peut subir une non-reconduction de bail.
- Enfin, le ménage peut décider de changer de résidence pour des raisons économiques ou idiosyncratiques, en choisissant une qualité de local, un type d'habitat, une qualité de voisinage et de quartier…

Ainsi, les sources d'évolution sont externes ou internes au ménage. Les mutations entre le territoire et l'extérieur sont importantes car une immigration induit une demande supplémentaire tandis qu'une émigration libère un local – si l'émigrant en disposait. La demande des ménages, rapportée à l'offre de logements, met le marché immobilier sous pression : un marché tendu risque de réfréner les transitions résidentielles, avec à la clef l'accumulation d'un stock de demande latente, non satisfaite, qui développe ses ancrages sociaux en un lien éventuellement inadapté à ses désirs ou à ses possibilités économiques. La temporalité d'une relocalisation rési-dentielle est au minimum de quelques mois, plus souvent de quelques années.

Dans un MUST dynamique, on représente les évolutions résidentielles des ménages comme des transitions survenant aléatoirement, en fonction surtout des transitions démographiques et des désirs idiosyncratiques. Les conséquences des évolutions professionnelles ne semblent pas tirées, même si rien ne s'y oppose dans le principe. Les terminaisons de bail à l'initiative du bailleur ne semblent pas non plus représentées.

Au total, la composition démographique et sociale est déterminante dans la demande immobilière des ménages, et un MUST peut capturer une grande part de cette détermination en l'endogénéisant. Il est plus difficile, voire impraticable, de représenter l'évolution des préférences résidentielles par catégorie démographique et sociale de ménages, d'anticiper une évolution purement démographique telle que l'allongement de la durée de vie – qui pourtant se répercute sur le nombre de ménages et sur l'occupation des logements, particulièrement les logements plus grands si la personne âgée n'a pas réduit son lot. En revanche, une évolution sociale, telle que la réduction de la taille moyenne des ménages en nombre d'individus, peut découler directement de la composition de la population en catégories démographiques.

### *Firmographie*

La firmographie est la description de la composition et de l'évolution des firmes, au même titre que la démographie pour les personnes et les ménages, et au moyen d'instruments statistiques analogues, même si les régularités sont spécifiques. La firmographie pour un territoire donné concerne l'établissement

des firmes dans ce territoire ou en dehors, ainsi que les évolutions d'activité, en nature et volume, en nombre et en qualité des emplois.

A ces sujets les transitions ont pour causes :

- une stratégie globale de firme (sur un secteur basique de production la firme tend à choisir le territoire d'implantation le plus favorable, *cf.* le modèle de Weber) ;
- une variation des conditions locales d'implantation, à l'intérieur du territoire, par la disposition d'une nouvelle offre immobilière, la variation des loyers ou des coûts de transport ;
- une variation dans la demande spécifique à la firme ou dans ses facteurs de production qui, ultimement, peut relever d'une condition externe ou d'une évolution purement démographique.

Ces causes et leurs processus d'effet sont complexes. Or, dans un MUST, la représentation de l'économie productive a pour objectif principal d'obtenir un nombre d'emplois par nature d'activité et par zone. C'est pourquoi on modélise surtout un volume d'activité par nature et par zone d'implantation (cf. un modèle d'individu représentatif). Une quantité d'activité est spécifiée soit directement en nombre d'emplois, soit en volume d'affaire et selon une structure de production, avec, à la clef, un nombre d'emplois. Ce second traitement permet d'endogénéiser la quantité d'activité sectorielle, en correspondance avec l'état d'activité dans l'ensemble des secteurs économiques. La structure d'ensemble donne en plus un cadre de cohérence : souhaitable certes, mais nécessairement agrégé par secteur d'activité. Pour intégrer la taille d'établissement, un raffinement est de traiter exhaustivement la population des firmes et de leurs établissements, par micro-simulation. Il importe à cet égard de bien distinguer la nature d'activité et la forme d'entreprise, d'administration ou d'association.

La principale limite conceptuelle tient à la spécification des causes d'évolution. Dans l'application d'un modèle input-output, ce sont la consommation finale des résidents et la demande à l'exportation qui tirent les consommations intermédiaires et donc l'activité générale. Cette logique est déjà discutable dans un cadre national ou continental, elle l'est encore davantage à l'échelle d'un territoire régional pour lequel les interactions externes sont relativement bien plus importantes. Ainsi, la spécification des ressorts d'évolution reste un pari sur l'avenir qui engage le planificateur.

### *Bilan du caractère dynamique*

En incorporant la temporalité des phénomènes, un modèle dynamique approfondit la sensibilité d'un MUST statique. Il s'agit de saisir l'histoire du système, de donner toute sa place et toute son envergure à la notion de trajectoire d'évolution. De plus, certains phénomènes sont plus faciles à intégrer dans un modèle dynamique : la portée expressive est plus large que pour un modèle statique.

Dans toute application particulière, le modélisateur est confronté à la complexité inhérente d'un système territorial concret : dans une perspective gestionnaire, un tel système requiert d'autant plus un modèle de simulation que sa complexité est plus forte ! En pratique, pour développer un MUST, il faut disposer d'une connaissance suffisante des divers aspects sectoriels à partir d'observations et d'enquêtes mais aussi de l'expertise sectorielle détenue par des spécialistes expérimentés. Le dire d'experts est précieux pour retracer la trajectoire d'évolution du territoire et pour esquisser des tendances d'évolution.

Pour gérer la complexité d'une application, une solution robuste est de la décomposer : développer d'abord des modèles sectoriels en vue de leur intégration ; opérer ensuite l'intégration en deux phases (un MUST statique d'abord pour saisir les principaux éléments de cohérence entre les secteurs, puis un MUST dynamique pour approfondir).

Enfin, la variété des aspects ne doit pas distraire le modélisateur des enjeux essentiels pour la gestion d'un territoire : le modèle doit être sensible aux influences externes (particulièrement les migrations des ménages et des firmes) et aux aspects sociaux parmi la population résidente (particulièrement la répartition des revenus et la variété des positions patrimoniales).

## Conclusion

Nous avons mis en évidence la variété des aspects, des éléments et des relations qui composent un système territorial et qu'un MUST est susceptible de refléter. Cette variété est source d'une complexité systémique au plan pragmatique, et d'une complexité sémantique

au plan scientifique. Tant par son objet que par sa posture qui donne priorité à la description de l'espace, des acteurs et de l'histoire, la science géographique constitue le premier des deux piliers des MUST. Le second pilier est la science économique qui propose des causalités et des formes spécifiques : les comportements microéconomiques par type d'agent présentent des régularités propices à un modèle générique ; similairement, les formes d'organisation et spécialement les marchés économiques présentent des régularités structurelles. Les deux sciences s'enrichissent mutuellement, par les causalités économiques dans l'analyse géographique qui, réciproquement, délimite en amont et en aval la portée de l'analyse économique : limites amont par une certaine dénaturation par l'espace des hypothèses microéconomiques (*cf.* mésagrégation, incohérence budgétaire, mis-polarisation), limites aval par les diverses externalités et les causes ultimes d'évolution de l'activité économique.

Pour un acteur responsable de décisions dans un système territorial, l'utilité primordiale d'un MUST est de constituer un cadre d'analyse pour repérer des éléments et des processus, pour comprendre des interactions, pour discerner la portée propre d'une intervention spécifique. Cela vaut en particulier pour l'action publique, dont la portée est limitée par la capacité réactive des agents dans le système : tout spécialement le « vote avec les pieds », *i.e.* la décision de localisation résidentielle.

En ce qui concerne les applications quantitatives, on constate au plan international une disparité entre les pays anglo-saxons mais aussi latino-américains et extrême-orientaux, où des MUST sont appliqués pour la plupart des grandes métropoles et parfois à des échelles territoriales plus larges, et d'autres pays dont la France, où les rares applications restent des expérimentations portées par des laboratoires de recherche. Le retard français a pour racines, non pas le manque de données car l'appareil statistique est satisfaisant dans l'ensemble (l'accès aux données est une autre affaire), mais plus vraisemblablement une carence de formation scientifique en économie spatiale et une carence dans la formation gestionnaire, à savoir une réticence envers la modélisation. Peut-on espérer une transformation progressive ? Il y a des signes encourageants : des collectivités territoriales et autres autorités organisatrices mettent en place des baromètres pour rendre compte de tel sous-système sectoriel ; les outils de planification, traditionnellement sectoriels tels que les Plans Locaux d'Urbanisme (PLU), les Plans Locaux d'Habitat (PLH) et les Plans de Déplacements Urbains (PDU) sont en voie d'intégration avec la démarche du PLU tri-corps qui fédère les trois secteurs. En matière de transport, les outils de simulation ont été davantage appliqués et parfois rendus multimodaux au cours de la dernière décennie. De plus, des services d'information se diffusent rapidement, non seulement pour renseigner les usagers sur les conditions d'un déplacement, mais aussi pour renseigner sur la valeur d'un bien immobilier selon ses caractéristiques propres et son contexte territorial. Or ces services reposent sur des modèles : il reste à espérer que les maîtres d'ouvrage territoriaux investissent à leur tour dans la modélisation qui concerne leur système, afin de concevoir et de prospecter les décisions structurantes.

L'enjeu de la Ville Durable, *i.e.* de convertir les villes à une parcimonie dans l'usage des ressources et dans l'émission de rejets (particulièrement les Gaz à Effet de Serre), donne une motivation supplémentaire pour une planification raisonnée des territoires, et ce dans un cadre temporel étendu à très long terme, au-delà du siècle !

## Bibliographie


[1] Alonso W.
Location and land use. Towards a general theory of land rent
*Harvard University Press*

[2] Burgess E., Park R.E., McKenzie R.D.
The City : Suggestions for the Study of Human Nature in the Urban Environment
*University of Chicago Press, Chicago*

[3] Castel J.C.
Le marché favorise t-il la densification ? Peut-il produire de l'habitat alternatif à la maison individuelle ?
*Colloque ADEF du 14-10-2005*

[4] Cavailhès J.
Le coût du logement selon sa localisation
*Informations sociales, 155:38-46*

[5] Certu, 2003
Guide de la modélisation des déplacements de voyageurs en milieu urbain
*Certu, Lyon*

[6] Christaller W.
Die zentralen Orte in Süddeutschland. Gustav Fischer, Iena
*Translated (in part), by CW Baskin, as Central Places in Southern Germany. Prentice Hall, 1966*

[7] De la Barra T.
Integrated Land Use and Transport Modelling : Decision Chains and Hierarchies
*Cambridge University Press, 2005*

[8] D.S.C. and M.E.P.L, 1999
Review of Land - use/transport interaction model London
*Department of the environment, transport and the regions : London*

[9] Dupuit J.
De la mesure de l'utilité des travaux publics
*Annales des ponts et chaussées, 2nde série, Vol. 8*

[10] Friggit J.
Le prix des logements en 2004 : quelques anormalités historiques
*Urbanissimo*

[11] Fujita M.
Urban Economic Theory : Land Use and City Size
*Cambridge University Press*

[12] Fujita M., Krugman P., Venables A.
The Spatial Economy : Cities, Regions, and International Trade
*The MIT Press*

[13] Fujita M., Thisse J.F. .
Economics of Agglomeration ; Cities, Industrial Location and Regional Growth
*Cambridge University Press, Cambridge*

[14] Hoyt, H.
The Structure and Growth of Residential Neighbourhoods in American Cities
*Washington, Federal Housing Administration*

[15] Launhardt W.
Die Bestimmung des Zweckmässigsten Standortes einer Gewerblichen Anlage
*Zeitschrift des Vereines Deutscher Ingenieure*

[16] Leurent F.
Road System Economics
*Introductory Report of Technical Committee 1.1 at the World Road Congress, Paris*

[17] Lösch A.
Die räumliche Ordnung der Wirtschaft
*Fischer, Iena*

[18] Lowry I.S.
A Model of Metropolis
*RAND Memorandum 4025-RC*

[19] Marshall A.
Principles of Economics
*Macmillan and Co, London*
[20] Mills E.
An Aggregate Model of Resource Allocation in a Metropolitan Area
*American Economic Review, 57:197-211*
[21] Muth R.F.
Cities and Housing, the Spatial Pattern of Urban Residential Land Use
*University of Chicago Press*
[22] Ortuzar J., de Dios, Willumsen L.
Modeling Transport
*Wiley and Sons*
[23] Pred A.R.
Spatial dynamics of U.S. urban-industrial growth, 1800-1914 ; interpretive and theoretical essays
*The MIT Press*
[24] Ricardo D.
On The Principles of Political Economy and Taxation
*John Murray, London*
[25] Ullman E.L., Harris C.D.
The Nature of Cities
*Annals of the American Academy of Political and Social Science, 242:7-17*
[26] Von Thünen J.H.
Der Isolierte Staat in Beziehung auf Landschaft und Nationalökonomie
*Translation by C.M. Wartenberg (1966) Von Thünen's Isolated State. Oxford : Pergamon Press*
[27] Voorhees A.M.
A general theory of traffic movement
*In Proceedings of the Institute of Traffic Engineers Annual Meeting. New Haven CT, 46-56*
[28] Weber A.
Theory of the Location of Industries

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

Valéry Masson - Météo-France
Vincent Viguié – Centre International de Recherche sur l'Environnement et le Développement
Kamel Zibouche – Centre Scientifique et Technique du Bâtiment
Luc Adolphe – Laboratoire de Recherche en Architecture, ENSA Toulouse
Nathalie Long – Littoral Environnement et Sociétés
Laurence Nolorgues – Institut d'Aménagement et d'Urbanisme

**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 socio-économique 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 $CO_2$. 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, *e.g.* les changements démographiques, socio-

économiques, culturels, politiques et technologiques. Le projet MUSCADE (Modélisation Urbaine et Stratégie d'adaptation au Changement climatique pour Anticiper la 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, 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. En revanche, 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 qu'elles sont en passe de survenir à moyen terme (*e.g.* 2050).

**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

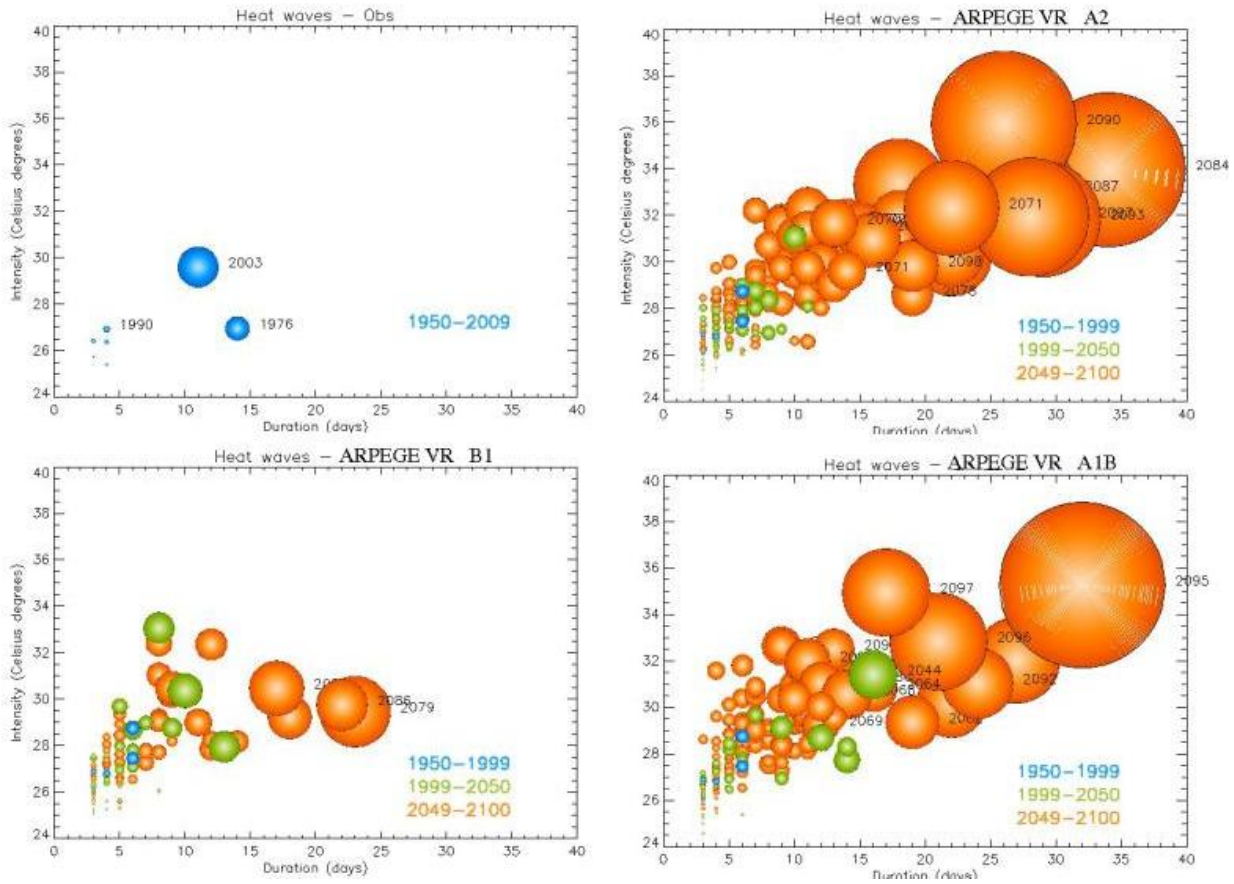
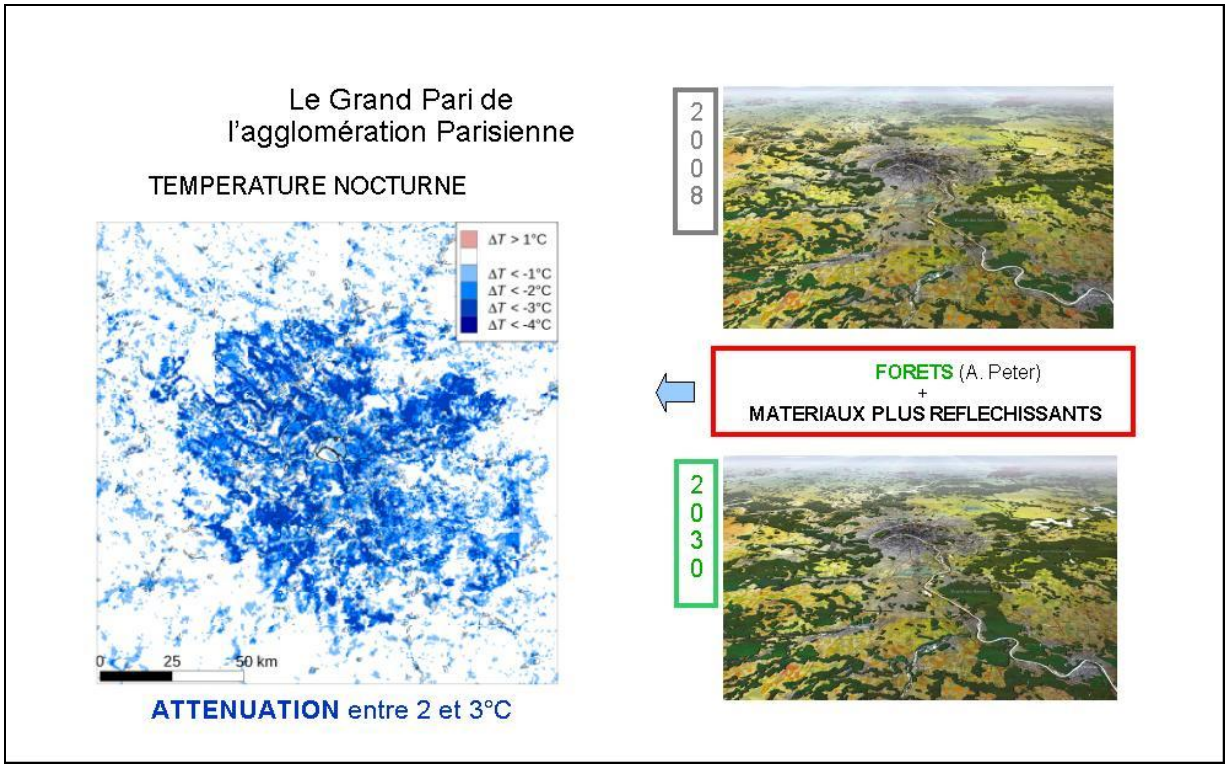


**Figure 2 :** Impact des scénarios d'extension de forêts, agriculture de proximité et matériaux réfléchissants sur l'îlot de chaleur sur Paris (résultats du groupe Descartes)




## 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 $CO_2$. 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.

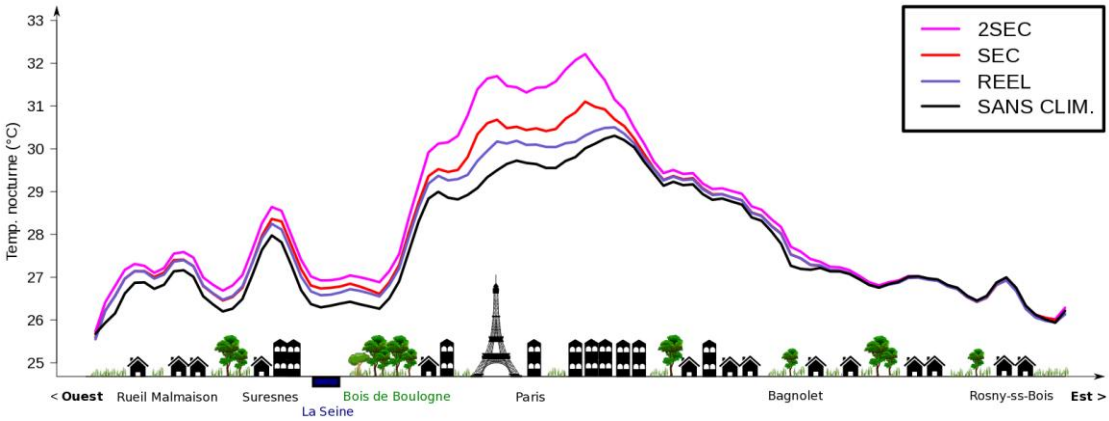
Les impacts des différents systèmes de refroidissement sur le microclimat de Paris ont été étudiés dans le projet de recherche CLIM2, réalisé par le Laboratoire de Génie des Procédés pour l'Energie, l'Environnement et la Santé (CNAM), le Groupe d'Etudes de l'Atmosphère Météorologique (CNRS Météo France), 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 de 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)




SEC : puissance actuelle de climatisation en n'utilisant que des dispositifs individuels
2 SEC : puissance actuelle de climatisation doublée

## 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 secteur par secteur.

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 de qualité d'usage de la ville dans le futur ?

Toutes ces questions ne peuvent être appréhendées par seulement quelques disciplines proches. C'est la nature même de la ville d'être multisectorielle. 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 cruciales, 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. Celles-ci dépendent 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.

**1ère 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) ;
- en revanche, elle n'est valide qu'à des horizons de 10 à 20 ans ;
- elle ne tient pas compte des changements technologiques, économiques, mondiaux.

**2ème 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] Viguié 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.

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'Institut d'Aménagement et d'Urbanisme (IAU), permettant un suivi temporel de 1982 à 2008.

**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)

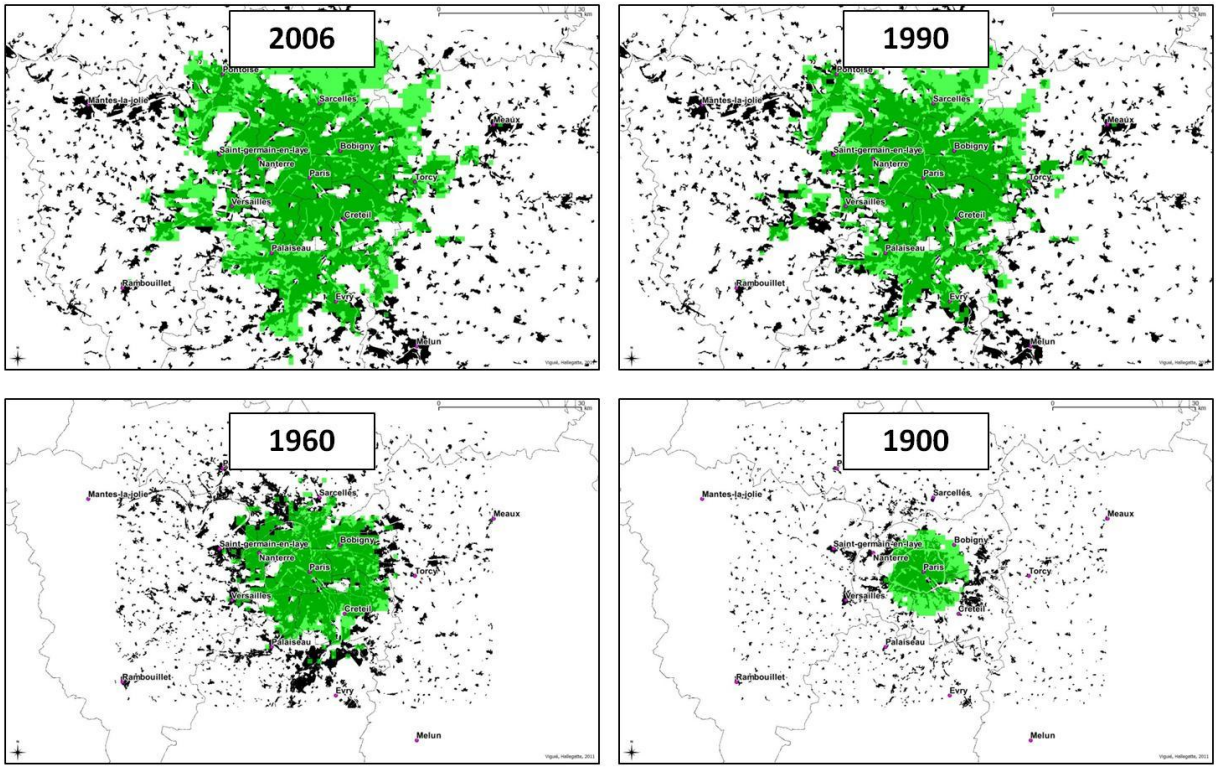
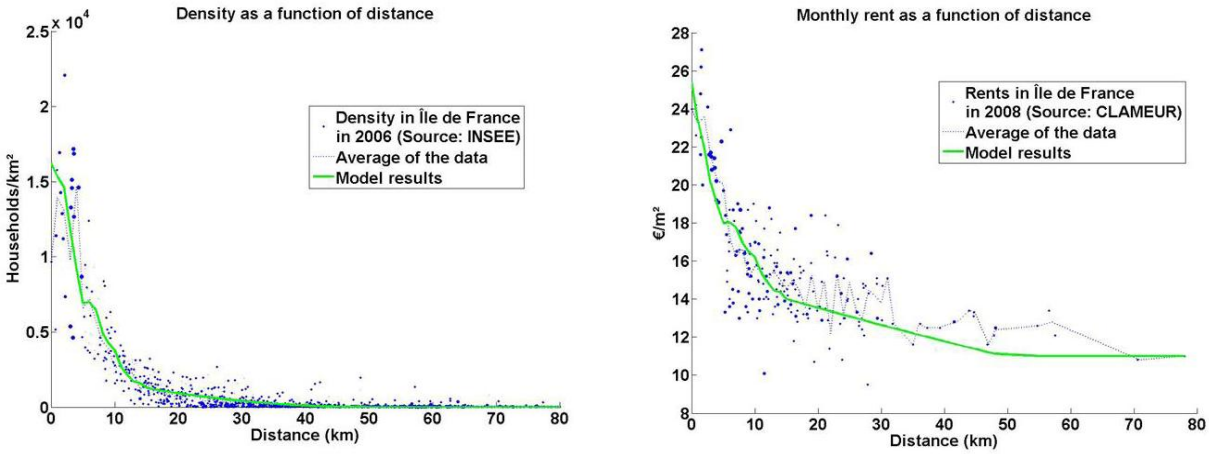



**Figure 5 :** Validation des données socio-économiques produites par le modèle (en vert, à gauche : loyers ; à droite : densité de population), en fonction de la distance au centre de Paris. Chaque point représente la donnée réelle pour chaque commune ou arrondissement**.**



## 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 « subis », 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 « subis », 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 »*

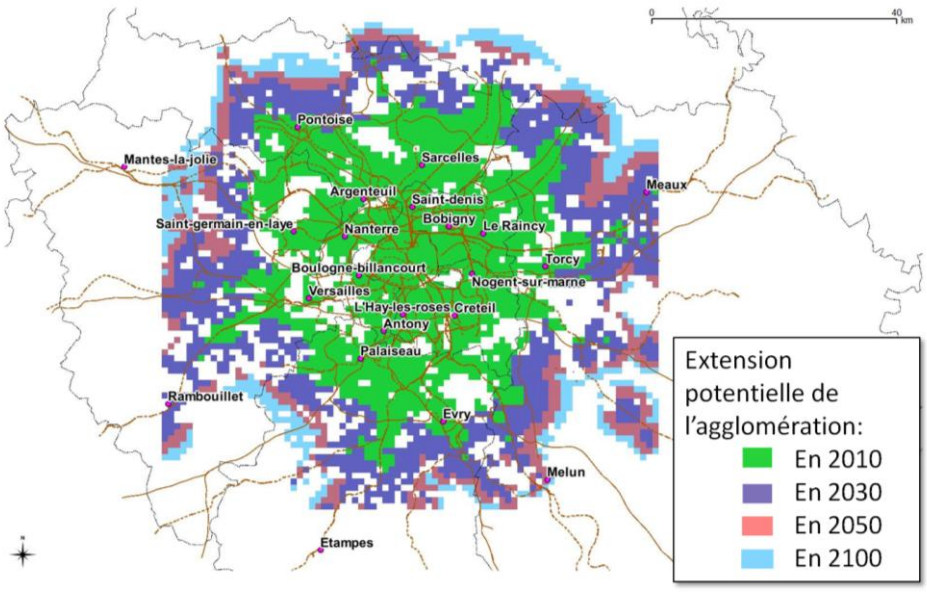
Dans ce scénario, on impose une présence de parcs plus importante dans l'agglomération qui ont, entre autres, vocation à améliorer le confort dans la ville. Pour ce faire, on suppose que 10 % de la surface urbaine est réservée à de la végétation, sans autre contrainte. L'expansion de cette « ville verte », 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), 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 3 m² 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 potentiel de 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 ACCLIMAT[1].

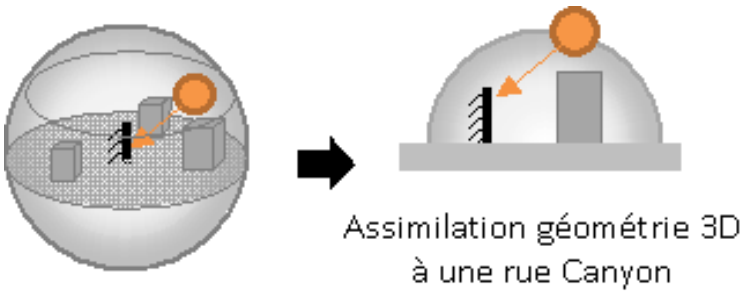
La stratégie retenue est de construire des scénarios systémiques contrastés, à partir de scénarios dans les grands thèmes :

- 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.

- **L'échelle du bâtiment**. La façon de construire un bâtiment et son usage vont fortement influer 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. 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



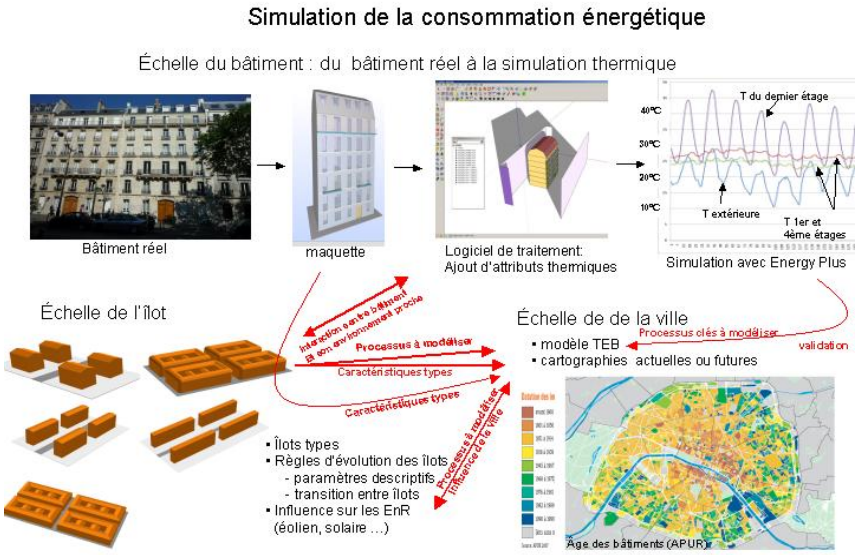

La Figure 8 présente la stratégie retenue pour aborder les interactions entre ces échelles. Les simulations à l'échelle de la ville seront réalisées avec le modèle TEB d'échanges d'énergie entre ville et atmosphère. Pour cela, des études détaillées à chaque échelle seront réalisées avec des modèles dédiés. 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

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

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 (*e.g.* 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'aména-gement 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., Sugar L., Gomez C. L. T.
Cities and Greenhouse Gas Emissions: Moving Forward, Environment and Urbanization
*Online early publication*

[2] Hallegatte S., Corfee-Morlot J.
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 *al.*
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., Hallegatte S.
Les villes aujourd'hui, quelle vulnérabilité au changement climatique ?
*2010, dans « Villes et adaptation au changement climatique ». Rapport de L'Onerc*

[6] Viguié V., Hallegatte S.
The impact of a carbon tax on Paris metropolitan area and its population
*2011, soumis à Environmental and Ressource Economics*

[7] Viguié V., Hallegatte S.
Scenarios for Paris development in the XXIst century: a prospective exercise on the impact of a carbon tax
*2012, en préparation*

**Deuxième partie**

# Modèles urbains et applications

# - A -

## Transport et mobilité

# Les régularités de la mobilité quotidienne : le cas des résidents Franciliens d'après l'EGT 2001-2002

Fabien Leurent, Mahdi Samadzad
Université Paris-Est, Laboratoire Ville Mobilité Transport

**La mobilité quotidienne des personnes dans une agglomération présente des régularités. Sur la base d'une enquête de déplacement auprès des ménages franciliens, nous montrons que le nombre de boucles d'activités et de déplacements, par personne et par jour, est remarquablement stable selon le genre, la tranche d'âge, la catégorie socioprofessionnelle et le secteur de résidence. Les motifs contraints d'activité dominent la mobilité, en proportion des boucles, en temps passé et en distance parcourue. Le choix du mode de transport permet aux habitants de limiter leur temps de déplacement. Ces constats induisent des conséquences pour les modèles de planification des réseaux de transport.**

## Introduction

Pour simuler avec réalisme les déplacements dans une agglomération, il faut modéliser les situations et les comportements de mobilité, en liaison avec la localisation des activités et les services de transport disponibles localement. Il existe deux grandes familles de modèles, l'une qui traite les déplacements, et l'autre les « boucles d'activités et de déplacements ». Les premiers, plus anciens, reposent notamment sur des « invariants » de mobilité : le nombre moyen de déplacements par personne et par jour, ainsi que le temps journalier passé en transport, avec des valeurs respectives de 3,5 et 85' pour l'Île de France.

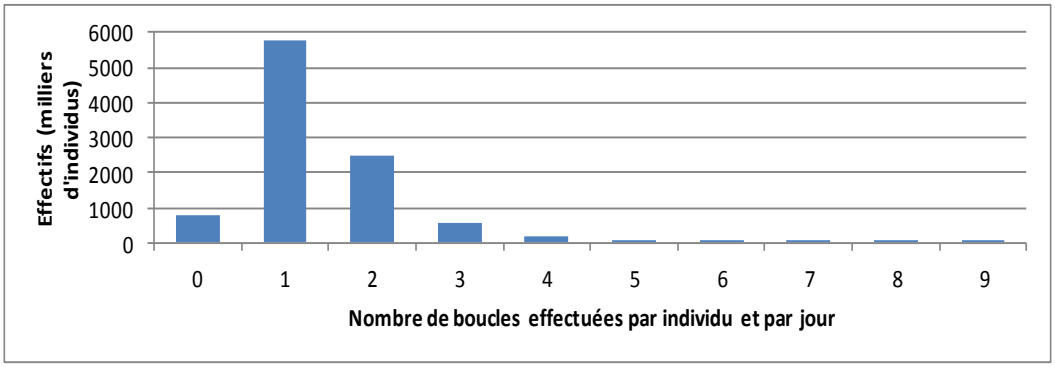
Nous avons investigué ces invariants selon quatre axes de désagrégation des individus ; le genre, la tranche d'âge, la catégorie socio-professionnelle (CSP) et le secteur de résidence ; et montré que le nombre de boucles par personne et par jour est bien plus stable. De plus nous tirons quelques conséquences agrégées qu'un modèle devrait reproduire. Notre propos concerne les ménages franciliens, à partir de l'Enquête Globale de Transport (EGT) réalisée en 2001-2002 [1,2].

## Motivation et organisation de la mobilité

Les activités individuelles ont pour principaux motifs, en dehors du domicile, le Travail, l'Etude, les Affaires professionnelles, les Achats, les Affaires personnelles (démarche administrative, santé) et les Loisirs (incluant les visites aux personnes). Une boucle d'activités et de déplacements enchaîne, à partir d'un lieu d'ancrage (majoritairement le domicile), une ou plusieurs activités dans des lieux de destination. Le programme journalier d'un individu comprend 0, 1 ou plusieurs boucles.

Le nombre quotidien de déplacements varie sensiblement parmi les individus (M=3,45, S=2,20) alors que le nombre quotidien de boucles est très concentré (M=1,37, S=0,85), avec une régularité aussi dans le nombre d'activités par boucles (M=2,46, S=1,01). Les femmes réalisent un peu plus de déplacements et de boucles que les hommes, en raison notamment des courses et de l'accompagnement des enfants. Les tranches d'âge les plus mobiles coïncident avec l'activité professionnelle, entre 25 et 55 ans. Par CSP, les professions supérieures et intermédiaires sont plus mobiles en déplacements mais presque pas en boucles, en raison d'un chaînage accru. Par secteur de résidence, selon le secteur de résidence distingué par l'Institut d'Aménagement et d'Urbanisme d'Île de France – IAU-IDF (notamment la distance au centre de l'agglomération), un degré plus fort d'urbanisation est associé à un peu plus de boucles.

**Figure 1 :** Nombre de déplacements et de boucles par individu et par jour



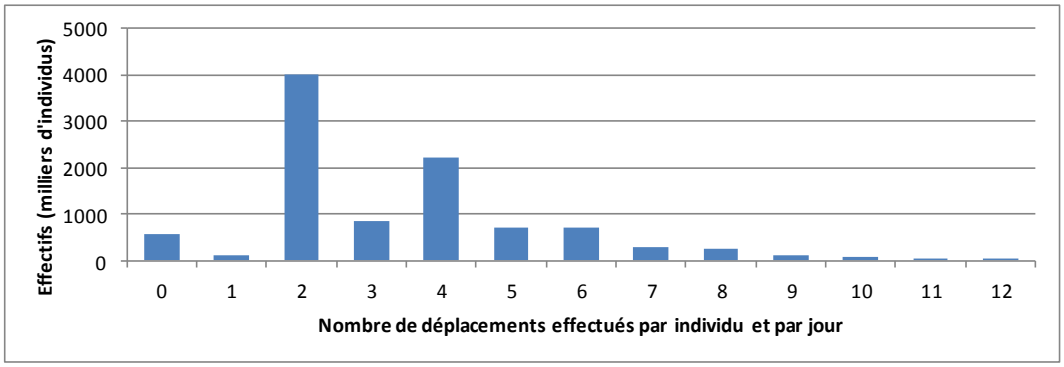




**Tableau 1 :** Influences (a) de la catégorie socio-professionnelle CSP, (b) du secteur de résidence

| CSP | Nb Déplacements/jr | Nb Boucles/jr |
|---|---|---|
| Agriculteurs | 3,87 | 1,59 |
| Artisans … | 3,82 | 1,33 |
| Cadres / Prof. Libre. | 3,70 | 1,28 |
| Prof. Intermédiaires | 3,81 | 1,37 |
| Employés | 3,60 | 1,37 |
| Ouvriers | 3,63 | 1,38 |
| Scolaires | 3,20 | 1,39 |
| Retraités | 2,93 | 1,25 |
| Inactifs | 3,68 | 1,55 |

| Secteur de résidence | Nb Déplacements/jr | Nb Boucles/jr |
|---|---|---|
| Paris | 3,61 | 1,36 |
| Banlieue Intérieure | 3,40 | 1,36 |
| Banlieue extérieure | 3,39 | 1,36 |
| Franges de l'Agglo. | 3,58 | 1,42 |
| Villes Nouvelles | 3,53 | 1,41 |
| Agglo. Axes Vallées | 3,45 | 1,38 |
| Agglo. Isolées | 3,32 | 1,36 |
| Communes rurales | 3,11 | 1,24 |
| **TOTAL** | **3,45** | **1,37** |

Surtout, l'organisation des boucles révèle la subordination des activités aux motifs les plus contraints : le travail et l'étude, qui déterminent des boucles dans lesquelles les activités « secondaires » sont insérées « en chemin ».

## Conditions temporelles, spatiales, modales

Le temps investi quotidiennement hors du domicile dans des activités et des déplacements est important : de 6 à 7 heures en moyenne, depuis les retraités jusqu'aux professions supérieures. Le secteur de résidence influence faiblement les budgets temporels mais fortement les distances parcourues grâce à l'utilisation des modes de transport motorisés et notamment l'automobile.

**Tableau 2 :** Motifs et modalités des boucles d'activités

| Motif | Part des déplacements | Part des boucles | Temps en activité (min) | Temps en déplacement (min) | Distances parcourues (Km) |
|---|---|---|---|---|---|
| Travail | 24,5 % | 29,3 % | 471 | 79,7 | 20,7 |
| Affaires Pro. | 12,8 % | 2,7 % | 301 | 98,7 | 24,8 |
| Achats | 5,3 % | 14,7 % | 65 | 34,2 | 5,3 |
| Affaires Perso. | 16,6 % | 16,2 % | 91 | 47,5 | 8,1 |
| Etudes | 7,8 % | 18,2 % | 359 | 46,0 | 6,4 |
| Accompagnement | 15,7 % | 5,7 % | 38 | 31,2 | 6,1 |
| Visites | 6,4 % | 4,3 % | 191 | 54,8 | 13,1 |
| Loisirs … | 11,1 % | 8,1 % | 106 | 46,2 | 5,8 |

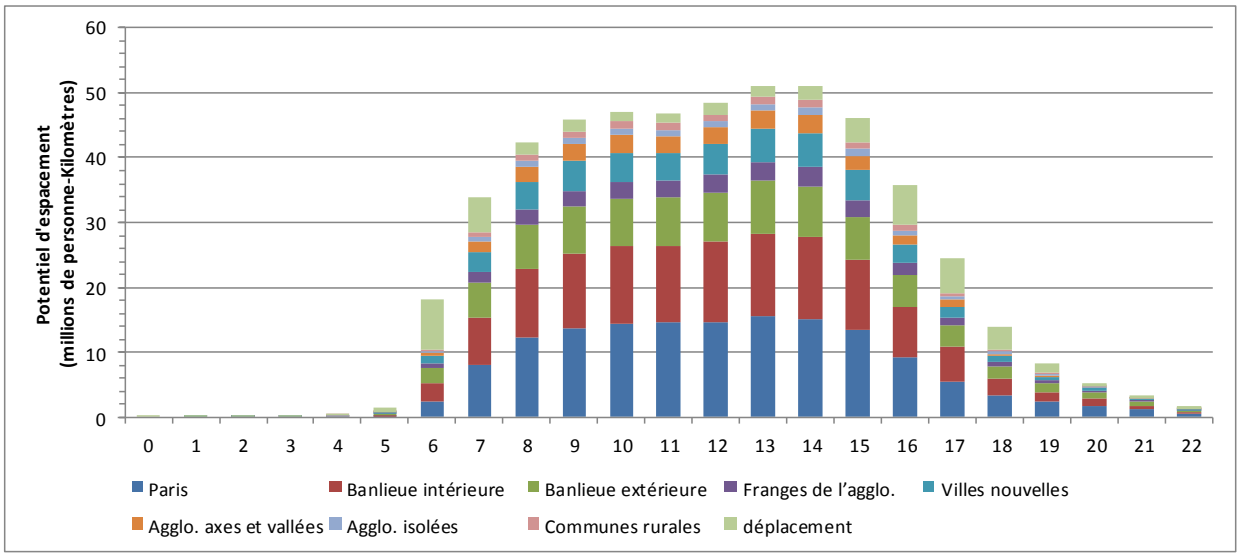
**Tableau 3 :** Budgets journaliers en temps et distance selon (a) la CSP, (b) le secteur de résidence

| CSP | Temps passé (min) | | Distance parcourue (Km) | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | Act. | Dépl. | Total | VP | TC |
| Agriculteurs | 464 | 84,9 | 26,3 | 14,2 | 11,8 |
| Artisans … | 482 | 95,4 | 24,9 | 22,0 | 2,5 |
| Cadres, Prof. Lib. | 545 | 102,2 | 25,9 | 16,9 | 8,5 |
| Prof. Interm. | 498 | 101,4 | 26,5 | 17,0 | 8,9 |
| Employés | 446 | 91,8 | 20,1 | 10,0 | 9,4 |
| Ouvriers | 471 | 107,5 | 27,2 | 19,0 | 7,7 |
| Scolaires | 452 | 65,0 | 9,7 | 3,2 | 5,6 |
| Retraités | 140 | 68,2 | 10,7 | 7,6 | 2,2 |
| Inactifs | 168 | 76,2 | 11,6 | 7,0 | 3,5 |

| Secteur IAU | Temps passé (min) | | Distance parcourue (Km) | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | Act. | Dépl. | Total | VP | TC |
| Paris | 401 | 82,7 | 11,1 | 4,0 | 6,0 |
| Banlieue Intérieure | 389 | 84,4 | 13,3 | 7,1 | 5,4 |
| Banlieue Extérieure | 389 | 84,3 | 17,0 | 10,4 | 5,8 |
| Franges de l'Agglo. | 401 | 83,0 | 20,9 | 14,6 | 5,8 |
| Villes Nouvelles | 428 | 83,1 | 21,9 | 12,9 | 8,4 |
| Agglo. Axes Vallées | 385 | 85,9 | 27,4 | 16,9 | 9,8 |
| Agglo. Isolées | 388 | 85,5 | 32,6 | 22,7 | 9,4 |
| Communes Rurales | 397 | 85,5 | 40,3 | 32,4 | 7,5 |
| **TOTAL** | **395** | **84,0** | **17,5** | **10,4** | **6,4** |

Le cœur d'agglomération est plus fréquenté le matin et surtout l'après-midi, pour ses activités professionnelles et les services qui y sont établis. Au cours de la journée, un « endettement de distance » entre le lieu occupé et le domicile augmente du matin jusqu'à la fin d'après-midi, puis décroît régulièrement durant la pointe du soir et la soirée. C'est un moment présentiel exercé localement.

**Figure 2 :** Moment présentiel



## Conséquences pour les modèles de planification

Les régularités constatées militent pour modéliser les situations et les comportements individuels de mobilité par boucles plutôt que par déplacements. La hiérarchie des motifs d'activités, selon le degré de contrainte, doit influencer :

- la formation des boucles, à partir des motifs d'activité les plus contraintes ;
- à lieu fixé de résidence, la localisation des activités externes et le choix du mode de transport doivent être modélisés conjointement ;
- les motifs subsidiaires d'activité doivent être greffés sur les boucles principales ou réalisés par des boucles autonomes.

Pour l'Île de France, ces principes sont incorporés dans le modèle ANTONIN 2 du STIF [4]. Ce modèle est encore perfectible, en particulier pour intégrer le choix d'équipement automobile au choix de localisation des activités aux motifs contraints.

## Bibliographie


[1] Direction Régionale de l'Equipement d'Ile-de-France, 2004
Les déplacements des Franciliens en 2001-2002, Enquête Globale de Transport
*DREIF, Paris*

[2] Direction Régionale de l'Equipement d'Ile-de-France, 2005
Les cahiers de l'EGT : analyses détaillées de l'EGT 2001-2002
*DREIF, Paris*

[3] Leurent F., Samadzad M., 2010
Une caractérisation de la mobilité quotidienne des Franciliens, à partir de l'EGT 2001-2002
*Congrès International Atec-ITS, 3-4 février 2010, Versailles, France*

[4] Debrincat L., Pieters M., Tuinenga J. G., 2006
ANTONIN : updating and comparing a transport model for the Paris region
*European Transport Conference 2006, 18-20 September, Palais de la Musique et des Congrès, Strasbourg, France*

# Capacité des véhicules, attente à quai et choix d'itinéraire en transport collectif urbain – modélisation pour la planification du réseau TC

Fabien Leurent, Ektoras Chandakas
Université Paris-Est, Laboratoire Ville Mobilité Transport, Ecole des Ponts ParisTech

**Dans la planification des réseaux de transport collectif urbain (TCU), on utilise un modèle d'affectation du trafic pour simuler les conditions d'usage et les charges locales de trafic. Or les fortes concentrations de voyageurs sont sources de congestion, dans les véhicules, à quai ou en couloir dans les stations, aux divers accès etc. Le modèle PSAT présenté ici traite la congestion à quai causée par la limite de capacité des véhicules en explicitant le stock de voyageurs et son influence sur l'attractivité des missions de service dans les choix d'itinéraire du voyageur. Nous comparons dans un cas élémentaire ce modèle aux modèles alternatifs, qui n'ont guère été utilisés dans la pratique.**

## Introduction

Plus une agglomération est massive, avec une population forte et dont la répartition spatiale présente des concentrations élevées, plus les transports collectifs sont appropriés pour les déplacements des voyageurs, grâce à leurs économies d'échelle. Pour planifier leur réseau en adéquation avec les besoins du territoire, il est important *(i)* de structurer les services dans l'espace en relation avec la configuration des populations et des emplois, et *(ii)* de dimensionner la capacité de chaque service de manière à éviter les temps d'attente qui dégradent la qualité de service.

Dans la planification des transports collectifs urbains (TCU), le dimensionnement de capacité est étudié par ligne lors de sa conception mais sans tenir compte des effets de réseau. Or, dans la réalité d'un réseau maillé et très chargé, l'intérêt d'une capacité supplémentaire et notamment d'une ligne supplémentaire tient aux gains de temps non seulement des voyageurs qui l'utilisent, mais aussi des usagers des autres services qui bénéficient d'un allègement du trafic, d'un meilleur confort et d'une réduction des retards. En transport routier, les effets directs et les effets indirects ont souvent une ampleur équivalente et constituent ensemble 80% des avantages d'un projet.

Nous présentons ici un modèle novateur pour la capacité des véhicules en voyageurs et ses effets sur les stocks de voyageurs à quai : le modèle PSAT, pour Passenger Stock and Attractivity Threshold, qui explicite les stocks de passagers et les conditions d'attractivité d'une mission de service pour les usagers. Après avoir décrit un modèle d'affectation comme outil de planification et marqué la place des phénomènes de congestion, nous exposons les principes du modèle. Ensuite, nous le comparons dans un cas d'école aux modèles alternatifs proposés dans la littérature scientifique.

## Modèle d'affectation et contraintes de capacité

Dans un modèle d'affectation du trafic aux itinéraires sur un réseau, on représente d'une part l'offre de transport *i.e.* le réseau d'infrastructures et de services, et d'autre part la demande de déplacement, dans sa structure spatiale (les volumes demandés de zone d'origine à zone de destination) et selon ses comportements économiques de choix d'itinéraire. Le modèle établit la qualité de service par itinéraire, en déduit le choix d'itinéraire pour chaque déplacement et superpose les itinéraires des individus pour déterminer la charge locale de trafic par élément de réseau (nœud ou arc). Un tel modèle permet de simuler un scénario d'offre et de demande afin d'en évaluer les avantages aux usagers, les coûts et autres impacts.

Cependant, chaque ressource de transport, infrastructure ou véhicule n'a qu'une capacité limitée pour écouler les déplacements. Quand le volume demandé excède la capacité disponible, la qualité de service est dégradée : les individuels « mobiles » sont plus concentrés, ce

qui est inconfortable pour l'usager, et si une file d'attente se forme, alors chaque usager subit un délai d'attente.

En TC, les contraintes de capacité sont diverses selon le type d'entité mobile, voyageur ou véhicule, et selon le lieu d'application, en véhicule ou en élément d'infrastructure selon le lieu et la fonction.

Les effets sensibles pour un usager sont l'inconfort et le délai. Un usager qui connaît le réseau et ses conditions de trafic évalue le manque de qualité de service sur un itinéraire comme un coût, et choisit un itinéraire de moindre coût. En un point de choix, *i.e.* une station où plusieurs missions sont accessibles pour rapprocher l'usager de sa destination, les coûts d'inconfort et d'attente en stock sont arbitrés par l'usager avec les rythmes de desserte et les temps subsidiaires entre la montée en véhicule et l'arrivée à destination. Deux types d'attente : l'attente d'une desserte par un véhicule et la « traversée » du stock sont considérées par l'usager et doivent être traitées en cohérence dans le modèle d'affectation.

## Principes du modèle PSAT

Soit le problème de choix d'itinéraire pour un voyageur en une station, entre des missions $z \in Z$ chacune avec sa fréquence $f_z$, son temps subsidiaire $t_z$ jusqu'à destination et une capacité de $k_z$ voyageurs par véhicule.

### *Temps d'attente et stock de voyageurs pour une mission*

Hors congestion, le temps moyen pour un voyageur entre la station et la destination par la mission *z* comprend le temps subsidiaire et la durée d'attente moyenne inversement proportionnelle à la fréquence avec un coefficient $\alpha$ qui exprime la régularité du service et la pénibilité relative de l'attente :

$$T_z = t_z + \alpha/f_z$$

Tant que le volume demandé, *q* , reste inférieur à la capacité de mission, $\kappa_z = f_z.k_z$ durant la période étudiée, il n'y a pas de stock pérenne, *i.e.* qui subsiste juste après le passage d'un véhicule. Mais si $q > \kappa_z$, alors des voyageurs s'accumulent à quai, chacun devant laisser passer un ou plusieurs véhicules avant de réussir à embarquer. L'attente en stock dépend du nombre de véhicules inaccessibles, donc de la taille du stock en voyageurs, *n*, de la fréquence de passage, $f_z$ et du nombre de places disponibles à chaque passage, $k_z$ :

$$\text{soit } w_z = n/(f_z k_z).$$

Au total, un voyageur subit un coût moyen (en temps généralisé) de :

$$T_z = t_z + \alpha \ \max\{n,k\}/\kappa_z.$$

La taille, *n,* du stock est déterminée par le principe d'équilibre entre itinéraires alternatifs : le temps moyen $T_z$ influence la demande locale *q* de manière décroissante, jusqu'à égaliser $q = x_z$ pour le volume servi, $x_z(n) = f_z \min\{n,k_z\}$.

### *Attractivité d'une mission*

Quand plusieurs missions sont accessibles, hors congestion, l'usager choisit toute mission disponible dont le temps subsidiaire est inférieur ou égal au temps moyen de tout panachage entre des missions provisoirement indisponibles. Cette condition d'attractivité détermine l'ensemble *A* des missions attractives, leur fréquence combinée, $f_A = \Sigma_{z\in A} f_z$, $f_A$ ainsi que la répartition du trafic et le temps combiné moyen, selon les formules suivantes :

**Modèle sans congestion :** $\dfrac{x_z}{q} = 1_{\{z\in A\}} \dfrac{f_z}{f_A}$ et $T_A = [\alpha + \sum_{z\in A} f_z.t_z] / f_A$.

Si cette répartition induit un volume $x_z > \kappa_z$, alors elle est incorrecte : la station supporte un stock pérenne de voyageurs. En fonction de la taille de ce stock, une mission initialement non attractive peut le devenir dès que le temps moyen sans elle dépasse son temps subsidiaire, donc quand la taille de stock dépasse une valeur donnée qui est son seuil d'attractivité, noté $v_z$.

**Modèle PSAT [1] :** $x_z(n) = f_z \min\{k_z, (n-\nu_z)^+\}$ et $T_{A(n)} = \dfrac{\alpha n + \sum_{z \in A(n)} x_z(n) t_z}{\sum_{z \in A(n)} x_z(n)}$

La condition de seuil, $\nu_z = \sup\{n : T_{A(n)} \leq t_z\}$ permet de déterminer progressivement les A (n) et $T_{A(n)}$ dans l'ordre des $n$ croissants.

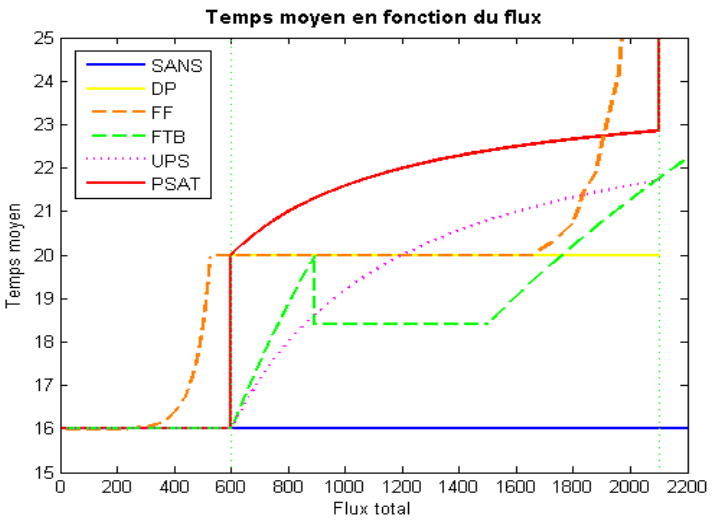
## Un banc d'essai des modèles

Soit un cas d'école à deux missions, décrites ci-dessous, avec α = 1 (soit 60 min/h).
A volume de demande nul, la ligne L1 est attractive puisque son temps subsidiaire est minimal, mais pas L2 car :

$t_2 = 20 > t_1 + \alpha/f_1 = 16$

### *Caractéristiques des lignes*

| Mission | $t_z$ (min) | $f_z$ (/h) | $k_z$ (voy) | $\kappa_z$ (voy/h) |
|---|---|---|---|---|
| L1 | 10 | 10 | 60 | 600 |
| L2 | 20 | 15 | 100 | 1500 |




Nous avons confronté le modèle PSAT aux quatre modèles alternatifs dans la littérature scientifique :

- FF *Effective Frequency*, où la fréquence locale est reliée artificiellement au rapport entre volume en montée et capacité. C'est le seul opérationnel actuellement, dans le logiciel Emme/3 [2,3].
- DP *Dual penalization*, pénalisation d'une mission saturée pour égaler le coût moyen de la mission alternative [4].
- FTB *Frequency To Board* : le ratio entre places disponibles et flux de candidats en montée, borné à 1, est la probabilité d'embarquer qui influence le temps d'attente, sans notion de stock [5, 6, 7].
- UPS *User Preference Set* : les attentes de desserte sont négligées et les voyageurs affectés aux missions dans l'ordre de préférence décroissante et selon les capacités disponibles [8, 9].

Le modèle FF présente un temps moyen croissant avec le volume de demande, mais avec un plateau intermédiaire peu réaliste. Le modèle UPS sous-estime le temps moyen car il néglige les attentes de desserte. Le modèle FTB présente une décroissance soudaine qui est une aberration. Le modèle DP traite mal les régimes intermédiaires. Le modèle PSAT présente un comporte-ment intuitif, avec des augmentations raides aux points de saturation d'une mission.

## Conclusion

Le modèle PSAT est encore en développement, afin de traiter plusieurs destinations, plusieurs origines et un réseau complexe. Sa résolution repose sur un principe de dualité, et un algorithme de lagrangien augmenté devrait convenir pour établir l'équilibre du trafic sur un réseau.

**Remerciements**
au STIF, mécène de la Chaire « Socio-économie et modélisation des transports collectifs urbains de voyageurs » de l'Ecole des Ponts ParisTech.

## Bibliographie


[1] Leurent F. et Benezech V., 2011
The Passenger Stock and Attractivity Threshold model for traffic assignment on a transit network with capacity constraint
*Congrès annuel du TRB, Washington, Janvier 2011. Edition DVD*

[2] De Cea J. and Fernandez E., 1989
Transit Assignment to Minimal Routes: An efficient new Algorithm
*Traffic Engineering and Control, pp 491 – 494*

[3] Cepeda M., Cominetti R., Florian M., 2006
A frequency-based assignment model for congested transit networks with strict capacity constraints: characterization and computation of equilibria
*Transport Research Part B, pp. 437-459*

[4] Lam W.H.K., Gao Z.Y, Chan K.S., Yang H., 1999
A stochastic user equilibrium assignment model for congested transit networks,
*Transportation Research Part B, Vol. 33, pp 351 – 368*

[5] Kurauchi F., Bell MGH, Schmocker J-D., 2003
Capacity Constrained Transit Assignment with Common Lines
*Journal of Mathematical Modelling and Algorithms, Vol. 2, pp 309 – 327*

[6] Shimamoto H., Kurauchi F., Iida Y., Schmocker J-D., Bell MGH., 2005
Evaluation of public transport congestion mitigation measures using a passenger assignment model
*Journal of the Eastern Asia Transportation Studies, Vol. 6, pp 2076 – 2091*

[7] Schmöcker J-D., Bell MGH, Kurauchi F., 2008
A quasi-dynamic capacity constrained frequency-based transit assignment model
*Transportation Research Part B, Vol 42, pp 925 – 945*

[8] Hamdouch Y., Marcotte P., Nguyen S., 2004
A Strategic Model for Dynamic Traffic Assignment
*Networks and Spatial Economics, Vol. 4, pp 291-315*

[9] Hamdouch Y., Lawphongpanich S., 2008
Schedule-based transit assignment model with travel strategies and capacity constraint
*Transportation Research Part B, Vol 42, pp 663 – 684*

# Affectation dynamique du trafic sur un réseau de transport routier

Vincent Aguiléra, Fabien Leurent
Université Paris-Est - Laboratoire Ville Mobilité Transports - Ecole des Ponts ParisTech

**Sur un réseau routier, les phénomènes de trafic sont spatialisés et dynamiques ; ils interagissent avec les comportements microéconomiques des automobilistes dans leurs choix d'itinéraire et d'horaire de départ. Le modèle LADTA et le code de calcul associé LADTA ToolKit ® traitent un territoire comme un ensemble de zones d'origine et de destination entre lesquelles s'expriment des déplacements selon une structure spatiale et socio-économique fixée, via un réseau dont les capacités locales sont limitées et peuvent donner lieu à des files d'attente. La conception mathématique et informatique de ces outils permet de simuler efficacement des problèmes de grande dimension. Le fonctionnement journalier du réseau francilien a été reproduit assez fidèlement ; d'autres applications concernent la répartition temporelle et spatiale du trafic sur le réseau magistral français ainsi que les émissions de polluants par la circulation routière.**

## Introduction

La simulation informatique des réseaux routiers a commencé à la fin des années 1950 pour planifier le développement d'un réseau face à l'essor du mode automobile [1]. Les outils et les applications sont longtemps restés statiques, le fonctionnement du trafic restant stationnaire pendant une période donnée (typiquement, une heure de pointe). Cette hypothèse privilégie la dimension spatiale du réseau et des flux de déplacements échangés entre les zones d'origine et de destination sur le territoire, d'où l'appellation de modèle d'affectation du trafic aux itinéraires sur un réseau [2,3]. La dynamique du trafic a été modélisée d'abord au niveau local d'une section ou d'une jonction, puis étendue à un réseau surtout à partir des années 1990 : mais les études d'aide à la décision se fondent encore majoritairement sur les outils statiques.

Nous présentons ici le modèle LADTA et le code de calcul associé (LTK, pour LADTA ToolKit), conçus pour ajouter la dimension temporelle au modèle classique d'affectation statique. La section 1 expose le fondement du modèle. La section 2 présente les principes d'architecture logicielle du LTK. La section 3 décrit deux applications, l'une consacrée à l'étude de modulations horaires de péages sur le réseau magistral français, l'autre à l'estimation des émissions de polluants sur le réseau routier francilien. En conclusion, nous évoquons les développements en cours ou potentiels.

## Structure du modèle LADTA

LADTA [4] est l'acronyme de Lumped Analytical Dynamic Traffic Assignment Model. Il s'agit d'une formulation analytique du problème d'affectation dynamique à l'équilibre offre-demande, qui assemble quatre composants traitant respectivement des aspects suivants :

- La formation des services de transport, typiquement des couples itinéraire – horaire de départ, caractérisés par une durée, une pénibilité, un tarif et des frais de circulation. Les services sont constitués à partir des situations instantanées des éléments du réseau (les arcs et les nœuds).
- Les choix de service par les usagers : par déplacement entre une zone d'origine et une zone de destination, pour un comportement microéconomique donné (selon certaines préférences horaires et un certain arbitrage entre prix et temps de parcours).
- Le chargement des volumes affectés aux services, sur les tronçons du réseau selon une chronologie de propagation.
- L'écoulement local du trafic, au niveau du tronçon avec une contrainte de capacité du nœud de sortie.

Ces quatre composants sont en dépendance cyclique, comme illustré en Figure 1. La formation des services et le chargement se ramènent essentiel-lement au problème de la recherche de chemins de moindres coûts. Trivial en affectation statique, ce dernier constitue la principale difficulté de l'affectation dynamique, car les temps et coûts de parcours varient avec l'horaire de départ. La dépendance cyclique des quatre problèmes est caractéristique d'un modèle d'équilibre, et peut être résolue par un algorithme itératif.

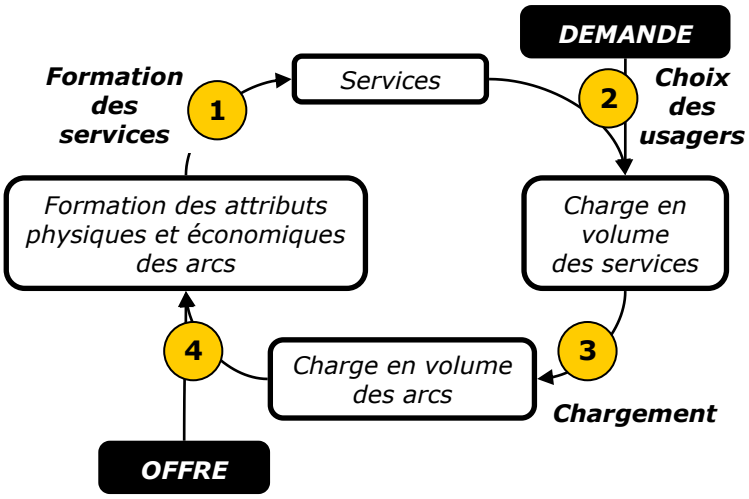



**Figure 1 :** Structure du modèle LADTA

## Architecture du LTK

Le LTK est un code de calcul déposé par l'École des Ponts ParisTech. Son architecture logicielle permet le traitement de réseaux arbitrairement grands, ainsi que la distribution des calculs sur une grille, comme illustré en Figure 2. Sur une grille de calcul comportant n+1 nœuds, l'un, noté **C**, joue le rôle de coordinateur. Le coordinateur calcule l'écoulement, actualise les attributs physiques et économiques des arcs, et les distribue aux serveurs notés $\mathbf{S_1}$ à $\mathbf{S_n}$. Les étapes de choix des usagers et de chargement sont traitées par destination. Chaque serveur traite, en parallèle avec les autres, un groupe de destinations, puis retourne un chargement partiel au coordinateur, qui les agrège pour calculer à nouveau l'écoulement. Des algorithmes originaux [5] permettent de résoudre efficacement, en temps continu, la recherche des services optimaux ainsi que le chargement, et ce par destination, depuis toutes les origines et simultanément pour tous les instants de départ.

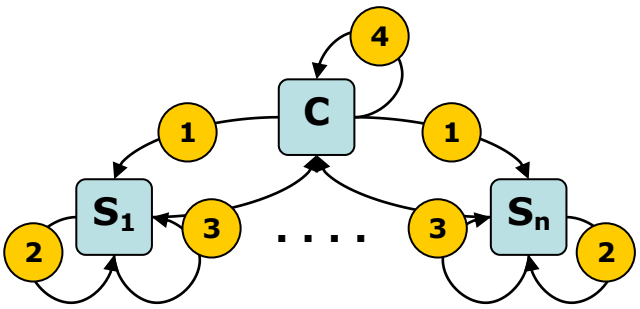



**Figure 2 :** Distribution des calculs sur une grille

## Applications

L'étude de scenarii de modulation horaire de péages est un exemple d'application du module de choix d'horaire de départ [6] du LTK. En Figure 3a sont tracés en rouge les itinéraires pour lesquels une modulation horaire de péages est simulée. La demande est estimée à partir des données de billettique des 14 et 15 juillet 2008. Les niveaux de congestion atteints en Vallée du Rhône, à 11h le 14 juillet, sont illustrés en Figure 3c (sans modulation tarifaire) et en Figure 3d (avec modulation tarifaire). La Figure 3b donne le débit horaire total au départ depuis toutes les origines (en vert : sans modulation, en rouge : avec). Le pic de demande du 14 est retardé, écrêté, et en partie reporté au 15.

Deuxième exemple d'application, l'étude de la distribution spatiale et temporelle des émissions de monoxyde de carbone correspond aux déplacements intra-franciliens (simulés) effectués en véhicules particuliers. Les cartes de la Figure 4 ont été obtenues avec le module émissions [7] du LTK, pour une demande correspondant à un jour moyen estimé à partir de données DiRIF et EGT2001.

## Conclusion

Le développement du modèle se poursuit pour affiner la simulation locale de la congestion, constituer des matrices origine-destination tem-poralisées et estimer des profils de comportement.

Les applications potentielles concernent d'une part la planification à long terme (aménagement de réseau, dimensionnement de capacité), d'autre part l'aide à l'exploitation à très court terme voire en temps réel, en simulant les effets d'actions sur le trafic.

**Figure 3 :** Impact de la modulation tarifaire

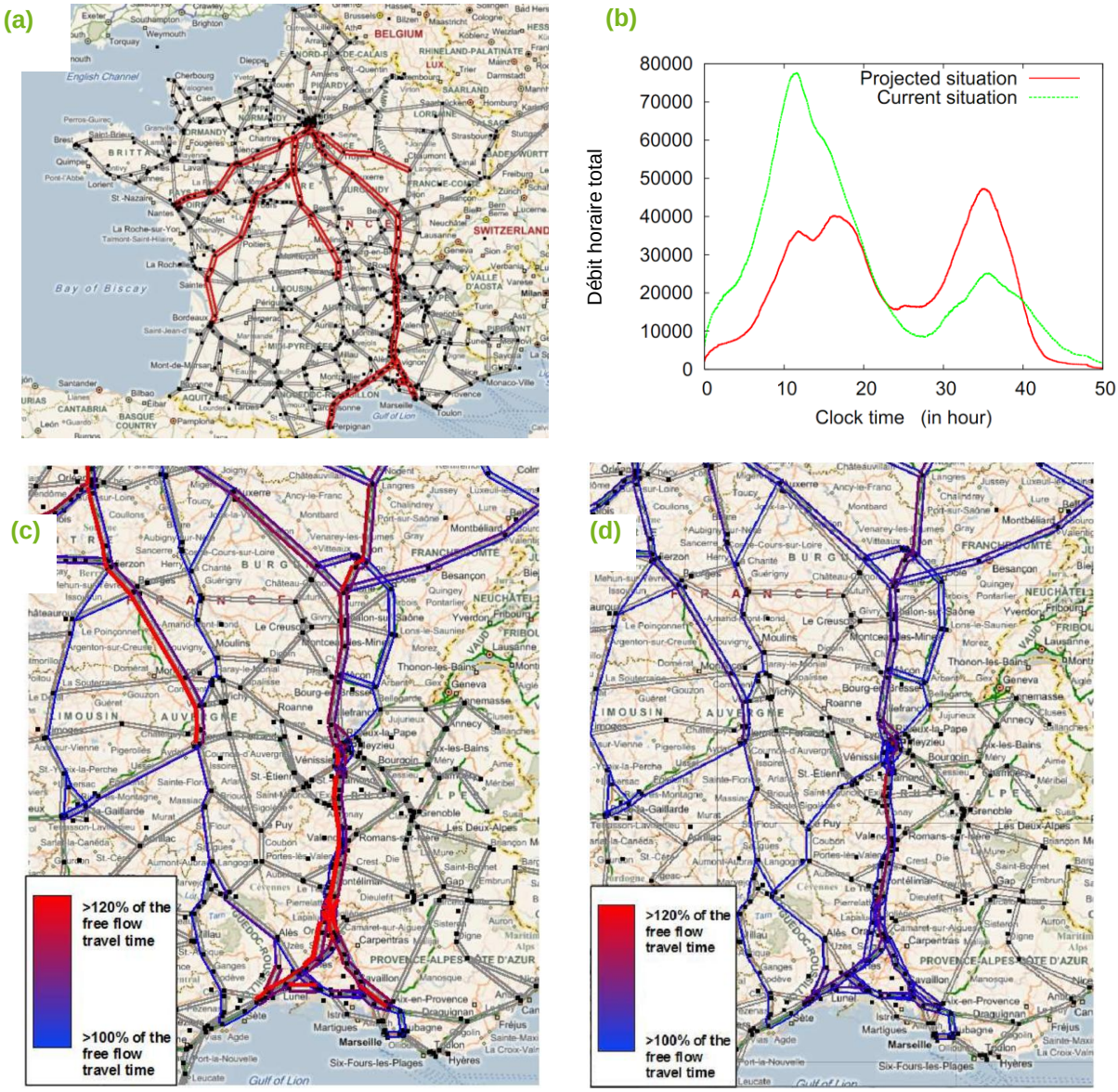
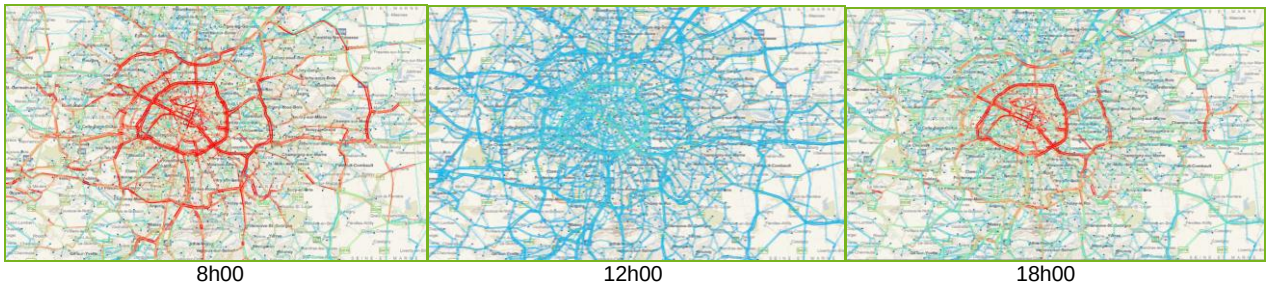



**Figure 4 :** Emissions d'oxyde de carbone sur le réseau francilien à divers instants



8h00 12h00 18h00

## Bibliographie


[1] Wardrop J.G.
Some theoritical aspects of road traffic research
*Proc. of the Institute of Civil Engineers, PART II, Vol.1, 1952, pp. 325–378*

[2] Beckmann M., McGuire C. and Winsten C.
Studies in the Economics of Transportation
*1956, Yale University Press*

[3] Ortuzar J. de D., Willumsen L.G.
Modelling Transport
*2001, 3rd edition, Wiley*

[4] Leurent F.
On Network Assignment and Supply-Demand Equilibrium : an Analysis Framework and a Simple Dynamic Model
*Proc. of the European Transport Conference, 2003*

[5] Aguiléra V., Leurent F.
On Large Size Problems of Dynamic Network Assignment and Traffic Equilibrium : Computational Principles and Application to Paris Road Network
*Transportation Research Records: Journal of the Transportation Research Board, Vol. 2132, 2009*

[6] Aguiléra V., Wagner N.
A Departure Choice Model For Dynamic Assignment on Interurban Networks
*Proc. of the European Transport Conference, 2009*

[7] Aguiléra V., Lebacque M.
Dynamic Estimation of Traffic Emissions in Metropolitan Road Networks
*Proc. of the 12th World Conference on Transportation Research, Lisbon, 2010*

# Contraintes de capacité pour l'affectation du trafic routier dans les aires urbaines denses

Tibye Saumtally
Université Paris-Est, IFSTTAR - GRETTIA
Jean-Patrick Lebacque
IFSTTAR - GRETTIA
Habib Haj-Salem
IFSTTAR – GRETTIA

**Le réseau routier d'une aire urbaine dense et de grande étendue est trop complexe pour une modélisation par arcs. Nous proposons d'approcher un tel réseau par un milieu continu dans lequel on distingue des directions de propagation privilégiées. Le modèle développé permet d'éviter une description très fine du trafic sur un réseau dans lequel les points de mesure ne sont pas en nombre suffisant pour permettre une évaluation exhaustive. L'écoulement du trafic routier dans ce réseau est vu comme l'écoulement d'un fluide surfacique. Cet écoulement est contraint par la capacité des voies. Les contraintes de capacité imposent aux flux une borne supérieure sur chacune des directions privilégiées de l'écoulement. L'affectation du trafic résulte de l'optimisation d'une fonction objectif du coût de déplacement sous les contraintes données par l'offre du réseau (contraintes de capacités) et de la demande élastique des usagers. Cette affectation vérifie le premier principe de Wardrop (équilibre de l'utilisateur).**

## Trafic routier sur le réseau d'une aire urbaine dense

Une aire urbaine dense est une aire géographique qui contient un réseau dense d'infrastructures routières. Cela signifie que les longueurs des différents tronçons et les distances entre les tronçons adjacents sont « petites » en comparaison d'une longueur caractéristique de la zone observée. Paris peut être considérée comme une aire urbaine dense. Le nombre élevé d'arcs, nœuds et centroïdes du réseau rend la modélisation (recueil et traitement des données, interprétation des résultats) pratiquement impossible sans accepter de regrouper plusieurs tronçons en un seul arc et plusieurs origines en un seul centroïde. Quitte à procéder à ce type de simplification, il a été proposé de considérer que chaque véhicule pouvait circuler sur n'importe quel point de l'aire urbaine [3, 4, 6]. On parle alors de *continuum*. Il reste alors à définir les lois physiques de l'écoulement du trafic, la demande de déplacement des usagers, les coûts de déplacement et l'offre du réseau. Dans la suite, nous décrivons un modèle statique, si bien que l'on peut considérer que l'unité de temps est fixée à une heure par exemple.

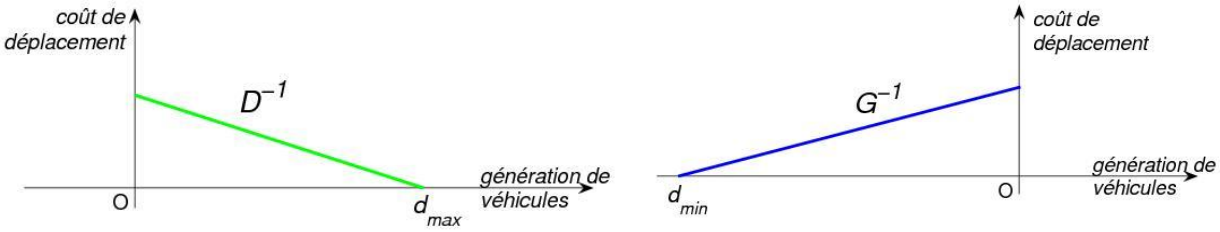
## Loi d'écoulement

On suppose que les véhicules sont répartis sur une aire urbaine et cherchent à rejoindre les entrées du périphérique. Les fonctions qui représentent les grandeurs de trafic sont supposées régulières. Cela signifie par exemple que les quantités de véhicules par unité d'aire, qui devraient être représentées de façon réaliste par des fonctions créneaux, sont supposées « lisses ». Cette approximation permet un traitement mathématique simplifié. Nous définissons une fonction de génération des déplacements vers une destination déterminée : les déplacements sont générés en dehors de cette destination et absorbés sur cette destination. Pour chaque destination, les conditions de trafic en un point de l'aire urbaine sont « décrites » par un champ de vecteurs à deux coordonnées. On définit ainsi pour chaque destination en en chaque pointde l'aire un vecteur flot. Chaque coordonnée de ce vecteur s'exprime en véhicules par unité de longueur traversée. Par analogie avec la mécanique des fluides, la loi d'écoulement du trafic sur l'aire urbaine vérifie une équation de conservation reliant la fonction de génération et le flot de véhicules

## La demande des usagers

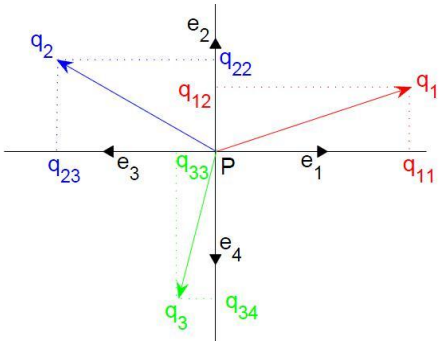
La demande de déplacement des usagers en un point du réseau vers une destination déterminée est une fonction du coût de déplacement depuis ce point vers la destination [1]. La demande sera positive en tout point du réseau qui n'est pas une destination (génération de véhicules), elle sera négative en tout point du réseau situé sur l'aire d'une destination (absorption des véhicules). En tout point du réseau, on représente la fonction de demande inverse (utilisée par les économistes) du réseau par un segment de droite (Figure 1). Ces fonctions de demande ont ici le rôle de la matrice Origine/Destination dans les modèles « classiques ».

**Figure 1 :** Fonctions demande sur l'aire urbaine (gauche) et sur les destinations (droite)




## La physique du trafic

**Figure 2 :** Exemple de flots en un point P

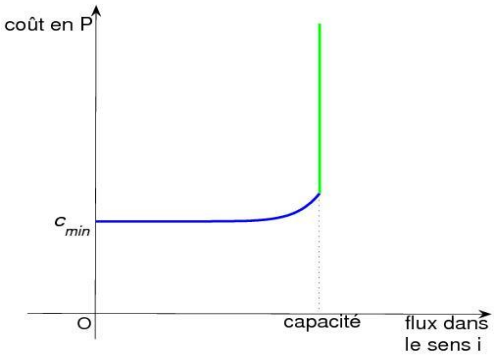



En un point *P* de l'aire urbaine, le trafic s'écoule suivant des directions privilégiées que nous avons choisies ici othogonales. La charge de trafic perçue en *P* est un vecteur à quatre coordonnées, chaque coordonnée représentant le flux sur un sens de déplacement possible, chacun de ces flux donnant à son tour un coût de déplacement directionnel. Dans le cas des trois flots de trafic au point *P* de la figure 2, la charge de trafic perçue sera :

$$(q_{11}, q_{12}+q_{22}, q_{23}+q_{33}, q_{34}).$$

## L'offre du réseau

**Figure 3 :** Représentation de la fonction coût sur un tronçon




Le modèle prend aussi en compte l'offre du réseau. La capacité d'une voie est une notion complexe [2,5]. Nous la définissons comme le flot maximal admissible ne causant pas de congestion sur cette voie. La capacité peut être vue comme l'offre maximale du réseau. Sur chacun des quatre sens de déplacements possibles, nous bornons la capacité par une « barrière » sur la fonction coût (figure 3).

## L'équilibre de l'usager

L'équilibre de l'usager ou premier principe de Wardrop est atteint lorsque, pour tout couple Origine/Destination, les chemins utilisés entre cette origine et cette destination ont le même coût [1, 3, 6]. Ce coût est inférieur ou égal à celui de tous les chemins non utilisés. La recherche d'un tel point d'équilibre peut se faire mathématiquement en mettant en œuvre un programme de type Beckmann de minimisation sous contraintes d'une fonction objectif [1].

## Résultats

Nous utilisons l'algorithme d'Uzawa pour obtenir un couple (flots de trafic, demandes de déplacement) solution du problème de l'équilibre de l'usager. Nous proposons une illustration qualitative de notre modèle au cas de la ville de Paris : les utilisateurs, répartis dans la ville, se rendent à quelques entrées du périphérique (déplacements travail-domicile).

**Figure 4 :** Fonction génération pour la destination Nord

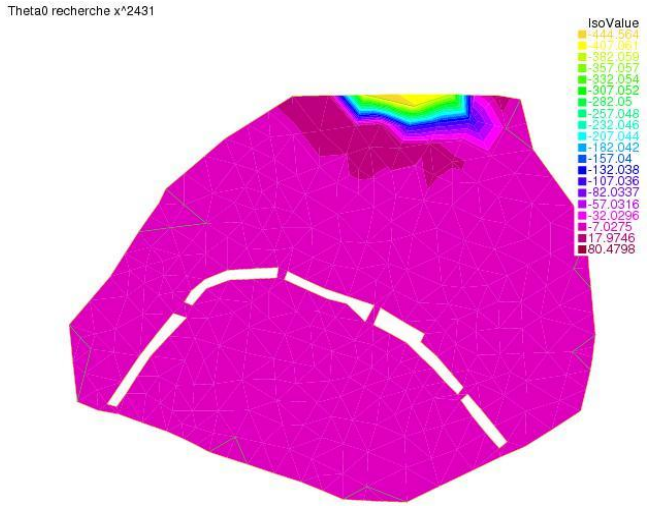
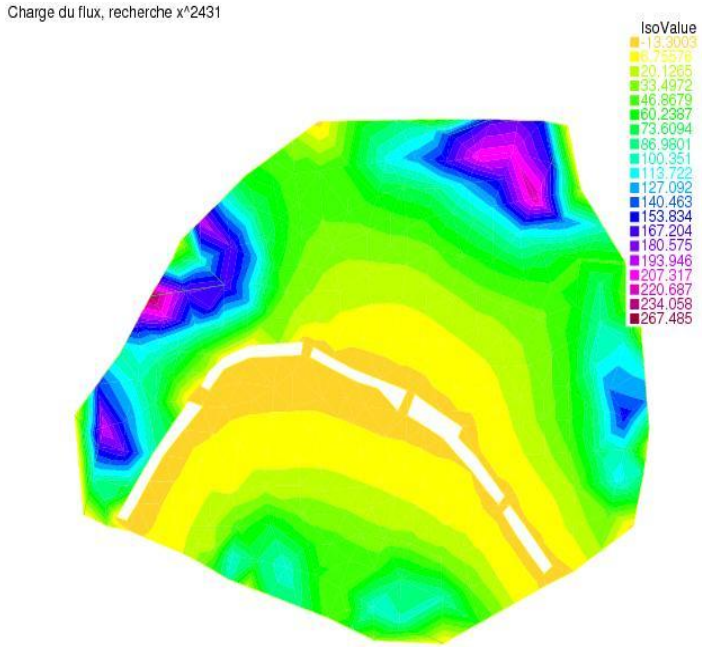



**Figure 5 :** Charge positive des flots de trafic de l'Ouest vers l'Est



La Figure 4 représente la fonction demande pour la destination Nord : les véhicules sont absorbés sur l'aire de destination, générés aux proches alentours, ne choisissent pas la destination nord s'ils sont trop loin de cette destination. La Figure 5 représente la charge de trafic se déplaçant d'Ouest en Est : des congestions apparaissent lorsqu'on entre sur les entrées du périphérique.

## Conclusion

Ce modèle peut être utilisé pour décrire le réseau de surface secondaire, en complément d'un modèle de trafic macroscopique classique. Ce modèle prend en compte l'équilibre entre offre et demande et se prête donc aux études d'évaluation et d'impact à échelle macroscopique. Il pourrait être couplé, notamment dans le cadre du projet Ville Numérique, à un modèle d'émission de polluants.

## Bibliographie


[1] Beckmann M.
A continuous model of transportation
*Econometrica. Vol. 20, 1952, pp. 643-660*

[2] Larsson T., Patriksson M.
An augmented lagrangean dual algorithm for link capacity side constrained traffic assignment problems.
*Transportation Research B. Vol. 29, n°6, December 1995, pp433-455*

[3] Puu T.
Continuous economic space modeling, draft of survey
*The annals of regional science. Vol. 43, N°1 :5–25, March 2009. Springer-Verlag*

[4] Romero Perez L. M.
Modelización del tráfico mediante el método de los elementos de contorno
*PhD thesis, Universidad de Sevilla, 2007*

[5] Taguchi A., Iri M.
Continuum approximation to dense networks and its application to the analysis of urban road networks
*Mathematical Programming Study. Vol. 20, 1982, pp. 178-217*

[6] Yang H., Yagar S., Lida Y.
Traffic assignement in congested discrete/continuous transportation system
*Transportation Research B. Vol. 28B, n°2, April 1994, pp. 161-174*

# Zonage de territoire et affectation de trafic sur réseau

Vincent Benezech, Fabien Leurent
Université Paris-Est, LVMT, Ecole des Ponts ParisTech, IFSTTAR

**La prévision des flux de voyageurs sur un réseau de transport se fait de manière agrégée : les extrémités des déplacements sont regroupées par zone géographique. Chaque zone est modélisée par un centroïde ponctuel, et reliée au réseau par des *connecteurs* i.e. des arcs fictifs dont le temps de parcours représente un temps terminal moyen. La diversité des extrémités ponctuelles est en général éludée. Nous modélisons leur distribution spatiale ainsi que ses effets sur la distribution des temps terminaux et sur le choix d'itinéraire optimal entre des points d'origine et destination. Sur un cas d'école, nous montrons l'importance d'expliciter les distributions, y compris la covariance entre les différents temps d'accès au réseau. Nous obtenons un modèle *probit* très prometteur pour l'affectation du trafic sur un réseau.**

## Introduction

### *Contexte*

Les études de prévision de la demande de trafic se font de manière agrégée. La première étape consiste à diviser la région étudiée en un certain nombre de zones d'analyse, appelée TAZ (pour Transport Analysis Zone ou Traffic Assignment Zone) à l'intérieur desquelles le comportement des voyageurs est plus ou moins homogène (voir pp. 113 et suivantes de [1] pour les détails sur les systèmes de zonage). Tous les trajets débutant ou finissant à l'intérieur d'une zone sont supposés le faire à partir d'un même point, le centroïde de zone. Pour l'affectation, une zone est reliée au réseau via des connecteurs qui joignent de manière fictive le centroïde à des points d'entrée dans le réseau. L'affectation de trafic entre deux zones se fait alors de centroïde à centroïde par la méthode du plus court chemin.

Définir des zones qui servent au mieux les intérêts d'une étude est difficile. Openshaw [2] montre que le zonage influence grandement les paramètres d'un modèle et qu'il n'existe pas à proprement parler de système optimal. Ces résultats sont confirmés par Baass [3] qui montre en outre que la méthode de placement du centroïde joue un rôle important et que celle-ci doit dépendre de la taille des zones. De plus, il est souhaitable de se limiter à des zones facilement utilisables (qui suivent les limites des zones de recensement par exemple) et interprétables par les décideurs et, dans la pratique, on utilise les systèmes de zones déjà établis.

### *Objectifs*

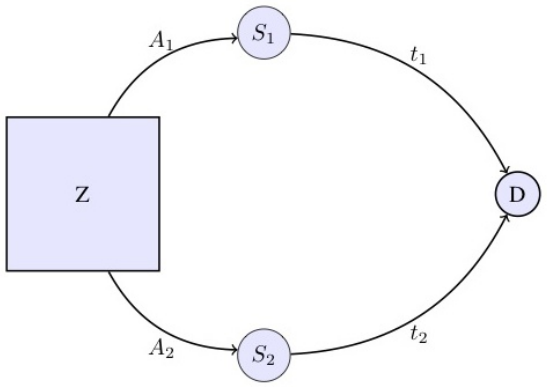
Dans le cadre de l'affectation de trafic, le problème du zonage est étroitement lié à la question du rabattement terminal, i.e. le début d'itinéraire que parcourt un voyageurs entre son point de départ et son point d'entrée dans le réseau (et pareillement à sa sortie du réseau). L'utilisation des centroïdes est une approximation grossière de la répartition des extrémités des déplacements. Ici, notre objectif est de poser un modèle probabiliste qui explicite et désagrège les extrémités des déplacements, afin d'estimer l'erreur commise en utilisant des centroïdes et de fonder une nouvelle méthodologie pour l'affectation de trafic, qui repose sur une meilleure représentation des conditions du rabattement terminal et permette une meilleure intégration du réseau dans le système de zonage.

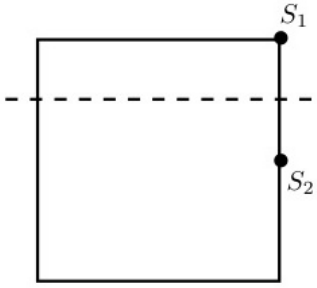
## Modélisation probabiliste

Un centroïde est traditionnellement établi en un lieu ponctuel précis. Cependant, nous préférons le concevoir plutôt comme un symbole pour la distribution dans cette zone des conditions d'accès entre les extrémités désagrégées des déplacements et une sélection de nœuds du réseau, les nœuds d'ancrage de la zone au réseau. Nous appréhendons cette distribution spatiale de manière probabiliste. Dans ces conditions, l'objet principal du modèle n'est pas le centroïde mais bien les nœuds d'ancrage et les

connecteurs associés qui représentent les conditions terminales dans la zone.

**Figure 1 :** Cas d'école : (a) Réseau, (b) Zone, ancrages et distribution des conditions terminales




$$E[A_1] = 1 \qquad E[A_2] = 3/4 \qquad \Sigma = \begin{pmatrix} 1/6 & 1/48 \\ 1/48 & 5/48 \end{pmatrix}$$

Le temps de trajet total d'un déplacement entre son point d'origine et son point de destination est alors une variable aléatoire, somme du temps de rabattement (sur la Figure 1, les variables aléatoires $A_1$ ou $A_2$) et du temps passé en véhicule ($t_1$ ou $t_2$, supposés déterministes). Chaque usager choisit l'option la plus courte. Dans ce cadre, plusieurs solutions sont envisageables.

- Un σ où les temps d'accès à un nœud d'ancrage suivent une loi de Gumbel, de fonction de répartition :

$$F(x) = \exp(-\exp[\tfrac{1}{\mu}(m - x)]).$$

Ici, $m$ est la moyenne et $\mu$ un paramètre proportionnel à l'écart-type de la distribution. Pour ce modèle, on dispose de formules simples donnant les probabilités de choix d'option en fonction des caractères [4].

- Un modèle probit, *i.e.* les temps de rabattement suivent une loi normale multivariée. Ce modèle n'admet pas de formules analytiques au-delà de 3 options de choix.

## Expérimentation

Poursuivons notre exemple avec deux stations et une destination réputée ponctuelle. La population des usagers est répartie de manière homogène sur une zone carrée et dispose de deux itinéraires {1, 2} pour se rendre à la destination, avec un ancrage $S_i$ par itinéraire *i*. Notons Σ la matrice de variance-covariance de $A_1$ et $A_2$, et $\Delta_t = t_2 - t_1$

Réaliser l'affectation revient à déterminer la proportion d'usagers qui utiliseraient $S_1$.

### *Résultats de l'affectation (Figure 2)*

*Modèle logit*. Comme les deux variables aléatoires définissant les temps d'accès n'ont pas la même variance, on utilise la moyenne des deux pour estimer μ. La formule usuelle du *modèle logit* donne alors :

$$p_1^{\text{logit}} = [1 + \exp(-\tfrac{1}{\mu}(\Delta t - \tfrac{1}{4}))]^{-1}.$$

*Modèle probit*. La variable aléatoire $A_1 - A_2$ suit une loi normale de moyenne 1/4 et de variance $\sigma^2 = 5/24$. Alors :

$$p_1^{\text{probit}} = \Phi[\tfrac{1}{\sigma}(\Delta t - \tfrac{1}{4})],$$

avec $\Phi$ la fonction de répartition d'une variable normale centrée normée.

### *Commentaires*

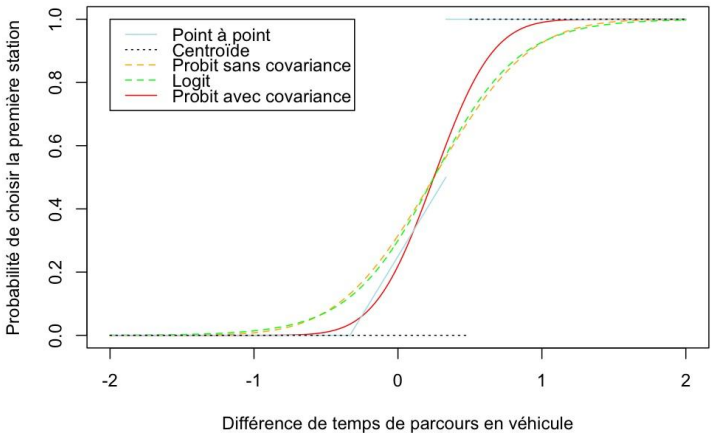
Les modèles probabilistes donnent de meilleurs résultats que l'affectation basée sur des centroïdes concrets (voir Figure 2). L'erreur due à un tel centroïde est significative : plus d'un quart du trafic est mal affecté dans la majorité des cas. Dans les modèles de prédiction de la demande existants, cette erreur est bruitée et rendue plus ou moins invisible par un phénomène de compensation entre les différentes zones. Lorsque la covariance est ignorée, les modèles *logit* et *probit* donnent des résultats similaires. Si les temps d'accès ne sont pas indépendants, le modèle *probit* est plus performant car il incorpore la covariance.

Cependant, même le modèle *probit* ne capture pas la totalité de la dépendance stochastique, seulement la partie tangible à travers la covariance.

En comparant les affectations par le modèle *probit* avec ou sans covariance, deux résultats apparaissent. En premier lieu, plus la différence de durée entre les deux temps de trajet en véhicule est importante, moins les effets sont sensibles ; la grandeur qui capture cet effet est le rapport entre $\Delta t$ et l'écart-type du système. En second lieu, c'est le rapport de la covariance à la variance typique du temps de rabattement qui importe. Des études complémentaires sont nécessaires pour savoir si l'amélioration des résultats justifie l'effort supplémentaire en temps de calcul.

Le modèle *logit* est bien connu dans la communauté scientifique car il est facilement applicable. Les modèles *cross-nested logit* permettent d'avoir une structure de covariance non triviale, cependant la structure n'est pas complètement libre [5] et les conditions d'emploi du *nesting* n'apparaissent pas toujours clairement.

**Figure 2 :** Affectation pour le cas d'école en fonction de $\Delta t$




## 4. Conclusion

Notre recherche se poursuit par le développement d'un programme d'affectation du trafic sur un réseau de transport privé (ex. automobile). A terme, le principal enjeu concerne la représentation désagrégée des conditions terminales d'accès aux divers réseaux de transport, donc l'affectation à un réseau de transports collectifs puis l'affectation à un réseau plurimodal pour modéliser la structure géographique concrète des moyens de transport tels que les usagers les trouvent à choisir.

## Bibliographie

[1] Ortuzar J.D., Willumsen L. G.
Modeling Transport
*Troisième édition, Wiley, 2001*

[2] Openshaw S.
Optimal zoning systems for spatial interaction models
*Environment and Planning A, Vol. 9, 1977, pp. 169-184*

[3] Baass K. G.
Design of zonal systems for aggregate transportation planning models
*Transportation Research Part B, n° 807, 1981, pp 1-6*

[4] Ben Akiva M., Lerman S.
Discrete Choice Analysis: Theory and Application to Predict Travel Demand
*Cambridge: MIT Press, 1985*

[5] Marzano V., Papola A.
On the covariance structure of the cross-nested logit model
*Transportation Research Part B, Vol 42, n° 2, 2008, pp 83-98*

# Analyse de sensibilité des modèles de déplacements aux courbes débit-vitesse

Eugénie Brutti-Mairesse, Sonia Teillac
IFSTTAR

**La chaîne de modélisation « déplacements / émissions de polluants / dispersion des polluants dans l'atmosphère » est le principal outil disponible afin d'évaluer l'impact d'un Plan de Déplacements Urbains sur la qualité de l'air. L'estimation des vitesses moyennes de circulation des véhicules et la charge de véhicules sur un réseau routier constituent des éléments de base de cette chaîne de modélisation. Les courbes débit-vitesse sont l'un des paramètres permettant de définir les vitesses de circulation des véhicules sur un réseau chargé. Afin d'évaluer la pertinence des résultats de l'évaluation, nous nous interrogeons sur la sensibilité des modèles de déplacement et d'estimation des émissions de polluants aux courbes débit-vitesse. Ces courbes sont rarement validées localement, les modélisateurs utilisent donc généralement des courbes calibrées sur d'autres agglomérations. La première approche consiste donc à analyser l'impact du calage de ces courbes sur les résultats des simulations d'émissions de polluants et de quantifier cet impact. Par ailleurs, différentes courbes débit-vitesse, basées sur des hypothèses divergentes, ont été développées dans la littérature. La deuxième approche consiste à analyser et quantifier l'impact des hypothèses des courbes BPR2 et Akcelik sur les résultats des simulations des émissions de polluants. Afin de pouvoir qualifier les variations de trafic et d'émissions de polluants ainsi observées, nous les comparerons aux variations induites par la modification de certains paramètres de la chaîne de modélisation : représentation du trafic des poids lourds (PL), prise en compte des temps de franchissement aux intersections, variations dans la composition du parc roulant de véhicules. Ces travaux sont réalisés avec le modèle de déplacement construit dans le cadre du projet ANR EvalPDU et le modèle d'estimation des émissions de polluants CopCETE.**

## Contexte et problématique

La chaîne de modélisation « déplacements / émissions de polluants / dispersion des polluants dans l'atmosphère » est le principal outil disponible afin d'évaluer l'impact d'un Plan de Déplacement Urbain (PDU) sur la qualité de l'air. L'estimation des vitesses moyennes de circulation des véhicules et la charge de véhicules sur un réseau routier sont des éléments de base de cette chaîne de modélisation. Les courbes débit-vitesse sont un des paramètres permettant de définir les vitesses de circulation des véhicules sur un réseau chargé. Afin d'évaluer la pertinence des résultats de l'évaluation, nous nous interrogeons sur la sensibilité des modèles de déplacements et d'estimation des émissions de polluants aux courbes débit-vitesse.

## Variations des paramètres des courbes débit-vitesse

Les courbes débit vitesse sont rarement validées localement [1] notamment à cause du nombre important de données nécessaires. Les modélisateurs utilisent donc généralement des courbes calibrées sur d'autres agglomérations. Les courbes utilisées dans ce travail sont les courbes BPR 2 développées par le « Bureau of Public Road ».

Un travail de calibrage de ces courbes a été effectué dans le projet EvalPDU se basant sur des temps de parcours mesurés sur le périphérique nantais. Les coefficients des courbes sont ainsi ajustés afin de représenter au mieux la réalité observée à travers la mesure des temps de parcours. La première approche consiste donc à analyser l'impact du calage de ces courbes sur les résultats des simulations des émissions de polluants et à quantifier cet impact. Le trafic et les émissions de polluants simulées avec les courbes BPR2 non calées sont comparés avec les résultats obtenus avec les courbes BPR2 calées.

Par ailleurs, dans la littérature, différentes courbes débit vitesse ont été développées se basant sur des hypothèses divergentes. Les courbes BPR2 ont comme principale caractéris-

tique de pouvoir distinguer les situations de trafic saturées et non saturées et donc de représenter deux comportements différents de la relation entre le débit et la vitesse pour ces deux situations. Les courbes Akcelik [2] quant à elles, ont comme principale caractéristique l'intégration d'un paramètre de retard lié au temps de traversée d'un carrefour. La deuxième approche consiste à analyser et quantifier l'impact des hypothèses des courbes BPR2 et Akcelik sur les résultats des simulations des émissions de polluants. Afin de pouvoir qualifier les variations de trafic et d'émissions de polluants ainsi observées, nous les comparons aux variations induites par la modification de certains paramètres de la chaîne de modélisation (représentation du trafic Poids Lourds, prise en compte des temps de franchissement aux intersections, variations dans la composition du parc roulant de véhicules).

## Modèles utilisés

Le trafic a été simulé avec le modèle de déplacements à quatre étapes développé dans le cadre du projet ANR EvalPDU. Le territoire modélisé correspond au territoire de Nantes Métropole. L'outil CopCETE [3] a permis de simuler les émissions de polluants issues du trafic. La version utilisée CopCETEv3 est basée sur la méthodologie Copert 4. Les calculs ont été réalisés à partir du parc INRETS actualisé de 2008 [4], des données météorologiques de l'agglomération de Nantes mesurées sur l'année 2008, et des données de trafic issues du modèle de déplacement. Dans les différentes simulations, seules les courbes débit-vitesse sont modifiées. Tous les autres paramètres de modélisation restent constants. Les émissions des principaux polluants réglementés sont présentées : dioxyde de carbone ($CO_2$), monoxyde de carbone (CO), oxydes d'azote ($NO_x$), composés organiques volatils (COV), particules de matière en suspension (PM).

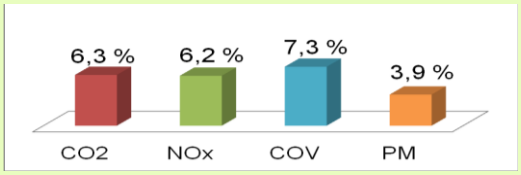
## Résultats

Le calibrage de la courbe induit une hausse des véhicules.km (+3,8 %) sur le réseau. Cela s'explique par le fait que la forme de la courbe calibrée permet une baisse brutale de la vitesse lorsque la saturation (charge du tronçon/capacité) est atteinte. Les véhicules se reportent donc sur des itinéraires plus longs en distance mais moins congestionnés. Au contraire, la courbe Akcelik décroit moins rapidement après la saturation. Le trafic est donc relativement stable (+0,9 %) mais la vitesse moyenne baisse fortement (de 49 km/h à 39 km/h) puisque le réseau est plus congestionné.

Les émissions de polluants augmentent pour les deux approches (calage et hypothèse de la courbe) et dans les mêmes ordres de grandeur (encadré 1). L'augmentation générale est due à des augmentations des véhicules /kilomètres dans les tranches 0-50 et + 90 km/h pour l'approche calage (encadré 2). La variation des distributions pour l'approche sur les hypothèses de courbe est similaire. En effet au regard des courbes d'émission des $NO_x$, $CO_2$, COV [5], les émissions sont plus importantes dans ces tranches de vitesse. Les émissions de PM varient moins car la courbe d'émissions est relativement plate pour les vitesses inférieures à 50 km/h mais croit sensiblement à partir de 80 km/h. Or la distribution des vitesses (encadré 2) nous montrent que le trafic augmente surtout dans les tranches de vitesses inférieures à 50 km/h.

**Encadré n°1 : Variations du trafic et des émissions de polluants simulés avec différentes courbes débit-vitesse**

***Calage***

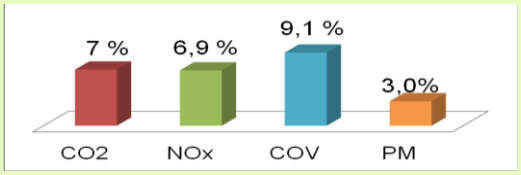



Trafic = +3.8% veh.km

Vitesse moyenne calée = 44 km/h

Vitesse moyenne non calée = 49 km/h

***Hypothèses de courbes***

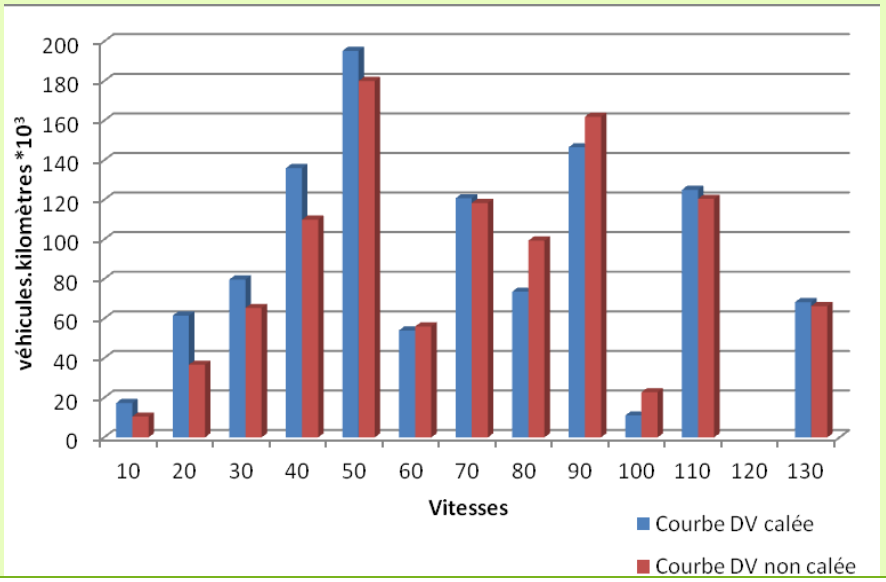



Trafic = +0.9% veh.km

Vitesse moyenne BPR 2 = 49 km/h

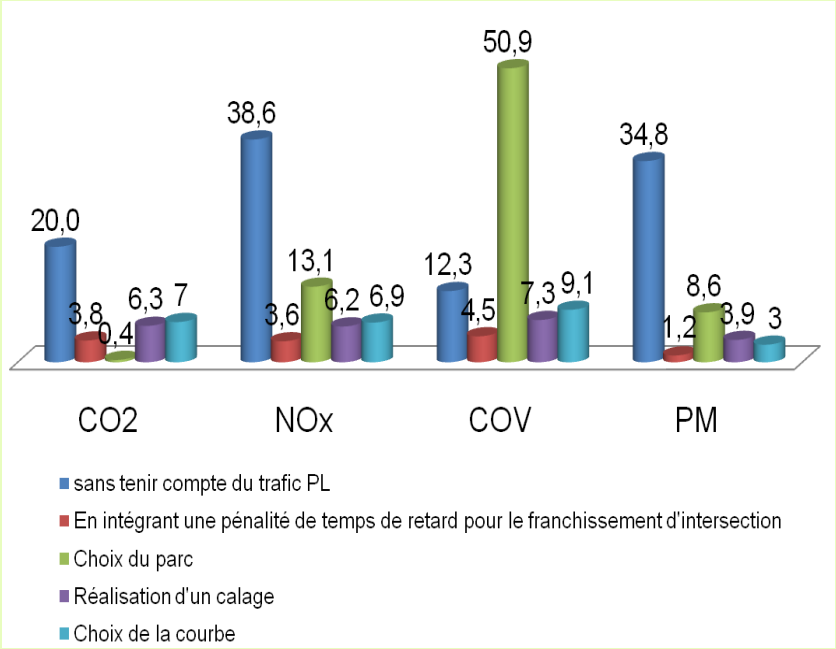
Vitesse moyenne Akcelik = 39 km/h

**Encadré n°2 : Distribution du trafic selon les classes de vitesse – comparaison pour les simulations avec courbe DV calée et non calée**




Afin de pouvoir qualifier les variations de trafic et d'émissions de polluants ainsi observées, nous les comparons aux variations induites par la modification de certains paramètres de la chaîne de modélisation (représentation du trafic Poids Lourds, prise en compte des temps de franchissement aux intersections, variations dans la composition du parc roulant de véhicules). La variabilité induite par le choix et/ou le calage de la courbe débit-vitesse est faible comparée à la variabilité induite par la la composition du parc de véhicules ou par la prise en compte du trafic de Poids Lourds. Ces deux paramètres sont donc des paramètres d'entrée de la chaîne de modélisation extrêmement sensibles. Cette mise en perspective a pour conséquence de minimiser la variabilité induite par les courbes débit-vitesse.

**Encadré n°3 : Impact de différents paramètres sur les émissions (%)**



## Discussion

Le choix et le calage de la courbe débit-vitesse induisent des variations d'émissions de polluants de l'ordre de 8 % en moyenne. Cette variation est moindre comparée aux variations observées pour différents choix de composition de parc ou encore pour une modélisation avec ou sans prise en compte du trafic Poids Lourds. Néanmoins, dans le cadre de l'évaluation de l'impact d'un PDU sur la qualité de l'air, cette variation représente une incertitude notable puisque l'impact du PDU est de l'ordre de 10 %. On voit bien ici l'importance du calage de ces courbes et de la pertinence du choix des hypothèses de ces courbes. On note aussi qu'il paraît indispensable d'analyser les résultats d'une modélisation en ayant conscience des hypothèses prises sur les paramètres d'entrée les plus influents, la courbe débit-vitesse en étant un dans le cadre de la modélisation des déplacements.

## Bibliographie

[1] Bonnel P.
Prévision de la demande de transport
*Université Lumière Lyon 2, décembre 2001, Laboratoire d'Economie des Transports, ENTPE, Université Lumière Lyon 2, CNRS*

[2] Akcelik R.
Travel time functions for transport planning purposes : Davidson's function, its time-dependent form and an alternative travel time function
*Australian Road Research, 1991. 21 (3): pp. 49-59*

[3] CETE Normandie Centre and DADT Département Aménagement Durable des Territoires
COPCETE v3
Outil de Calcul des Emissions Polluantes d'Origine Routière
*Notice d'utilisation*. 2010

[4] Hugrel C., Joumard R.,
Transport routier - Parc, usage et émissions des véhicules en France de 1971 à 2025.
*INRETS 2004*

[5] SETRA
Emissions routières de polluants atmosphériques - Courbes et facteurs d'influence
*2009*

# Politiques de mobilité et dynamiques urbaines : les nouveaux enjeux de l'accessibilité pour la modélisation

Yves Crozet, Aurélie Mercier, Nicolas Ovtracht
Laboratoire d'Economie des Transports (Université de Lyon – CNRS)

**Dans le contexte du développement d'une « éco-mobilité » visant à résoudre (partiellement) les problèmes de congestion et à reconquérir les centres urbains, la communication ci-après présente l'apport de la modélisation pour comprendre l'interaction entre politiques de mobilité et dynamiques spatiales en milieu urbain. La mesure de l'accessibilité, qui associe le coût (monétaire et temporel) du déplacement à la localisation des activités (emplois, commerces, logements…) permet, lorsqu'elle est intégrée à une plateforme de modélisation telle MOSART (Modélisation et Simulation de l'Accessibilité aux Réseaux et aux Territoires), de tester la résilience de la mobilité à des chocs économiques sur la base de scénarios. Une hausse du prix du carburant et la mise en place d'un péage urbain, ainsi que leur impact sur les termes de la concurrence modale entre automobile et transports en commun, sont deux scénarios présentés.**

## Contexte

En France, depuis le début des années 90, les politiques de transport en milieu urbain sont passées d'un objectif de maximisation de la vitesse de déplacement à une « éco-mobilité » visant à optimiser la consommation d'espace urbain. Ce nouveau regard sur l'utilisation et l'aménagement de l'espace urbain nous amène à reconsidérer la question de l'arbitrage entre vitesse de déplacement (Metz 2008) [8] et densité urbaine. Pour répondre aux contraintes de rareté de l'espace, de congestion et aux exigences de développement durable, les gains de temps ne sont plus la priorité des politiques urbaines.

Cette réorientation politique vise non seulement à résoudre (partiellement) les problèmes de congestion mais plus généralement à reconquérir les centres urbains et lutter contre l'étalement urbain par le biais d'un accroissement des densités. Dans ce contexte, le concept d'accessibilité gravitaire (Hansen 1959, Geurs 2004) [4-6], en associant le coût (monétaire et temporel) du déplacement à la localisation des activités (emplois, commerces, logements…), s'avère pertinent pour modéliser l'interaction entre politiques de mobilité et dynamiques spatiales en milieu urbain. Face à des contraintes croissantes tant au niveau environnemental qu'à l'échelle spatiale, une analyse en termes d'accessibilité appréhende les dynamiques urbaines à partir des opportunités atteintes par les individus en considérant un système de transport et une structure urbaine (Bertolini et *al.*, 1999) [2]. Notre travail s'intéresse à l'accessibilité aux emplois : si les déplacements domicile-travail ne représentent que 19 % des déplacements quotidiens sur le périmètre de l'Enquête Ménages Déplacements 2006, ils structurent les emplois du temps voire les choix de localisation des individus (Levinson, 1998 [7] ; Giuliano, 1992 [5]).

## Objectifs

La présente communication s'intéresse ainsi aux apports d'une modélisation en termes d'accessibilité pour comprendre l'interaction entre politiques de mobilité et politiques urbaines. Pour ce faire, elle utilise la plateforme MOSART (Modélisation et Simulation de l'Accessibilité aux Réseaux et aux Territoires), un outil d'aide à la décision dans le cadre de politiques de transport et d'aménagement du territoire. L'étude se décompose en deux parties. L'ensemble des résultats sont développés à l'échelle de l'aire urbaine de Lyon.

## Application au cas de l'aire urbaine de Lyon

La **première partie** de l'étude illustre l'impact d'une hausse du coût des déplacements automobiles sur la concurrence modale entre automobiles et transports en commun pour

accéder aux emplois et, de ce fait, sur un possible retour à la densité. L'idée est ainsi de mettre en place une taxe de sorte que le litre du carburant, qui a atteint son plus haut niveau à 1,3 € le litre (de gasoil), serait, dans notre simulation, facturé aux automobilistes à 3 €. Nous considérons que cette taxe est progressive et qu'elle n'influence pas les choix de déplacements des automobilistes. Sous cette hypothèse, un prix du litre de carburant de 3 € se traduit par un accroissement du coût monétaire moyen de 18 % par rapport au coût de référence et un accroissement du coût marginal de 64 %. Le différentiel d'accessibilité entre auto-mobiles et transports en commun présente une structure comparable à celle observée en situation de référence. Elle traduit néanmoins une dégradation du niveau d'accessibilité automobile. Les zones pour lesquelles l'impact à été le plus fort sont localisées dans une première couronne à l'extérieur du périmètre du Grand Lyon, principalement dans le secteur nord-est de l'aire d'étude ainsi que le secteur nord-ouest. Un fort accroissement du prix du carburant se traduit, pour ces zones, par une accessibilité meilleure en transports en commun qu'en voiture particulière. Le réseau ferré régional qui les dessert, « performant » tant en termes de cadence que de vitesse, explique ce résultat. Toutefois, moins d'une centaine de zones voit les termes de la concurrence modale s'inverser : plus de 90 % des zones présente un différentiel favorable à l'automobile, 1 % présentent une accessibilité comparable et moins de 8 % un différentiel favorable aux transports en commun. Les zones présentant un différentiel favorable aux transports en commun sont toujours situées à l'extérieur du Grand Lyon, et ce bien que ce dernier dispose d'un réseau de transports en commun qui semble performant. L'explication réside dans la portée du réseau urbain et notre périmètre d'étude. De fait, notre aire d'étude qui est l'aire urbaine de Lyon s'étend bien au-delà des limites du périmètre des transports urbains de l'agglomération lyonnaise et la portée des déplacements dépasse bien souvent la zone couverte par les transports urbains. Depuis Lyon ou Villeurbanne, ce sont ainsi plus de 60 % des liaisons qui ne peuvent être réalisées intégralement en transports urbains. Par ailleurs, malgré son niveau de congestion, le réseau routier et autoroutier offre des vitesses de déplacement au moins comparables à celle des transports en commun urbains (Bonnafous et *al.*, 2009) [3].

La **seconde partie** de l'étude s'inscrit dans le « paradigme d'une mobilité durable » (Banister 2008). Elle simule la mise en place d'un péage de zone sur le périmètre des communes de Lyon et Villeurbanne (soit environ 62 km²). Deux variantes sont envisagées : tandis que dans un premier temps un péage de 3 € est appliqué à tous les déplacements à destination de Lyon-Villeurbanne (y compris les déplacements internes), dans un second temps un péage différencié est introduit et les déplacements internes à la zone ne s'acquittent plus que de 10 % de la somme (le même montant reste appliqué aux autres déplacements). Un péage de zone « uniforme » de 3€ appliqué à tous les déplacements se traduit pour les automobilistes par une baisse de l'accessibilité aux emplois de 22 %. Toutefois, toutes les zones ne sont pas concernées dans les mêmes proportions. Trois types de zones peuvent être identifiés :

- Les zones centrales localisées au sein des communes de Lyon et Villeurbanne connaissent un fort déclin de leur niveau d'accessibilité aux emplois avec une baisse de 25 %. En effet, depuis ces zones centrales, les temps d'accès aux zones densément peuplées en emplois sont faibles (temps moyen de 12 minutes). Dès lors, appliquer un péage de 3 € correspondant à un accroissement du temps de parcours de 12 minutes, accroît le coût généralisé de 37 % pour les déplacements originaires de Lyon-Villeurbanne. Le péage de zone ne se traduit pas par une baisse de trafic significative suffisante pour compenser la hausse du coût monétaire.
- Les zones localisées dans la 1ère couronne connaissent une baisse de l'accessibilité aux emplois comprise entre 8 % et 25 %.
- Les zones localisées à l'extérieur du Grand Lyon connaissent un niveau d'accessibilité inchangé.

L'introduction d'un péage différencié, avec un tarif préférentiel pour les actifs localisés à Lyon ou Villeurbanne, génère une baisse de l'accessibilité aux emplois de l'aire urbaine de 5 %. (Figure 2 – droite). Tandis que l'accessibilité reste stable pour les résidents de la zone centrale, on observe, pour les actifs localisés en première couronne, une perte d'accessibilité moindre que le cas d'un péage unique et ce, en raison d'une répartition du trafic différente sur les tronçons routiers.

**Figure 1 :** Différentiel d'accessibilité entre voitures particulières (VP) et transports en commun (TC) suite à une hausse du coût carburant

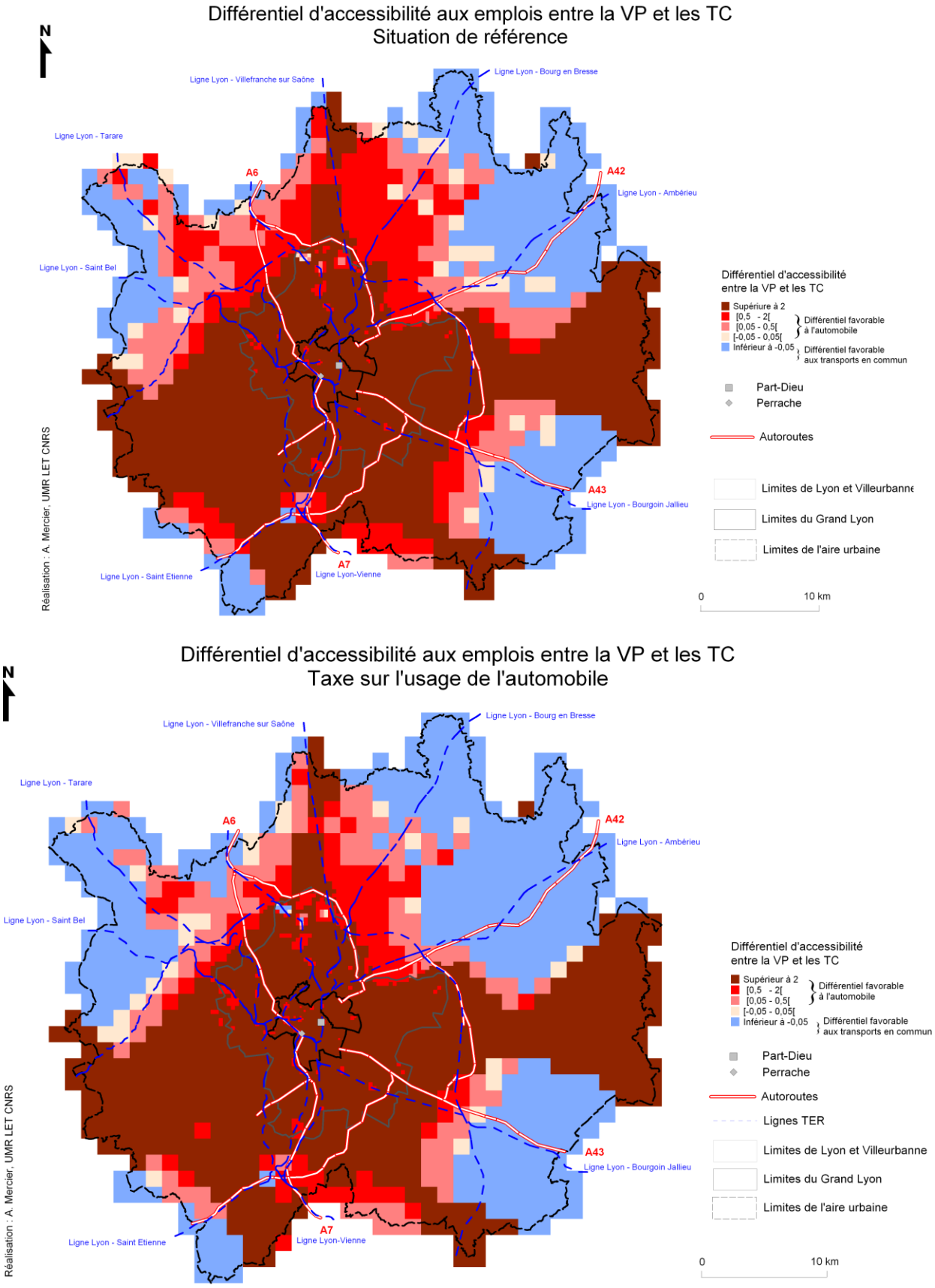
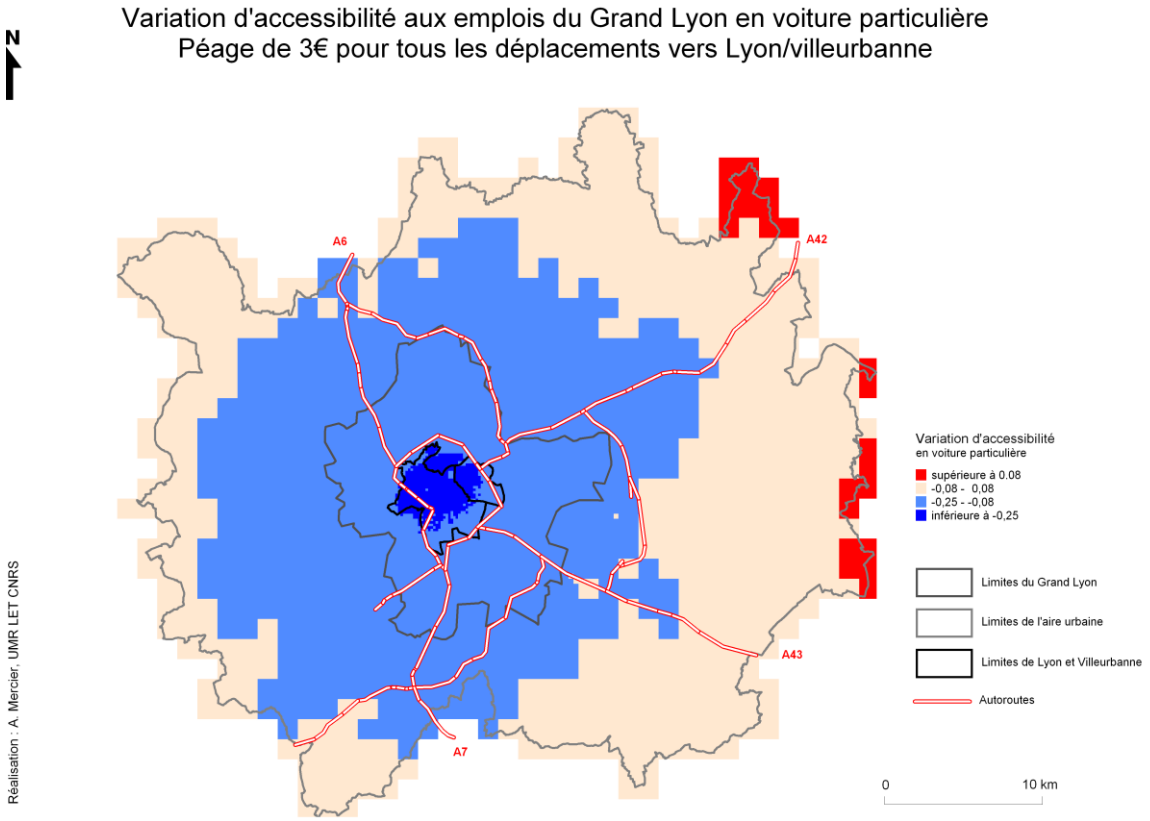
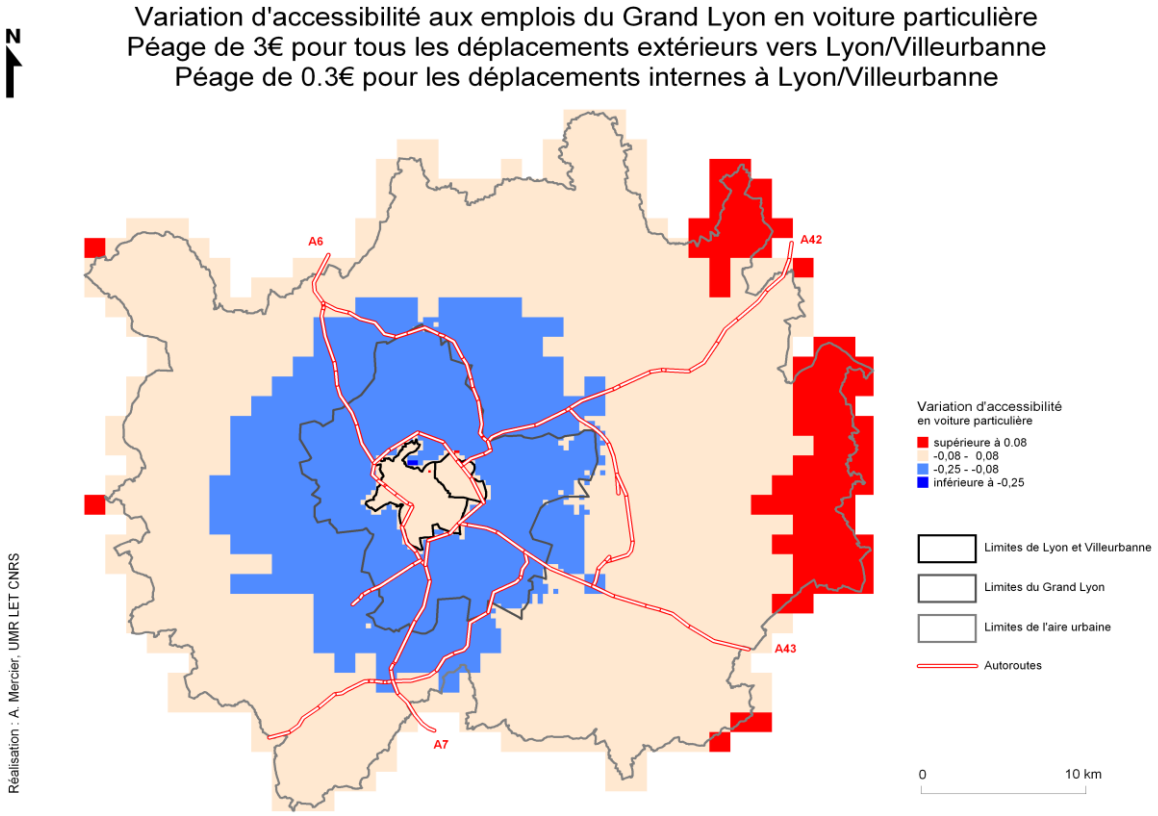


**Figure 2 :** Différentiel d'accessibilité entre voiture particulière et transports en commun



**Remerciements**
Les résultats présentés dans cet article ont été en partie obtenus dans le cadre du projet « MOSART : un prototype d'outil d'aide à la décision individuelle et collective pour une mobilité durable », financé par le PREDIT.

## Bibliographie

[1] Banister D.
The sustainable mobility paradigm
*Transport Policy 15, 2008, pp.73-80*

[2] Bertolini L.
Spatial development patterns and public transport: the application of an analytical model in the Netherland
*Planning Practise and Research* 14 (2), 1999, pp 199-210

[3] Bonnafous A., Crozet Y. et *al.*
MOSART : un prototype d'outil d'aide à la décision individuelle et collective pour une mobilité durable
*Rapport final pour le compte du PREDIT, 2009*

[4] Geurs K. T., Van Wee G. P.
Accessibility evaluation of land-use and transport strategies : review and research directions
*Journal of Transport Geography 12, 2004, pp 127-140*

[5] Giuliano G.
Is job-housing balance a transportation issue ?
*Transportation Research Record 1305, 1992, pp. 305-312*

[6] Hansen W. G.
How accessibility shapes land use
*Journal of the American Institute of Planners 25, 1959, pp.73-76*

[7] Levinson D. M.
Accessibility and the journey to work
*Journal of Transport Geography 6 (1), 1998, pp. 11-21*

[8] Metz D.
The myth of travel time saving
*Transport Review 28(3), 2008, 321–336*

# Diagnostic économique d'un réseau de transports en commun complexe sur une grande agglomération : le cas de l'agglomération francilienne

François Combes
Université Paris-Est, Laboratoire Ville Mobilité Transport
Rob van Nes
Transport and Planning Section, Faculty of Civil Engineering and Geosciences, TU Delft

**Les grandes agglomérations sont dotées de réseaux de transport complexes, routiers, ferroviaires ou autres. Pour le diagnostic et l'aide à la décision à une échelle stratégique de ces réseaux, il est utile d'opter pour une approche relativement agrégée. Ce travail livre quelques éléments de réflexion sur la manière dont les réseaux de transports en commun d'Île de France peuvent être représentés via des variables agrégées décrivant leurs caractéristiques (espacement des lignes, espacement des arrêts, fréquences). Cette représentation permet de mesurer la performance socio-économique générale de ces réseaux en prenant en compte les déplacements multimodaux (et donc les interdépendances entre les modes). Il permet également d'identifier des pistes pour l'amélioration de l'efficacité de ces réseaux.**

## Introduction

Les grandes agglomérations sont généralement dotées de réseaux de transports complexes, routiers, ferroviaires ou autres, offrant aux voyageurs de nombreuses possibilités de déplacements via des modes privés ou en commun. Ces réseaux de transport doivent être planifiés car les processus de construction d'infrastructure et de déploiement de services sont lents, chers, peu réversibles, et engendrent des impacts spatiaux, économiques, sociaux et environnementaux lourds.

Un certain nombre d'outils existent pour l'aide à la décision au niveau local. Des modèles de prévision de la demande, couplés à des évaluations telles que l'analyse socio-économique, permettent dans une certaine mesure de départager les différentes options envisagées pour des projets tels que la construction d'un nouvel axe de transport, la mise en place d'une nouvelle ligne de transport en commun ou le prolongement d'une ligne existante. Cependant, la portée de ces outils est limitée à la modification marginale d'un système déjà en place dont la pertinence est mesurée à l'aune d'un scénario "fil de l'eau", complètement déterminé par l'existant.

Pour la planification globale d'un système de transports encore en projet, dans une agglomération en croissance rapide par exemple, ou pour évaluer un système de transports existant dans son ensemble, il serait utile de disposer d'un modèle permettant un diagnostic global. Un tel outil est développé dans cette étude, et appliqué au cas du système des transports en commun de l'agglomération francilienne.

## Principes de modélisation agrégée d'un système de transport multimodal complexe

Le choix de ce qui doit être représenté dans un tel modèle, et de la manière de le représenter, est délicat. En effet, un système de transport est un objet complexe. Il comprend plusieurs réseaux, plusieurs modes, offre plusieurs fonctions et les combinaisons à la disposition des voyageurs pour effectuer leurs déplacements sont très nombreuses. Il serait très difficile de procéder à l'optimisation globale d'un tel système en gardant le niveau de détail que l'on trouve classiquement dans les outils de simulation, et ce pour des raisons théoriques, de précision des données, d'incertitudes sur les évolutions à venir, et d'algorithmique (notons en particulier que l'optimisation globale d'un réseau de transport, qui plus est hiérarchisé, pour répondre à une certaine demande de transport est un problème très complexe ; tout au plus observe-t-on des propriétés plus ou moins génériques d'auto-organisation).

Une manière de surmonter ces difficultés est d'opter pour une approche agrégée. C'est l'approche choisie pour la construction du modèle présenté ici. Ce modèle a les caracté-

ristiques suivantes : il s'agit d'un modèle à caractère microéconomique, dans lequel la dimension spatiale n'est représentée que grossièrement ; les services de transport sont représentés par quelques variables stratégiques décrivant ces services dans leur ensemble (écartement moyen des arrêts, fréquence, vitesse, écartement des lignes) ; la demande est décrite en termes de distances de transport, origines et destinations, et période de trajet (pointe/heure creuse). Enfin, le modèle construit dans le cadre de ce travail est concentré sur les réseaux de transports en commun.

Dans la construction du modèle, on accorde beaucoup d'importance au fait que soient représentées les relations entre les différents réseaux et services. Ces relations peuvent être de complémentarité spatiale (ils ne desservent pas les mêmes zones), de substitution (l'un ou l'autre de ces deux modes est utilisé), de complémentarité fonctionnelle (un mode lent et dont le réseau est dense permet des déplacements courts mais il offre aussi l'accès à un mode rapide dont le réseau est diffus permettant de franchir de grandes distances - ce type de combinaisons correspond au déplacement multimodal). A l'échelle du modèle, ces relations jouent un rôle important. En cela, ce type de modèle constitue un progrès par rapport aux autres modèles similaires que l'on trouve, par exemple, dans la littérature internationale.

## Spécifications microéconomiques

Les hypothèses d'ordre microéconomique concernent essentiellement la production et la demande de services de transport public. La demande de transport est classiquement considérée comme effectuant ses choix sur la base de coûts généralisés, ceux-ci prenant en compte la vitesse commerciale des services disponibles, leur fréquence, la distance moyenne parcourue à bord et la distance moyenne pour rejoindre les stations à pied depuis les origines et les destinations. Ce principe s'étend facilement aux déplacements multimodaux.

Du côté de l'offre, les spécifications sont également très simples. On distingue les coûts de construction et de maintenance d'infrastructure ; les coûts d'achat, de maintenance et d'opération des véhicules. Ces coûts dépendent du nombre de kilomètres d'infrastructure linéaire construite, du nombre de stations, et du nombre de véhicules nécessaire pour assurer la fréquence demandée, étant donnée la longueur des lignes et la vitesse commerciale de ces véhicules

## Aide à la décision : usages et portée du modèle

Le diagnostic du système de transport en commun s'effectue en examinant l'impact qu'a une variation du système sur ses usagers et sur ses coûts. Cette variation peut être l'augmentation de la fréquence d'un mode donné dans une certaine zone, la réduction de l'espacement des arrêts dans une autre zone. Si l'une de ces variables est modifiée, cela change les coûts de production (infrastructure, maintenance, exploitation) des services de transport en commun, et cela change leur performance du point de vue des usagers. La variation pour les usagers est mesurée en temps total de transport, et éventuellement en terme de surplus collectif lorsque des niveaux supérieurs de décisions sont pris en compte, tels que le choix de mode et les décisions de se déplacer ou non. Ces deux derniers niveaux sont plus compliqués à mettre en œuvre et nécessitent plus de données. Dans tous les cas, pour l'examen de l'impact marginal d'une modification du système de transport, supposer que la demande de transport est exogène est valide dans un premier temps.

Dans le cadre de ce travail, on applique les principes exposés ci-dessus à l'agglomération francilienne. La demande de transport est décrite sur la base de l' Enquête Globale Transport (EGT) 2001, et celle de l'offre à partir de données d'offre et de coûts. A partir de ces données, le modèle est construit en distinguant trois zones – Paris, la Petite Couronne et la Grande Couronne – et plusieurs modes de transport, parmi lesquels le bus, le métro, le RER et le train régional. L'objectif est alors de diagnostiquer le système de transport en répondant notamment à deux grandes questions : premièrement, quel serait le système de transport en commun idéal d'après le modèle ? Deuxièmement, l'existant est-il significativement différent, et moins efficace, que cet idéal théorique ?

## Bibliographie

[1] Daganzo C. F.
Structure of competitive transit networks
*Transportation Research Part B (2010) 44 pp. 434-446*

[2] Levinson D., Yerra B.
Self organisation of surface transportation networks
*Transportation Science (2006) 40(2), pp. 179-188*

[3] van Goeverden C. D., van Nes R.
Hierarchy in public transport networks, the case of Amsterdam
*Proceedings of the 11th WCTR, 2007*

[4] van Nes R.
Design of multimodal transport networks, a hierarchical approach
*Ph. D. Thesis, 2002*

[5] van Nes R., Bovy P. H. L.
The importance of objectives in urban transit network design
*Transportation Research Record (2000) 1735, pp. 25-34*

[6] Yerra B., Levinson, D.
The emergence of hierarchy in transportation networks
*The Annals of Regional Science (2005) 39 pp. 541-553*

# Étalement des emplois et déplacements domicile-travail dans un modèle urbain monocentrique

Vincent Breteau, Fabien Leurent
Université Paris-Est, LVMT, Ecole des Ponts ParisTech, IFSTTAR

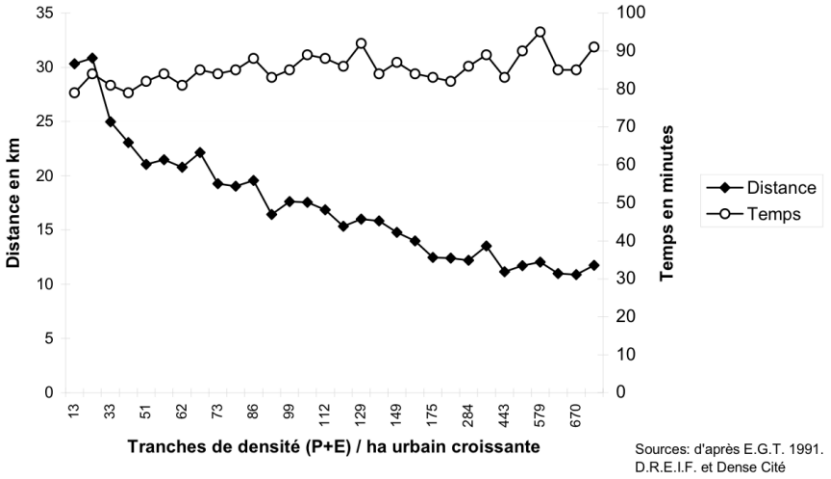
**La répartition spatiale des emplois influence la forme urbaine autant que celle des résidences. Pour étudier l'influence des uns sur les autres, ainsi que sur les distances parcourues et les temps de transport, nous avons développé un modèle économique urbain de type monocentrique. Nous supposons que l'emploi est distribué de manière exogène et que chaque ménage, en fonction du lieu d'emploi de son actif, choisit la surface et le lieu de son logement. En variant la distribution des emplois et la forme des coûts de transport, nous avons obtenu trois configurations urbaines bien distinctes : une ville quasi-monocentrique où le coût de transport augmente avec l'éloignement du centre, une ville « excentrique » où la dépendance est décroissante, et à mi-chemin une ville « déconcentrée » qui ressemble à la situation francilienne.**

## Introduction

L'étalement urbain est souvent considéré, de manière restreinte, comme un étalement purement résidentiel. Les lotissements pavillonnaires de banlieue en sont alors l'archétype. Pourtant, l'étalement urbain concerne également les emplois et plus largement les activités, même si leur dynamique est généralement moins marquée que celle des logements. Certains auteurs, par exemple Glaeser et Kahn [6], évoquent cet aspect et Bruegman [2] considère même qu'il peut atténuer les effets délétères de l'étalement urbain en termes de distances parcourues.

Afin de mieux comprendre les mécanismes de l'étalement urbain, d'autres auteurs ont étudié les liens entre densité, distance parcourue et coût du transport (en particulier temporel). Ainsi, Fouchier [3], dans une analyse sur l'Île-de-France, montre que si la distance parcourue chaque jour par les ménages franciliens diminue avec la densité de leur lieu d'habitation, le temps passé dans les transports est relativement stable, et même tend à augmenter avec la densité (Figure 1).

**Figure 1 :** Distance et temps de déplacement par individu et par jour en Île-de-France [3]




Complémentairement, Genre-Grandpierre [5] montre que la vitesse moyenne de déplacement augmente avec la portée des déplacements, et que cette dernière diminue avec la densité. Au total, le constat est le suivant : les ménages localisés dans des zones peu denses, donc loin du centre de la ville, parcourent des distances plus grandes mais passent autant voire moins de temps en déplacement que les ménages localisés au centre de la ville. Ce constat est important, car il met en évidence un moteur possible à l'étalement urbain : lorsqu'en s'éloignant du centre les ménages

bénéficient non seulement de prix immobiliers plus faibles mais encore d'un coût privé de transport plus faible. En Île de France, les distances parcourues sont plus élevées en s'éloignant du centre, ainsi que les nuisances associées aux moyens de transport utilisés (pollution, gaz à effet de serre, plus forts pour la voiture individuelle que les transports collectifs).

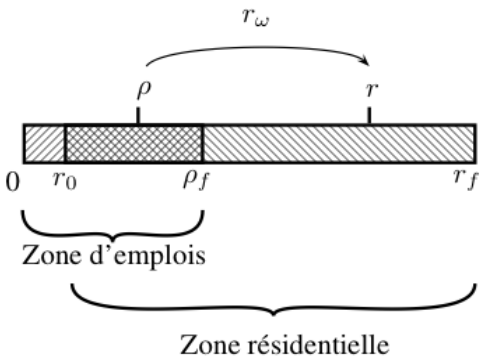
Jusqu'à présent, la théorie économique urbaine ne s'est pas intéressée à cette distinction entre distance domicile-travail et coût de transport. En effet, son modèle standard, le modèle monocentrique (*e.g.* [4]) polarise les emplois en un centre unique ponctuel et le coût de transport y est généralement assimilé à une fonction affine de la distance au centre. C'est pourquoi nous avons développé un modèle d'équilibre urbain de moyen terme dans lequel les emplois sont distribués, de manière exogène, au sein d'une zone d'emplois. Les ménages choisissent ensuite leur localisation en considérant leur lieu d'emploi comme fixé. La distance que chaque ménage doit franchir pour se rendre sur son lieu de travail dépend donc à la fois de sa localisation résidentielle et de son lieu d'emploi. De plus, nous avons considéré un coût marginal (unitaire) différent au centre et en périphérie urbaine, permettant de rendre compte, par exemple, de l'existence de hauts niveaux de congestion au centre des villes et d'infrastructures routières rapides en périphérie.

Nous avons étudié, à partir de notre modèle, la manière dont les paramètres pouvaient influencer la relation entre l'évolution des distances parcourues et celle des coûts de transport. Nous avons ainsi obtenu trois types de configurations urbaines, chacune engendrant une relation particulière entre distances parcourues et coûts de transport : quasi-monocentrique, excentrique et déconcentrée. Cette dernière configuration permet d'expliquer le constat de Fouchier sur l'Île-de-France.

## Le modèle et sa résolution

Nous modélisons une ville constituée d'une zone d'emplois centrale de rayon $\rho_f$ au sein de laquelle les emplois sont distribués de manière exogène, et d'une zone résidentielle s'étendant de $r_0$ exogène à $r_f$ endogène. Notre variable d'analyse fondamentale est le « rayon » noté $r$, *i.e.* la distance entre le logement et le centre de la ville. Nous notons $r = r_\omega(\rho)$ la localisation résidentielle d'un ménage dont l'emploi se situe en $\rho$ ; symétriquement, un ménage résidant en $r$ a son emploi en $\rho = \rho_\omega(r)$. Le coût de transport subi par tout ménage dépend de sa localisation résidentielle et de la localisation de son emploi, et s'écrit $T(\rho,r)$, avec $\partial T / \partial \rho < 0$ et $\partial T / \partial r > 0$. Nous avons de plus distingué $\partial T / \partial \rho$ et $\partial T / \partial r$.

**Figure 2 :** Hypothèses de répartition spatiale




Nous avons montré [1] qu'un équilibre urbain existe dans le cas général, qu'il est unique, et caractérisé par un système différentiel reliant la rente foncière $R(r)$, le coût de transport $T(\rho,r)$, la densité résidentielle $h(r)$ et la capacité foncière $L(r)$ :

$$\begin{cases} R'(r) = -\dfrac{\partial T(\rho_\omega(r),r)}{\partial r} \Big/ \hat{s}(R, I_{\rho,r}), \\ h(r) = L(r) \big/ \hat{s}(R, I_{\rho,r}) \end{cases} \qquad (1)$$

Où $\hat{s}(R,I_{\rho,r})$ est la demande non compensée de surface, $I_{\rho,r}$ étant le revenu net des coûts de transport. Nous avons résolu analytiquement ce système dans un cadre simplifié en donnant des formules fermées pour les diverses variables caractéristiques.

## Trois types d'organisation urbaine

Le modèle nous sert à étudier les variations conjointes de la distance parcourue par un ménage pour se rendre à son emploi et du coût de transport (a priori surtout temporel) qu'il subit en fonction de la localisation résidentielle (donc du rayon). Nous nous concentrons donc sur la distance parcourue, $D(r) = r - \rho_\omega(r)$, et le coût de transport $T(r) = T(\rho_\omega(r), r)$. On étudie ainsi conjointement les signes de :

$$\frac{d\hat{D}(r)}{dr} = 1 - \rho'_\omega(r) \ ; \qquad (2)$$

$$\frac{d\hat{T}(r)}{dr} = \frac{\partial T}{\partial \rho}\left[\rho'_\omega(r) + \frac{\partial T/\partial r}{\partial T/\partial \rho}\right]. \qquad (3)$$

Dans l'équation (3), par construction, $\partial T / \partial \rho < 0$ et $\partial T / \partial r > 0$. Par conséquent, les signes de ces deux expressions sont indéterminés, et dépendent du type d'organisation urbaine.

### *La ville quasi-monocentrique*

Si la ville présente un desserrement des logements par rapport aux emplois, *i.e.* si $\rho'_\omega \leq I$, l'équation (2) implique que les distances parcourues croissent avec le rayon. Si les transports présentent une *massification* en centre ville (grâce à un système performant de transport collectif par exemple) en y réduisant le coût unitaire, *i.e.* si $|\partial T / \partial \rho| \leq \partial T / \partial r$, alors l'équation (3) implique que le coût de transport croît avec le rayon. Cette organisation est « quasi-monocentrique » car distances et coût de transport y évoluent comme dans le modèle monocentrique standard[1], même avec une répartition spatiale des emplois.

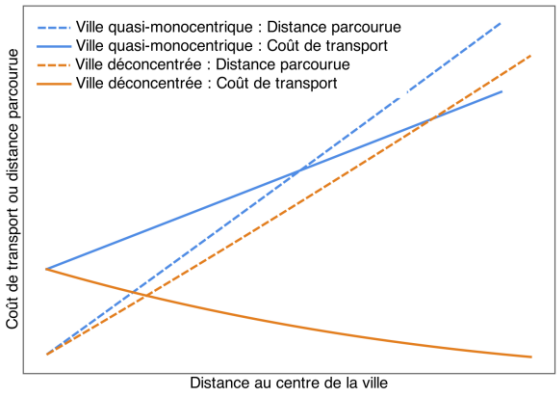
### *La ville excentrique*

À l'inverse, si la ville est caractérisée par un *resserrement* des logements par rapport aux emplois, *i.e.* si $\rho'_\omega \geq I$, l'équation (2) implique que la distance parcourue croît avec le rayon. Supposons de plus que le système de transport présente une forte *congestion* en centre ville avec un coût unitaire de transport plus élevé, *i.e.* $|\partial T / \partial \rho| \geq \partial T / \partial r$. L'équation (3) implique alors que le coût de transport décroît avec le rayon. Nous qualifions cette organisation « d'excentrique » du fait de son caractère pour le moins original. Ce type d'organisation est susceptible d'émerger dans une situation où le coût unitaire de transport est partout très élevé et encore plus dans le centre, les emplois étant pour leur part relativement dispersés.

### *La ville déconcentrée*

Considérons enfin une situation intermédiaire dans laquelle les logements sont desserrés par rapport aux emplois (comme dans la ville quasi-monocentrique) et où le centre ville connaît une forte congestion (comme dans la ville excentrique). Les équations (2) et (3) montrent alors qu'on peut aboutir à une configuration que nous qualifions de « déconcentrée » : la distance parcourue augmente avec le rayon tandis que le coût de transport diminue. Ainsi, ce schéma d'organisation urbaine rend compte du constat de Fouchier pour l'Île-de-France, et notre modèle fournit une explication théorique de cet état de fait.

**Figure 3 :** Distance et coût de transport pour deux organisations urbaines




[1] On pourra noter que le modèle monocentrique standard représente en fait le cas limite des hypothèses de desserrement des logements et de massification des transports : lorsque la zone d'emploi est ponctuelle, les logements sont infiniment desserrés par rapport aux emplois, et le coût de transport dans la zone d'emploi est nul.

## Conclusion

La théorie économique urbaine repose en grande partie sur le modèle monocentrique de localisation résidentielle, qui est réducteur à bien des égards. Nous avons montré l'importance de capturer la répartition spatiale des emplois dans la ville afin de rendre compte des consommations de transport entre domicile et travail en distinguant la distance et le coût. La répartition des emplois supporte celle des résidences et permet d'augmenter la satisfaction des habitants. Elle est corrélée nécessairement au coût de transport, mais pas nécessairement aux distances parcourues ni aux émissions de nuisances : l'impact écologique dépend non seulement de la configuration des établissements mais encore des moyens de transport disponibles localement.

## Bibliographie

[1] Breteau V. et Leurent F.
Housing and commuting in an extended monocentric city
*Conférence « Public Policies and Industrial Organization in the City », Lille Juin 2010, Hal 00505490,* http://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00505490/fr/

[2] Bruegman R.
Sprawl : A Compact History
*University of Chicago Press 2005, Chicago, Illinois*

[3] Fouchier V.
Les densités urbaines et le développement durable. Le cas de l'Île-de-France et des villes nouvelles
*Edition du SGVN 1997, Paris*

[4] Fujita M.
Urban Economic Theory: Land Use and City Size
*Cambridge University Press 1989, New York*

[5] Genre-Grandpierre C.
Des réseaux lents contre la dépendance automobile ? Concept et implications en milieu urbain
*L'Espace Géographique Vol. 2007-1, pp. 27-39, 2007*

[6] Glaeser E. L., Kahn M. E.
Decentralized employment and the transformation of the American city
*Brookings-Wharton papers on Urban Affairs pp. 1-63, 2001*

# Accessibilité et prix immobiliers : le cas du Grand Lyon

Pierre-Yves Péguy, Nicolas Ovtracht
Laboratoire d'Economie des Transports, UMR CNRS 5593 - Université Lumière Lyon 2 – ENTPE

**Le développement des transports collectifs au sein des grandes villes sous la forme de métro, de tramways, de bus a induit une modification de l'accessibilité pour les ménages. Il s'agit alors d'estimer économétriquement, d'après la méthode des prix hédoniques, les niveaux d'élasticité prix accessibilité en transports collectifs vs voitures particulières dans le cas du Grand Lyon sur la période 1997-2008.**

## Contexte et objectifs

Les villes françaises, en particulier les plus grandes, ont sensiblement accru, au cours des dernières décennies, leur niveau d'offre de transports collectifs par des investissements conséquents en matériel et une réorganisation des services qui se sont traduits par une croissance en termes de véhicules.kilomètres, de places.kilomètres offertes, de fréquences et de vitesse commerciale.

Ainsi, dans le cas du Grand Lyon, après la construction de plusieurs lignes de métro de la fin des années 70 à la fin des années 90, le syndicat des transports de l'agglomération lyonnaise (SYTRAL) a financé, en tant qu'autorité organisatrice, la réalisation de lignes de tramway ferroviaire. Les deux premières lignes ont été mises en exploitation en 2001. Depuis cette date, ces dernières ont été prolongées. Deux autres lignes nouvelles ont également été mises en service dernièrement.

Cette nouvelle offre de transport public a induit une modification des niveaux d'accessibilité au sein de l'agglomération. Les quartiers nouvellement desservis ont généralement enregistré des temps d'accès plus favorables aux principaux pôles de l'agglomération au regard de la situation antérieure du réseau des transports en commun (TC) mais aussi relativement au réseau routier.

L'objectif est d'évaluer si ces niveaux d'accessibilité, aussi bien en transports collectifs qu'en voiture particulière, sont capitalisés au niveau des prix immobiliers.

Les travaux sur cette question sont relativement peu nombreux en France relativement à ceux menés en Amérique du Nord. On peut néanmoins citer, entre autres, le cas de l'aménagement urbain sur les prix contemporains (Beckerich 2000) [1] ; le cas de l'accessibilité sur les prix anciens XIXème (Clémençon, Ovtracht, Péguy 2003) [4] ; le cas de la construction d'un périphérique en milieu urbain avec le tronçon périphérique nord de Lyon (Deymier 2005) [5] ; le cas de la mise en service du tramway Val de Seine (H. Jayet, S. Kazmierczak 2003, Boucq 2008) [7].

## Cadrage théorique et méthodologie

### *Modèle standard de l'économie urbaine et modèle hédonique*

Le modèle standard de l'économie urbaine considère comme déterminantes dans le choix de localisation des ménages au niveau urbain les variables des prix des logements, des coûts de transport généralisé et des aménités centrales et environnementales[1].

Le logement est un bien hétérogène et indivisible. Il diffère très largement dans l'espace et ses différentes caractéristiques ne sont pas isolables lors du choix de localisation.

La modélisation hédonique se donne pour objectif d'évaluer les effets propres de ces caractéristiques sur le niveau du prix. Rosen (1974) [9] formalise la formation des prix des caractéristiques. Ces derniers ne sont pas immédiatement observables sur un marché mais passent par des « marchés implicites » caractérisés par des niveaux d'offre et de demande propres et différents selon les caractéristiques. Il s'agit alors de déterminer une fonction de prix hédonique du logement qui est une fonction des prix « hédoniques » des caractéristiques du bien résidentiel.

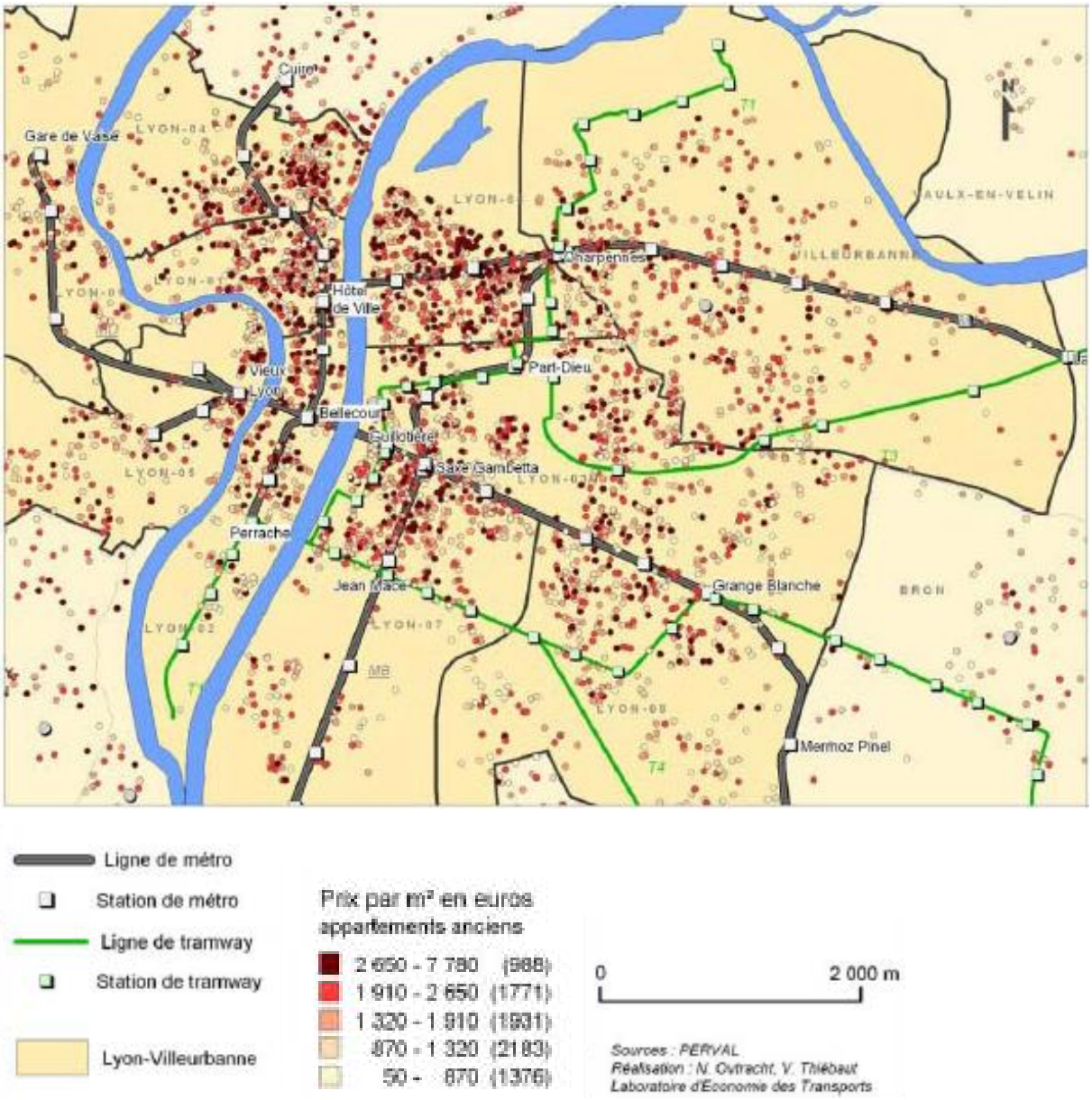
Le modèle testé économétriquement est de la forme suivante :

$$\log P = \alpha \log surf + \beta \log accessibilité + yX + \mathcal{E}$$

[1] On peut se référer pour une présentation détaillée du modèle de l'économie standard à l'article Péguy, Goffette-Nagot, Schmitt, (1999).

où $P$ représente les prix des logements ; surf, la surface du logement considéré ; « accessibilité », l'accessibilité en transports collectifs ou en voiture particulière ; $X$, un vecteur renvoyant aux autres caractéristiques du logement considéré ; et $\varepsilon$ les résidus.

**Figure 1 :** Zoom sur la localisation des transactions immobilières et lignes de transports collectifs en site propre (TCSP) au niveau de Lyon-Villeurbanne




## *La plate-forme MOSART*

L'évaluation des effets potentiels des modifications d'accessibilité liées aux transports collectifs en milieu urbain nécessite de travailler à une échelle fine. La plate-forme MOSART (Modélisation et Simulation de l'Accessibilité aux Réseaux et aux Territoires)[2], développée par le Laboratoire d'Economie des Transports (LET), reconstitue au sein d'un système d'information géographique (SIG) l'ensemble des réseaux de transport aussi bien en voiture particulière qu'en transports collectifs. Pour ces derniers, les éléments pris en compte sont l'ensemble des lignes, les arrêts, les correspondances, les fréquences et les horaires.

Les informations sur les prix des logements, sur leurs caractéristiques ainsi que sur leur localisation sont issues des transactions

[2] Projet labellisé en 2007 par le pôle de compétitivité Lyon Urban Truck & Bus (LUTB)

notariées saisies dans la base PERVAL. Les tests économétriques portent sur 4500 transactions de logements collectifs anciens sur la période 1997-2008. Trois pôles ont été sélectionnés a priori au sein de l'agglomération (Figure 1) : Part-Dieu, Perrache et Bellecour.

## Résultats

**Tableau 1 :** Résultats des modèles (extraits sur les variables surf et accessibilité)

| | Perrache | Bellecour | Part-Dieu |
|---|---|---|---|
| | Coefficient | Coefficient | Coefficient |
| Surface (log) | 1,0341*** | 1,0070*** | 1,0291**** |
| Temps de parcours en voiture particulière (minutes) – heure de pointe (log) | -0,1740*** | -0,2451*** | -0,1597 |
| Temps de parcours en transports collectifs (minutes) – (log) | -0,1806*** | -0,2160*** | -0,1290*** |
| Temps de parcours en tramways (minutes) – (log) | -0,0601*** | -0,1305*** | -0,1281*** |
| Temps de parcours en métro (minutes) – (log) | -0,1302*** | -0,2086*** | -0,0807*** |

Signification code : 0 '***', 0,001 '**', 0,01 '*', 0,1 '·', ' ' 1

Les estimations produites sur les trois hubs retenus sont largement significatives. Les modèles indépendamment des modes de transport retenus expliquent plus de 80 % de la variance totale du logarithme des logements. Pour un très grand nombre d'entre elles, les variables sont significatives dans les différents modèles testés.

Concernant la surface du logement, les élasticités obtenues sont légèrement supérieures à l'unité. Elles sont proches de celles obtenues par Boucq (2008) [2] dans le cas des logements du Val de Seine. Dans ce dernier cas, l'élasticité prix de la surface était de 1,08.

Les indicateurs d'accessibilité temps sont également très significatifs aussi bien ceux exprimés sur la base des déplacements en voiture particulière en heure de pointe que ceux exprimés pour le métro, le tramway ou les transports collectifs dans leur ensemble. Ce résultat se singularise par rapport à ceux obtenus dans d'autres travaux (Gravel et *al.* 2002 [6] ; Boucq 2008 [2]) qui observaient que la variable relative à l'accessibilité routière était généralement non significative. Cette différence provient selon nous de deux facteurs. Les travaux mentionnés portent sur les départements de l'Ile de France pour lesquels la densité des réseaux de transports collectifs est plus élevée que dans le cas du réseau lyonnais. Cette différence de développement du réseau se double d'une différence de niveau de congestion, beaucoup plus élevé dans le cas parisien que dans le cas lyonnais qui incite à un report modal en direction des TC. En outre, la construction des variables d'accessibilité temps a fait l'objet dans la présente recherche d'une attention particulière. On peut donc considérer que par rapport à d'autres travaux, ces variables d'accessibilité temporelles sont particulièrement représentatives.

Les élasticités-prix du temps de transport diffèrent selon les pôles retenus et les modes de transport. Pour les déplacements en voiture particulière en heure de pointe, elles sont comprises entre -0,24 et -0,06. Une augmentation de 1 % du temps de parcours en voiture particulière se traduit par une baisse des prix comprise entre -0,24 % et -0,06 %.

En termes de transports collectifs au sens large (dans le cas présent, l'utilisateur retient aussi bien les bus, le métro et le tramway pour ce rendre à l'un des pôles retenus), ces élasticités sont là aussi significatives. Elles sont plus faibles que celles obtenues pour les déplacements en transport individuel en heure de pointe. Ces valeurs sont proches de celles obtenues par Jayet et al.

(2003) [7] qui avaient une valeur d'élasticité prix au temps de transport en TC de -0.14 dans le cas du tramway Val de seine. En sélectionnant le tramway ou le métro comme mode de déplacement principal, les élasticités sont légèrement plus faibles que celles obtenues pour les transports collectifs dans leur ensemble.
Plusieurs améliorations des modèles testés sont à faire tant dans la prise en compte des phénomènes d'autocorrélation spatiale que dans la caractérisation plus fine des aménités et des quartiers. Enfin, la compréhension de l'évolution des prix immobiliers sous l'effet d'une modification de l'accessibilité urbaine sur une période séculaire serait instructive pour les travaux de prospective sur le devenir urbain.

## Bibliographie


[1] Beckerich C., 2000
Biens publics et valorisation immobilière
*Thèse de doctorat en sciences économiques, Université Lyon 2, Laboratoire d'Economie des Transports, 290p.*

[2] Boucq E., 2008
Evaluation économique d'une infrastructure de transport en milieu urbain
*Thèse de doctorat. Université des sciences et technologies de Lille*

[3] Cavailhes J., 2005
Le prix des attributs du logement
*Economie et Statistique,* 381-382, pp.91-123

[4] Clemençon A.-S., Ovtracht N., Péguy P.-Y., 2003
Une analyse économique et architecturale des formes urbaines–Lyon au XIX$^{eme}$ siècle
*rapport final, Contrat ISH, 53 p*

[5] Deymier G., 2005
Capitalisation immobilière des gains d'accessibilité : étude de cas sur l'agglomération lyonnaise
*Thèse de doctorat en sciences économiques, Université Lyon 2, Laboratoire d'Economie des Transports, 373p.*

[6] Gravel N., Trannoy A., Michelanglia, 2002
Measuring the social value of local public goods : a hedonic analysis within Paris Metropolitan area
*Working paper 82, Univesità commerciale Luigi Bocconi, Econpubblicca, Center for research on public sector*

[7] Jayet H., Kazmierczak S, 2003
La mesure de l'impact des infrastructures de transports sur les prix de l'immobilier par la méthode des prix hédonique : le cas du tramway val de seine et de l'autoroute A14
*Communication à l'ASRDLF sept. 2003, Lyon*

[8] Péguy P.-Y, Goeffette-Nagot F., Schmitt B., 2000
L'étalement urbain
*in Economie géographique – Approches théoriques et empiriques*, *BAUMONT C., Combes P.- P., Derycke P.-H., Jayet H., (Eds). Paris. Economica. 38p.*

[9] Rosen H. S., 1974
Hedonic Prices and implicit market : product differenciation in pure competition
*Journal of Political Economy,* 82, pp.34-55

# - B -

# Phénomènes physiques et environnements urbains

# Modélisation de la propagation acoustique en milieu urbain : approches ondulatoires

Christophe Ayrault, Jean-Baptiste Doc, Simon Félix, Bertrand Lihoreau, Miguel Molerón, Vincent Pagneux, Adrien Pelat, Olivier Richoux
IRSTV, FR CNRS 2488, LAUM, CNRS, Université du Maine
Judicaël Picaut
IRSTV, FR CNRS 2488
IFSTTAR, Groupe EASE

**La possibilité de simuler et de prévoir les ambiances sonores urbaines, objet d'une demande croissante des pouvoirs publics et des collectivités, suppose, du fait de la complexité du problème, un travail en amont de description et de quantification des phénomènes physiques mis en jeu dans la propagation du son en milieu urbain. A cette fin, nous développons plusieurs modèles reposant sur une description ondulatoire de la propagation, liant les propriétés acoustiques du milieu urbain à ses principales caractéristiques : une forte densité du bâti, l'ouverture des rues vers le ciel, la géométrie complexe des façades, l'hétérogénéité de l'air comme milieu de propagation, et la morphologie globale d'un quartier. Deux formulations sont décrites dans la présente communication, chacune reposant sur une description originale de la rue comme un guide d'ondes ouvert : une méthode multimodale et une approximation unidirectionnelle de l'équation d'ondes.**

## Modèles de propagation acoustique : intégrer la complexité du milieu urbain

Le bruit en ville est un problème de société important. Il existe une demande forte, tant des citoyens qui souhaitent une réduction du niveau sonore urbain, que des pouvoirs publics et des collectivités qui souhaitent disposer d'outils de prévision et de mesure fiables des ambiances sonores urbaines.

Suite à la loi « bruit » (N° 92-1444) du 31 décembre 1992, impulsant les premiers travaux sur la pollution sonore urbaine, la directive européenne 2002/49/CE impose depuis peu aux villes de plus de 250 000 habitants (100 000 à l'échéance 2012) la réalisation de cartographies des niveaux de bruit. D'autre part, le comité opérationnel « bruit » (N°18) du Grenelle de l'environnement, dans son rapport remis en mars 2008, mentionne comme l'une des principales missions des observatoires du bruit (engagement 158) la recherche et le développement de méthodologies sur la cartographie et la définition d'indicateurs pertinents. Les politiques publiques d'aménagement de l'espace urbain, consécutives aux campagnes actuelles de cartographies des villes européennes (Plans de Prévention du Bruit dans l'Environnement (PPBE), Plans de Déplacement Urbain (PDU)), auront enfin pour conséquence la nécessité de ré-élaborer périodiquement ces cartographies, avec toujours une exigence plus grande sur leur fiabilité, compte tenu notamment du coût des aménagements que ces plans peuvent engager.

Des méthodes de référence, notamment la NMPB « Nouvelle Méthode de Prévision du Bruit » pour la France, ou Harmonoise, méthode européenne, sont définies pour le calcul de la propagation en milieu extérieur, et les logiciels de cartographies proposent des méthodes de calcul conformes à ces recommandations. Ces logiciels sont couramment utilisés pour la cartographie des niveaux de bruit dans les villes, et offrent à l'heure actuelle un bon compromis précision/efficacité. Toutefois, ces méthodes sont développées pour la prévision du bruit routier en environnement interurbain ou péri-urbain et présentent par conséquent un certain nombre de limitations dans le contexte urbain, qui diffère fondamentalement de ces autres environnements sur plusieurs points.

- **Une structure dense et complexe :** le milieu urbain se caractérise par une forte densité du bâti, et un réseau de rues – où le bruit, essentiellement, est émis et propagé – de structure complexe. Or l'approche géométrique des méthodes de référence se base sur une recherche de chemins entre la source et le récepteur, préalablement au calcul physique de la propagation du son. Cette recherche n'est robuste que si le nombre de réflexions par des obstacles est faible et le chemin « simple », ce qui n'est plus le cas en milieu urbain.

- **Une grande hétérogénéité :** du fait de la morphologie des façades, de l'encombrement dans les rues (véhicules, mobilier urbain), la rue comme lieu de propagation du son est un milieu très hétérogène, limitant encore la robustesse d'une approche géométrique ou conduisant à des temps de calcul prohibitifs.
- **Des effets particuliers de micro-météorologie :** toujours du fait de la morphologie particulière du milieu urbain, les effets météorologiques, aérodynamiques ou thermiques, peuvent être significativement différents de ceux plus couramment étudié en milieu extérieur « ouvert » (péri- ou interurbain). Or ces effets sont encore peu étudiés, pas plus que leur influence sur l'acoustique[1].
- **Une « zoologie » propre de sources sonores**, liée aux activités humaines et aux véhicules, légers, lourds, ou transports collectifs, dont le trafic et la vitesse sont aussi propres au milieu urbain.

Enfin, les méthodes de référence ne peuvent, par nature, prendre en compte l'aspect fondamentalement ondulatoire de la propagation du son et les effets interférentiels complexes qui en résultent. De même, elles ne sont pas adaptées à modéliser la propagation des basses fréquences, qui contribuent pourtant de façon non négligeable à la gêne.

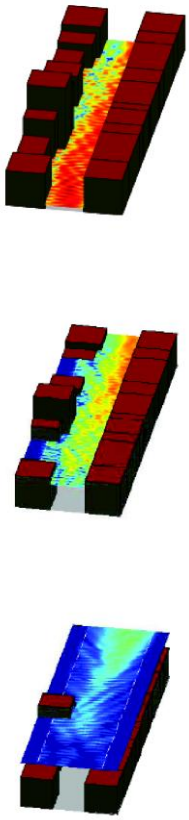
L'environnement urbain présente donc une grande complexité, et l'influence de ses caractéristiques sur la propagation du bruit doit être mieux appréhendée et comprise pour mettre en œuvre des outils de prévision du bruit adaptés ou préconiser des solutions d'aménagement de l'espace urbain.

Les études sur la propagation acoustique en milieu urbain publiées à ce jour privilégient, pour partie, des approches énergétiques ou statistiques – tirs de rayon, particules sonores – qui omettent par conséquent l'aspect fondamentalement ondulatoire du problème. Les alternatives, pour l'essentiel, reposent sur des simulations numériques classiques – éléments finis ou de frontière, différences finies – dont l'interprétation physique est peu aisée. En outre, ces méthodes sont restreintes à des domaines haute fréquence (méthodes énergétiques) ou très basses fréquences (simulations numériques).

D'autre part, la morphologie du milieu urbain est rarement prise en compte dans sa globalité, tant à cause de difficultés théoriques, que du coût numérique de son intégration dans un outil de simulation.

Compte tenu des questions scientifiques ouvertes et des enjeux actuels du bruit dans la ville, l'objectif des travaux présentés est le développement d'une description ondulatoire de la propagation du son dans un milieu urbain, qui permette une compréhension « physique » des phénomènes mis en jeu, en prenant en compte la complexité géométrique du milieu, en en distinguant plusieurs caractéristiques essentielles : l'ouverture de la rue sur le ciel, la géométrie complexe des façades, l'hétérogénéité de l'air comme milieu de propagation et la morphologie globale d'un quartier. Deux approches sont notamment développées : une formulation modale de la propagation, où la rue est représentée comme un guide d'onde, et une formulation par approximation de l'équation d'onde en une équation de propagation unidirectionnelle.

Champ de pression, à différentes hauteurs, dans une rue [2



[1] Cet aspect particulier fait l'objet du projet de recherche EM2PAU, dans le cadre de l'IRSTV, financé par la Région des Pays de la Loire (2008-2011). Partenaires : LCPC (dir. sci. Judicaël Picaut), LMF, LAUM.

## Descriptions ondulatoires de la propagation

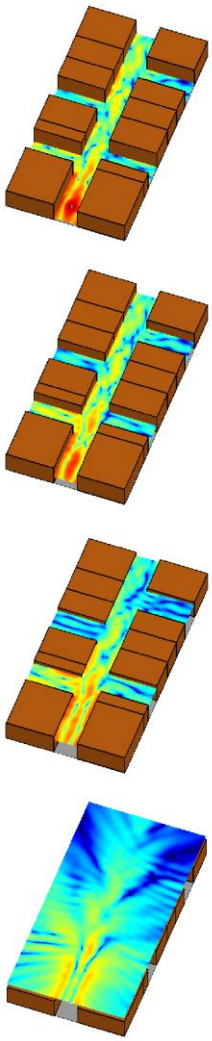
### *Approche modale*

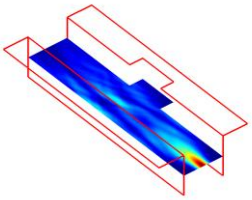
La rue de type « canyon » étant considérée comme un guide d'ondes ouvert dans lequel une onde acoustique est susceptible de se propager, on s'intéresse à une formulation multimodale de la propagation dans ce guide. Adaptation à ce cas complexe de méthodes couramment utilisées pour l'étude de guides d'ondes classiques, cette approche, moins coûteuse qu'une méthode numérique telle que les éléments finis, permet une description précise du rayonnement au-dessus de la rue et la prise en compte de la complexité géométrique d'une rue (façades, raccordement à d'autres rues, etc.) [1-3].

### *Approximation unidirectionnelle*

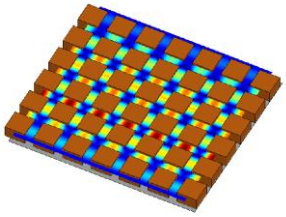
Lorsque l'irrégularité géométrique du guide représentant la rue et l'hétérogénéité du milieu sont faibles ou évoluent lentement à l'échelle de la longueur d'onde, l'équation d'onde peut être ramenée à une équation de propagation unidirectionnelle. Seules les ondes se propageant dans un sens et autour d'une direction privilégiés sont décrites par cette nouvelle équation, avec pour conséquence une réduction importante du coût numérique des calculs [4].

Champ de pression, à différentes hauteurs, dans une rue avec intersections.





Approximation unidirectionnelle du champ dans une rue irrégulière



Champ acoustique dans un réseau régulier de rues [3]

Ce travail bénéficie d'une aide de l'Agence Nationale de la Recherche portant la référence ANR-09-JCJC-0009-01, projet Jeunes Chercheurs « AcouVille ».

## Bibliographie

[1] Pelat A., Félix S., Pagneux V.
On the use of leaky modes in open waveguides for the wave propagation modeling in irregular open waveguides
*J. Acoust. Soc. Am Vol. 126, n° 6, décembre 2009, pp. 2864-2872*

[2] Pelat A., Félix S., Pagneux V.
A coupled modal-finite element method for the wave propagation modeling in irregular open waveguides
*J. Acoust. Soc. Am. Vol. 129, n° 3, mars 2011, pp. 1240-1249*

[3] Moleron M., Félix S., Pagneux V., Richoux O., Picaut J.
Application of the modal-FE method to the study of open periodic lattices
*Forum Acusticum 2011 – Aalborg – Denmark juin 2011*

[4] Doc J.-B., Lihoreau B., Félix S.
One-way approximations for the wave propagation in irregular waveguides
*Forum Acusticum 2011 – Aalborg - Denmarkjuin 2011*

# Approche simplifiée de la réalisation de cartographies sonores de grandes agglomérations à l'aide d'un logiciel SIG

Judicaël Picaut, Nicolas Fortin
Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux (IFSTTAR)

**Le travail présenté dans cet article s'inscrit dans le cadre plus général d'un projet de recherche ANR portant sur l'évaluation des impacts environnementaux d'un plan de déplacement urbain (PDU) et de leurs conséquences socio-économiques (Eval-PDU). En particulier, l'une des tâches de ce projet consiste à étudier l'impact d'un PDU sur l'environnement sonore. À cet effet, nous proposons une approche simplifiée permettant de produire des cartes de bruit plus rapidement qu'avec des outils classiques, approche également plus adaptée à l'évaluation de l'impact environnemental de plusieurs scénarii de PDU. La méthode repose sur une simplification des calculs d'émission et de propagation acoustique du trafic routier dans l'environnement urbain. Par ailleurs, plusieurs solutions d'optimisation ont été proposées de manière à diminuer les temps de calcul. Enfin, l'intérêt majeur de l'approche repose sur l'utilisation d'un logiciel SIG pour la production intégrale des cartes de bruit (calculs acoustiques et représentation graphique).**

## Contexte

Dans le cadre de la directive européenne 2002/49/CE sur l'évaluation et la gestion du bruit dans l'environnement, les agglomérations de plus de 100 000 habitants doivent désormais réaliser leurs cartes de bruit de manière, notamment, à établir des plans d'actions en matière de lutte contre le bruit. En milieu urbain et périurbain, ces plans d'actions peuvent prendre différentes formes : changement de revêtements de chaussés, mise en place d'écrans acoustiques, réduction des vitesses de circulation, déviation du trafic, réalisation d'aménagements urbains, mise en place de nouvelles politiques de transport public… En principe, dans un souci d'efficacité, la mise en place de tels plans d'actions nécessite au préalable l'évaluation de leur effet, c'est-à-dire la réalisation de simulations acoustiques, pour leur comparaison éventuelle. La logique voudrait donc que ces études soient réalisées avec les mêmes outils que ceux utilisés pour la réalisation des cartes de bruit dans le cadre de la directive européenne. Toutefois, la réalisation de ces simulations, reposant sur des méthodes de calcul standardisées, est encore aujourd'hui un travail fastidieux, que ce soit en raison de la collecte de l'ensemble des données d'entrée (trafic, bâti), que de la réalisation même des calculs (plusieurs jours à plusieurs semaines). Si plusieurs plans d'actions doivent être testés, les temps de réalisation deviennent dès lors extrêmement importants.

## Objectifs

Dans le cadre du projet ANR Eval-PDU pîloté par l'IRSTV,[1] sur l'évaluation des impacts environnementaux d'un PDU et de leurs conséquences socio-économiques (avec une application à l'agglomération nantaise), une méthode alternative a été proposée pour la réalisation de cartographies sonores. Cette méthode est basée sur le développement d'une approche simplifiée de prévision acoustique, intégrée directement au logiciel de SIG développé par l'IRSTV, OrbisGIS (http://www.orbisgis.org/). Cette méthode repose dans un premier temps sur la réalisation d'un « cadastre » d'émission sonore. La propagation acoustique est réalisée en considérant les contributions du champ direct, du champ réfléchi (réflexions spéculaires) et du champ diffracté.

Il est important de noter que cette démarche, bien que proche à première vue de celle proposée dans le cadre du projet européen IMAGINE[2] (utilisation d'un logiciel SIG couplé à un logiciel de prévision acoustique « classique »), est réellement différente. Dans

[1] Institut de Recherche en Sciences et Technique de la Ville, FR CNRS 2488.

[2] Projet européen IMAGINE (http://www.imagine-project.org/)

notre approche, le calcul « acoustique » est réalisé intégralement au sein du logiciel SIG. Par ailleurs, les méthodes mêmes de calcul sont simplifiées par rapport aux méthodes de référence utilisées dans le projet IMAGINE. De ce fait, la réalisation des cartes de bruit est d'une part, plus rapide, et d'autre part, effectuée intégralement avec un unique outil logiciel (OrbisGIS).

## Descriptif de la méthode

### *Décomposition du domaine en sous-domaines*

Dans un premier temps, en raison de l'étendue du domaine de calcul (*i.e.* une agglomération dans son intégralité), une décomposition du domaine en sous-domaines a été réalisée (Figure 1), les données géographiques étant issues de la base de données BD TOPO® (IGN). Chaque sous-domaine a ensuite donné lieu à un maillage fin et adaptatif pour construire le réseau de points de calcul (points récepteurs), assurant la continuité entre sous-domaines et un raffinement à proximité des voies de circulation.

**Figure 1 :** Décomposition en sous-domaines (à gauche) et maillage d'un sous-domaine (à droite)

### *Construction du « cadastre » d'émission sonore*

Dans un second temps, un « cadastre » d'émission sonore, sous forme d'un réseau de sources ponctuelles, est construit pour chaque point de calcul. Plus précisément, ce cadastre est élaboré à partir des informations produites par le modèle de trafic développé par un autre partenaire du projet (CETE Ouest). Ce modèle permet ainsi de décrire la cinématique des véhicules (véhicules légers et poids-lourds) sur un réseau principal (5 000 km, avec une description fine des données de trafic) et secondaire (15 000 km, avec une représentation moyenne du trafic). La création et la caractérisation des sources sonores ponctuelles est quant à elle largement inspirée du guide d'émission sonore des sources de bruit routier, édité par le Sétra.[3] La méthode repose sur une décomposition des lignes sources (*i.e.* flux de trafic) en points sources, en considérant quelques simplifications concernant la prise en compte de la nature et l'âge des revêtements de chaussées, les tronçons de redémarrage, l'allure des véhicules et la répartition entre trafics de véhicules légers et poids-lourds sur les différentes périodes horaires.

Une des particularités de notre approche repose sur le fait que le réseau de points sources est construit pour chaque point de calcul et non pour l'ensemble des points de réception. Ceci permet de réduire le nombre de points sources à considérer pour chaque point de calcul. Par ailleurs, pour limiter les calculs, seules les sources sonores situées dans un rayon critique centré sur chaque point de calcul ont été considérées. Enfin, la « continuité » entre sous-domaines de calcul est assurée puisque, pour un point de calcul donné dans un sous-domaine, sont également considérées les sources « actives » des sous-domaines adjacents.

[3] Service d'études sur les transports, les routes et leurs aménagements (Sétra). « Prévision du bruit routier - 1 - Calcul des émissions sonores dues au trafic routier », Guide technique, Juin 2009.

### *Construction de la carte de bruit*

La troisième partie de la méthode consiste à produire les cartes de bruit à partir du cadastre d'émission sonore. Le champ sonore total en un point de calcul est alors obtenu en sommant les différentes contributions du champ sonore direct, du champ réfléchi spéculairement sur les façades (à l'ordre *n*) et du champ diffracté (diffraction à l'ordre *n*). Ces calculs nécessitent en parallèle la réalisation de « tests de visibilité » entre chaque couple de points source-récepteur (Figure 2). Étant donné le coût important de ces tests en termes de temps de calcul, une procédure d'optimisation a été développée. La méthode est basée sur l'utilisation d'un maillage « secondaire » du sous-domaine, adapté aux tests de collisions entre un rayon sonore et le bâti. L'émission acoustique des sources sonores étant définie par bande de fréquence, il est ensuite nécessaire de calculer le niveau sonore global en cumulant les résultats issus de chaque bande. Enfin, les cartographies sonores obtenues pour chaque sous-domaine, sont recomposées pour construire la cartographie générale à l'échelle du domaine de calcul (Figure 2). À titre d'illustration, la réalisation d'une carte de bruit sur la commune de Nantes (65 x $10^6$ m²) nécessite de considérer 346 millions de points sources pour 1,7 millions de points de calcul, pour un temps de calcul d'environ 1h 20 (calcul du champ direct et du champ réfléchi à l'ordre 1, sur une station de calcul PC double cœur 2.13 GHz fonctionnant sous linux).

**Figure 2** : Illustrations du calcul du champ sonore (en haut) et d'une carte de bruit (en bas)

### *Validation de l'approche*

La validation quantitative des cartes de bruit ainsi obtenues est toutefois difficile à réaliser. La solution consisterait à comparer les cartes de bruit ainsi produites avec les cartes de bruit « de référence » réalisées avec les outils classiques. Cependant, la nature des données d'entrée étant différente, cette comparaison s'avère difficile. Par ailleurs, la pertinence d'une telle comparaison est également discutable dans la mesure où ces cartes de bruit « de référence » n'ont souvent pas été validées elles-mêmes, ni avec des mesures, ni avec d'autres outils de simulation. De ce fait, et revenant dans le cadre même du projet ANR Eval-PDU, l'intérêt des cartes de bruit produites avec la méthode simplifiée proposée ici, réside plutôt dans la comparaison qualitative de plusieurs scénarii de plans de déplacements urbains, de façon à en identifier les « grandes » différences, étant entendu que, pour être significatifs, ces écarts doivent être de l'ordre de plusieurs décibels.

## Conclusion

En conclusion, nous avons proposé une approche alternative pour la production de cartes de bruit, simplifiée par rapport aux approches classiques, et dont l'intérêt réside, d'une part, dans l'utilisation d'un seul outil de simulation (OrbisGIS), d'autre part, dans la rapidité de réalisation des cartes de bruit, et enfin dans la facilité de comparaison de plusieurs scénarii de PDU.

**Remerciements**
Ce travail est soutenu par l'Agence nationale de la recherche (ANR), dans le cadre du projet Eval-PDU (Programme « Villes durables » 2008, contrat ANR-08-VILL-0005).

# Évaluation du potentiel solaire urbain à l'échelle de la France

Elie Ghanassia
EDF R&D Département EnerBat, UTC Laboratoire Avenues-GSU
Marie-Hélène Laurent
EDF R&D, Département EnerBat
Mindjid Maizia
Université de Tours, Laboratoire CITERES
Benoit Beckers
Laboratoire AVENUES-GSU, Université de Technologie de Compiègne

**Notre étude porte sur le potentiel de récupération d'énergie solaire en zone urbaine résidentielle française (villes et zones urbaines rurales). Dans cette optique, nous avons déterminé une qualification des différents tissus urbains en considérant des typologies de bâtiments ainsi que des typologies de quartier. Ces tissus types ont ensuite été utilisés afin de déterminer, à l'aide d'un logiciel de calcul, le potentiel énergétique solaire pour les huit zones climatiques définies par la réglementation thermique. Les résultats ont été agrégés sur l'ensemble du territoire afin de déterminer la quantité de kilowatt heures d'énergie solaire reçus en France chaque année dans les zones urbaines. Quelques résultats seront présentés à l'échelle régionale et nationale, en insistant sur les avantages et les limitations du modèle topologique utilisé.**

## Introduction

L'objet de cette étude est d'évaluer le gisement solaire physique présent en zone urbaine résidentielle. Il s'agit d'estimer la quantité d'énergie reçue par les parois des bâtiments (façades et toitures). Nous désignerons, par la suite, le gisement solaire physique par le terme ″potentiel solaire″. Les travaux mentionnés ici concernent uniquement les constructions du secteur résidentiel. La méthodologie adoptée ainsi que les résultats régionalisés sont présentés.

## Reconstitution du parc de bâtiments français et calcul de leur potentiel solaire

Afin d'évaluer le potentiel solaire, il est nécessaire de caractériser les zones urbaines géométriquement sur l'ensemble du territoire. Pour ce faire, nous avons opté pour une méthode de reconstitution d'un parc de bâtiments résidentiels virtuel avec différentes étapes de calcul sur lesquelles il est possible d'intervenir rapidement. Elle se décompose en quatre stades (détaillés par la suite).

- Croisement des données entre Corine Land Cover (CLC) [1], une base ne présentant pas un niveau de précision satisfaisant pour notre étude mais disponible sur toute la France, et le Mode d'Occupation des Sols[1] (MOS), une autre source d'informations plus précise selon nos critères, mais disponible pour un territoire limité, l'Ile de France.
- Identification des typologies de bâtiments puis de plans de masse (plusieurs typologies de bâtiments formant des quartiers types) qui constitueront une nouvelle base de données. Nous avons identifié 22 types de bâtiments résidentiels et 20 types de plans de masse pour ces bâtiments.
- Calcul du potentiel solaire sur les différents plans de masse pour différentes zones climatiques représentatives en France.
- Agrégation des résultats à l'échelle régionale puis nationale.

Toute la difficulté réside dans le fait de trouver une source d'information sur la géométrie des zones urbaines qui soit à la fois assez précise et disponible sur toute la France métropolitaine. Nous avons choisi d'utiliser CLC 2006 car il s'agit de la base la plus récente qui recouvre l'ensemble du territoire. La plus petite unité spatiale cartographiée est de 25 hectares,

[1] Cf. le site de l'IAU (Institut d'Aménagement et d'Urbanisme) : http://www.iau-idf.fr/cartes/base-de-connaissance/mos.html (consulté le 18/01/11).

d'où la qualification de « grossière » pour un travail au niveau du quartier. La nomenclature de l'occupation du sol de CLC est hiérarchisée en plusieurs catégories (ou postes). Nous ne nous intéresserons qu'aux tissus denses continus et discontinus (les deux premiers postes de CLC). Ils recouvrent en surface la totalité des zones résidentielles bâties. Nous utilisons donc CLC en raison de cet avantage.

L'IAU d'Ile de France tient à la disposition du public le MOS. Il est constitué de 83 postes et la maille de représentation est à l'échelle de quelques bâtiments. Nous avons, à l'aide d'un système d'information géographique, décomposé spatialement les deux variétés de CLC en celles du MOS et calculé les parts relatives de ces dernières par rapport à la surface totale de CLC traitée. Seules les catégories représentant plus de 1 % des zones urbaines ont été conservées, ce qui revient à traiter environ 80 % de la surface des deux zones de CLC qui nous intéressent.

Aux nomenclatures du MOS, qui correspondent aux zones résidentielles, sont attribués des plans de masses types [2]. L'étude ne concerne que les 20 plans de masse sélectionnés pour les zones résidentielles. Sur ceux-ci est calculée la quantité annuelle d'énergie solaire reçue par les parois pour les huit zones climatiques définies dans la réglementation thermique française de 2005. Nous avons choisi le programme informatique RADIANCE enrichi de l'interface PPF [3]. Ce traceur de rayon est couramment utilisé pour ce type de calcul et donne des résultats qui ont bénéficié de validations dans la littérature scientifique[2]. En outre, les traceurs de rayons permettent de modéliser les réflexions avec une grande précision et d'obtenir d'excellents résultats visuels.

La difficulté inhérente à l'usage d'un tel outil est le temps de calcul extrêmement long. Il varie avec le nombre de réflexions solaires atteignant les parois, fixé à deux par défaut dans PPF. Par rapport à un calcul sans réflexions, la différence observée sur le potentiel calculé est d'environ 20 % pour les façades et 5 % pour les toitures. Ce résultat reflète le choix du coefficient de réflexion de 0.2 (part du rayon incident réfléchi) défini par défaut dans PPF [3]. Nous avons également observé que le gain de deux réflexions par rapport à une seule est extrêmement limité puisqu'inférieur à 2 % pour toute paroi.

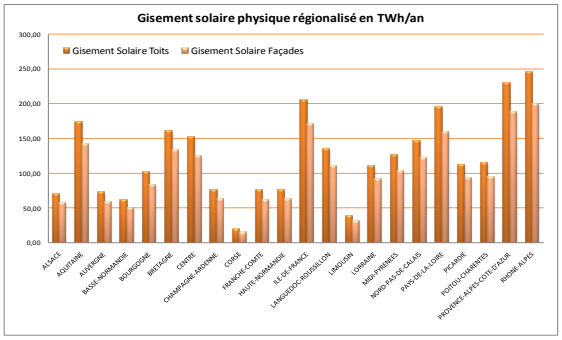
[2] Cf. notamment Reinhart et Walkenhorst : Validation of dynamic RADIANCE-based daylight simulations for a test office with external blinds. Energy and Buildings 33 (2001), 683-697

## Résultats

En toute logique, les régions du sud présentent les valeurs les plus importantes (*cf.* Figure 1). Toutefois, certaines régions plus au nord ont des potentiels assez élevés. Deux paramètres importants influencent les résultats : la quantité d'énergie solaire reçue par chaque région, présentée pour 7 régions dans le Tableau 1, et la densité urbaine, qui détermine le nombre de bâtiments par unité de surface. Ainsi des régions comme PACA bénéficient d'apports solaires importants alors que d'autres, comme l'Ile de France, compensent des apports solaires moindres par une densité plus importante.

Le potentiel solaire total pour la France est d'un peu moins de 5000 TWh/an (dont 2700 TWh/an pour les toitures). Ce chiffre fournit une borne supérieure pour la quantité d'énergie captable par les infrastructures bâties des zones urbaines résidentielles. Il faut préciser que ni les contraintes surfaciques ni la rentabilité des panneaux solaires ne sont prises en compte. En comparaison, la consommation d'énergie de chauffage en France dépasse[3] les 383 TWh, soit 14 % environ des 2700 TWh.

**Figure 1 :** Résultats pour le gisement solaire physique des zones urbaines résidentielles par région




[3] Valeur donnée par les Ponts Formations d'Énergie Demain en décembre 2009.

**Tableau 1 :** Résultats pour le gisement solaire physique surfacique des zones urbaines résidentielles pour 7 régions

| Gisement en kWh/m²/an | Alsace | Bretagne | Corse | IDF | PACA | Picardie | Rhone-Alpes |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Toitures | 984,15 | 1031,25 | 1342,33 | 976,99 | 1339,16 | 981,47 | 1069,95 |
| Façades | 534,14 | 561,16 | 722,15 | 518,57 | 711,87 | 532,95 | 568,64 |

## Conclusion et perspectives

Les travaux présentés dans cet article ont permis d'évaluer le potentiel solaire reçu par les infrastructures bâties des zones urbaines. Une étude de l'INES[4] estime ce potentiel aux environs de 10000 TWh/an, mais il est basé sur une surface de 10600km² de toiture donnée par l'IFEN (Institut Français de l'Environnement, renommé depuis SOeS). En réalité, il s'agit de la surface artificielle bâtie dont le périmètre n'est pas clairement défini. Notre étude fait plutôt état de près de 2700 km² de surface de toiture. Si l'on considère le nombre de bâtiments résidentiels en France et la surface moyenne de l'emprise au sol, on obtient un peu plus de 2600 km² de surface bâtie, ce qui correspond bien aux résultats de notre étude.

Une validation de cette méthode à partir d'indicateurs tels que le nombre de bâtiments comptés par le Recensement Général de la Population en France est en cours. Il donne une erreur de moins de 5 % pour toute la France mais présente des disparités régionales. Il existe plusieurs explications possibles à ces disparités. Les plans de masse types présents en Ile de France ne sont pas nécessairement représentatifs des autres régions. Toutefois, pour les formes des emprises au sol et le nombre de niveaux des bâtiments ainsi que le coefficient d'occupation au sol (COS), diverses configurations ont été choisies afin de résoudre cette difficulté. Des explications plus plausibles sont la taille du pixel de CLC, qui peut exclure des bâtiments, et la répartition des postes du MOS dans CLC, qui n'est pas exactement la même dans toutes les régions. Un recalibrage par rapport à des indicateurs comme le nombre de bâtiments recensés permet de réévaluer cette composition pour chaque région.

## Bibliographie

[1] Degron R.
La mesure de l'étalement urbain.
*La revue du CGDD, Les indicateurs de développement durable, janvier 2010*

[2] Bordes-Pagès E.
Densités et formes urbaines.
*Publications de l'Institut d'Aménagement et d'urbanisme d'Ile de France (IAU), 1995*

[3] Compagnon R.
Solar and daylight availability in the urban fabric
*Energy and Buildings 36 (4), 321-328 de Lausanne, 4-5 September 2007, p. 547-552*

[4] Cf. le site de l'Institut National de l'Énergie Solaire : http://www.ines-solaire.com/solpv/page1.html

# Définition d'un modèle géométrique urbain pour la simulation du potentiel solaire

Diana Rodríguez, Aurélie Prévost
Laboratoire AVENUES - GSU, Université de Technologie de Compiègne
Nathalie Molines
Laboratoire AVENUES - GSU, Université de Technologie de Compiègne
CRENAM – (CNRS -UMR 5600), Université de Saint Etienne
Benoit Beckers
Laboratoire AVENUES - GSU, Université de Technologie de Compiègne

**L'objectif principal de ce travail est de définir le bon niveau de détail d'un modèle 3D urbain pour la simulation du rayonnement solaire, ce qui implique de considérer les pentes des toits (potentiel photovoltaïque et thermique) et les fenêtrages (apports solaires, éclairement naturel des intérieurs), tout en limitant au maximum la complexité de l'ensemble (temps de calcul raisonnable). Nous proposons un exemple réalisé pour le centre-ville de Compiègne, constitué d'environ 20 000 triangles, ainsi que les premiers éléments d'une étude de sensibilité par rapport aux choix géométriques des paramètres physiques les plus simples permettant d'obtenir une première caractérisation du rayonnement. L'utilisation de tels modèles pour des études d'impact ainsi que pour préciser la portée et les conséquences des réglementations urbaines et de leur possible évolution dans le cadre français sera ensuite commentée sur des exemples concrets.**

## Introduction

Travailler sur l'efficacité énergétique du bâti à l'échelle urbaine impose de s'intéresser à la question du rayonnement solaire dans la ville, sous le double aspect visuel et thermique. Toutes les constructions sont contraintes dans leur forme par les dispositions des plans locaux d'urbanisme. Il existe donc un cadre règlementaire qui contraint les formes bâties, et indirectement les gains solaires dans la ville [1]. Vouloir quantifier ces gains, voire les effets des règlements, implique d'avoir à disposition un modèle 3D urbain avec un niveau de détail adapté pour la simulation du rayonnement solaire. Rappelons qu'il existe un standard des modèles 3D urbains, la norme CityGML [2], qui fixe 5 niveaux de détail consécutifs (du LoD 0 au LoD 4). Le LoD 0 correspond à un modèle numérique de terrain (MNT) sur lequel peut être superposée une photo aérienne ou toute autre donnée spatialisée non extrudée, et le LoD 1 est un modèle où les constructions sont modélisées sous formes de blocs simples. Le LoD 2 inclut des surfaces telles que les toitures différenciées, mais obtenues par typologies, et aussi par texture (pour les fenêtres), ce qui n'est toujours pas utilisable dans notre cas. Quant aux LoD 3 et 4, ils ont un niveau de détail très supérieur, ce qui les rend beaucoup trop lourds pour les calculs.

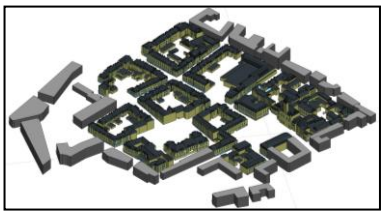
### Modèle 3D du centre-ville de Compiègne

Afin de dépasser les limitations des modèles 3D urbains disponibles et de réaliser à l'échelle urbaine des simulations de phénomènes physiques, tel que le potentiel solaire, un modèle 3D du centre-ville de Compiègne a été élaboré manuellement. Les façades et les toitures sont réduites aux grandes surfaces, correctement orientées et jointes sans solution de continuité. Les lucarnes ont été modélisées mais les éléments décoratifs, les cheminées, l'épaisseur du mur et le terrain ont été négligés. Les fenêtres sont des surfaces planes situées à un centimètre au dehors de la paroi extérieure. Les limites du modèle sont représentées par une frontière simplifiée, laquelle permettra l'expansion graduelle du modèle sans besoin de répéter les calculs déjà réalisés.

**Tableau 1 :** Nombre de triangles du modèle de Compiègne.

| Elément | Nombre de triangles |
|---|---|
| Façade | 3,759 |
| Fenêtrage | 7,402 |
| Toiture | 10,574 |
| TOTAL | 21,735 |

**Figure 1 :** Vue sud-ouest du Modèle par élément.



## Étude de sensibilité

Le modèle 3D a été testé avec le logiciel Heliodon 2, un outil de simulation interactive qui permet de quantifier l'impact énergétique et visuel de la radiation solaire. Nous utilisons deux paramètres qui donnent des informations différentes mais complémentaires : l'irradiation solaire directe, évaluée à partir de la constante solaire en tenant compte de l'absorption atmosphérique par temps clair, et le facteur de vue du ciel. On considère que ces deux paramètres sont suffisants pour l'étude de sensibilité de la géométrie.

L'évaluation du potentiel solaire dans le modèle du centre-ville de Compiègne a été réalisée, mais on a constaté qu'une modélisation fine des toitures est très coûteuse en temps de calcul et en main d'œuvre et donne un modèle 3D difficile à manipuler. Généralement, ce type d'évaluation est fait dans des modèles du type LoD 1 mais ce niveau de détail ne permet pas de localiser l'emplacement optimal des panneaux solaires. Afin de réduire les temps de modélisation et de calcul, on retire d'abord les lucarnes du modèle, leur influence pouvant être prise en compte par post-traitement. Ensuite, une simplification des toitures a été étudiée. Le modèle simplifié n'est composé que de toitures à un ou deux versants avec une valeur unique de pente à 45° – valeur moyennée pour Compiègne – et de toitures plates ; les toitures en mansarde sont modélisées comme toitures plates.

**Figure 2 :** Potentiel solaire annuel (kWh)

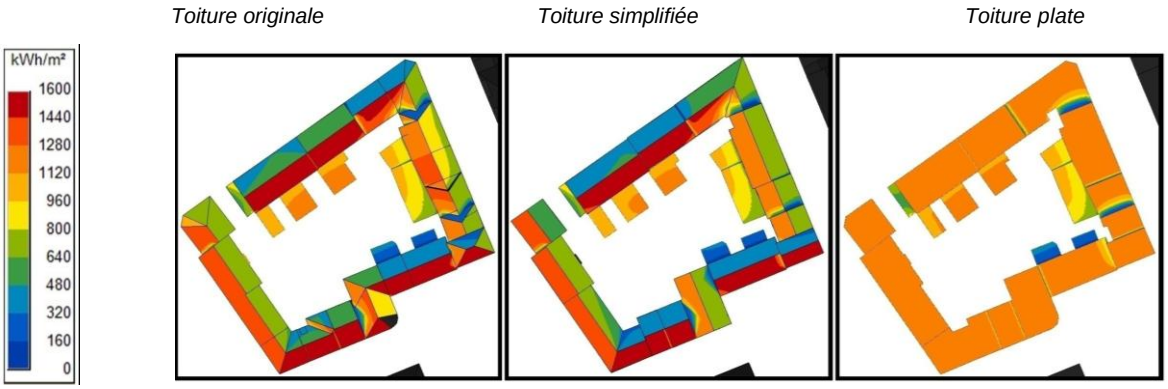



**Tableau 2 :** Résultats du potentiel solaire

| | Toiture originale | Toiture simplifiée | Toiture plate |
|---|---|---|---|
| Temps de calcul annuel (sec) | 929 | 353 | 280 |
| Potentiel solaire annuel (kWh) | Différences par rapport à la toiture originale | 3 % | -7 % |
| Potentiel solaire 21 juin (kWh) | | 2 % | -3 % |
| Potentiel solaire 21 décembre (kWh) | | 8 % | -37 % |

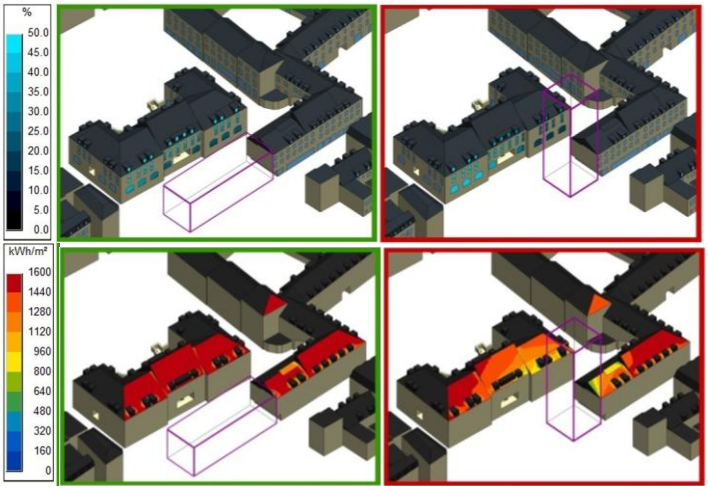
Au vu des résultats, on peut considérer que cette simplification est pertinente et mieux adaptée pour l'évaluation rapide du potentiel solaire que la toiture plate. Les temps de calcul ont été réduits considérablement, la construction du modèle est plus rapide et les résultats saisonniers, particulièrement en hiver, sont beaucoup mieux évalués.

## Utilisation du modèle pour les études d'impact solaire

Ces dernières années, des études portant sur le droit au soleil et l'impact solaire d'une nouvelle construction sur son environnement urbain ont été développées [3]. Pour ce faire, il est nécessaire de définir une méthode, des paramètres et des indicateurs capables de mesurer l'impact de la nouvelle construction et de comparer les projets proposés. Mais, étant donné que les différents indicateurs peuvent donner des résultats contradictoires, c'est au

maître d'ouvrage de les pondérer en fonction de ses priorités et besoins, tout en respectant les contraintes définies par le cadre réglementaire.

**Figure 3 :** Exemple d'étude d'impact solaire d'un nouveau bâtiment, forme en barre et en tour




Facteur de vue du ciel dans le fenêtrage (%)

Potentiel solaire annuel des toitures orientées au sud (kWh)

## Conclusions

La simulation du rayonnement solaire à l'échelle urbaine nécessite de disposer d'un modèle 3D urbain adéquat dont les caractéristiques doivent être définies en fonction des besoins autour de cette simulation et aussi des temps de calcul. Le niveau de détail ici proposé ne correspond strictement à aucun des niveaux définis par la norme CityGML.

### Perspectives

L'étude de sensibilité de la géométrie, en se basant sur des calculs n'intégrant que la composante solaire directe et le facteur de vue de ciel, a permis de valider le niveau de détail choisi pour le modèle. L'étape suivante est de réaliser une étude de sensibilité au modèle physique : intégration de la composante diffuse, du couvert nuageux et des réflexions. Nous percevons une plus grande ambition : ce que nous faisons avec le problème solaire ne pourrait-il pas être adapté aux autres problématiques de la physique urbaine ? Il s'agirait alors de définir un modèle 3D universel, qui permettrait la simulation de phénomènes tels que le ruissellement, l'aéraulique, l'acoustique, etc. L'étude d'impact solaire a montré une perspective d'utilisation à court terme de cette méthode intéressante. A plus long terme, on peut imaginer que de telles études généralisées pourraient devenir de véritables outils d'aide à la décision pour les institutions générant les règlementations (du PLU aux Plans Climats Territoriaux ou aux évaluations environnementales…).

## Bibliographie

[1] Prévost A., Rodriguez D., Molines N., Beckers B., Caudron I.
Optimiser l'efficacité énergétique du bâti et de la ville grâce à la modélisation 3D.
Enjeux et perspectives d'applications
*Conférence internationale de Géomatique et Analyse Spatiale SAGEO'10. 2010, 17 p.*

[2] OGC, Open Geospatial Consortium Inc.
OpenGIS City Gegraphy Markup Language (CityGML) Encoding Standard
*Version 1.0.0, 2008, pp.9-11*

[3] Capeluto G., Yezioro A., Bleiberg T., Shaviv E.
Solar Rights in the Design of Urban Spaces
*PLEA2006 – The 23rd Conference on Passive and Low Energy Architecture.*
*Geneva, Switzerland, 6-8 september 2006*

# Bilans hydrique et énergétique sur une zone urbaine hétérogène : mesures et simulations

Insaf Bagga, Isabelle Calmet
IRSTV (Institut de Recherche en Sciences et Techniques de la Ville), FR CNRS 2488, Nantes
Laboratoire de Mécanique des Fluides, UMR CNRS 6598, Ecole Centrale de Nantes, Nantes
Fabrice Rodriguez
IRSTV (Institut de Recherche en Sciences et Techniques de la Ville), FR CNRS 2488, Nantes
Groupe Hydrologie & Assainissement, Département GER, IFSTTAR, Bouguenais
Jean-Michel Rosant
IRSTV (Institut de Recherche en Sciences et Techniques de la Ville), FR CNRS 2488, Nantes
Groupe Hydrologie & Assainissement, Département GER, IFSTTAR, Bouguenais

**Pour comprendre et modéliser le fonctionnement de la ville, il est nécessaire de disposer de séries temporelles longues permettant d'interpréter la complexité des phénomènes physiques en interaction. Un site d'observation permanent a été instrumenté à Nantes pour assurer le suivi hydrologique et climatologique d'une zone urbaine. On dispose maintenant de plus de 30 mois de mesures obtenues sur un mât météorologique. Ces mesures permettent d'évaluer la cohérence des simulations obtenues avec un modèle urbain de bilan d'énergie des surfaces et un modèle hydrologique. Pour tenir compte, dans l'interprétation des mesures, de l'hétérogénéité du site étudié, les zones sources des flux mesurés sont localisées par un modèle de footprint et documentées en termes d'occupation et de couverture des sols.**

## Introduction

Dans le cadre de l'IRSTV, un observatoire de l'hydrologie urbaine et de la micro-météorologie de la ville, dénommé [1]SAP (Secteur Atelier Pluridisciplinaire), a été mis en place en 2006 à Nantes. Son objectif est d'assurer le suivi d'une zone urbaine pendant plusieurs années en mesurant l'ensemble des flux d'eau, de rayonnement, d'énergie qui participent aux bilans, et d'étudier l'influence de l'hétérogénéité spatiale sur la micro-climatologie urbaine. Les mesures effectuées sur le SAP permettent d'alimenter en continu une base de données consistante pour l'évaluation et la validation des modèles hydriques et énergétiques intégrés à l'échelle de la ville. Pour un site périurbain, l'analyse des flux de chaleur sensible et latente reste complexe. En effet, l'hétérogénéité des surfaces peut générer une grande variabilité des flux entre les quartiers. La localisation des zones sources, contribuant aux flux turbulents mesurés sur un mât météorologique, dépend de la hauteur de mesure, de la rugosité aérodynamique des surfaces et des conditions météorologiques.

## Le site expérimental permanent du SAP

La zone géographique d'étude a été choisie à Nantes, entre l'Erdre et la Loire. Sa structure composite, très hétérogène, comprend une large fraction d'espaces végétalisés en petites parcelles, un mélange d'habitations individuelles continues et discontinues, d'immeubles collectifs, d'installations sociales (crèche, école, gymnase et terrain de sport, etc.), de surfaces à vocation industrielle ou commerciale. Le dispositif permanent de mesures micro-météorologiques et micro-climatiques du SAP est déployé sur 2 sites. Une station météo-rologique, installée sur le toit d'un immeuble R+4 situé au cœur du Pin Sec, fournit les paramètres locaux : vitesse et direction du vent, température et humidité de l'air, pression atmosphérique, pluviométrie, rayonnements incidents, global et infrarouge. En périphérie du Pin Sec, un mât télescopique de 30 m est instrumenté pour déterminer les flux turbulents de chaleur sensible et de chaleur latente à deux niveaux (21 et 26 m) avec des anémomètres soniques et des analyseurs de gaz mesurant les concentrations de vapeur d'eau et de $CO_2$.

## Bilan d'énergie et bilan d'eau

Le bilan d'énergie pour une surface peut s'écrire sous la forme simplifiée :

$$R_n + F = H_s + LE + \Delta Q_s + \Delta Q_A$$

avec $R_n$ le rayonnement net (bilan radiatif), $H_S$ et LE les flux de chaleur sensible et latente entre l'atmosphère et la canopée, $\Delta Q_s$ le flux de

[1] Le SAP est devenu depuis Janvier 2011 l'ONEVU (Observatoire Nantais de l'EnVironnement Urbain)

chaleur par conduction dans le sol et les matériaux, $\Delta Q_A$ le flux advectif et F les flux de chaleur anthropiques.

Le bilan radiatif est local puisqu'il dépend de la nature de la surface (albédo, émissivité) à travers les rayonnements réfléchis ou réémis. Les flux d'advection ($\Delta Q_A$) et anthropique (F) sont généralement négligés. Le flux de stockage par conduction ($\Delta Q_s$) n'est pas directement mesurable dans un site urbain. Les flux turbulents de chaleur sensible et latente ($H_s$et LE) sont estimés par la méthode d'eddy covariance à partir des mesures fournies par les anémomètres et les analyseurs de gaz. Ces flux proviennent de surfaces variables dans le temps en fonction du vent et des conditions météorologiques. La relation entre le point de mesure et les zones sources est obtenue par un modèle de footprint.

Par ailleurs, le bilan hydrologique s'écrit à la surface : $P = ETR + Q_{EP} + I$ (où P est la pluie précipitée, ETR l'évapotranspiration réelle, $Q_{EP}$ le ruissellement de surface et I l'infiltration de l'eau dans le sol). L'ETR correspond au flux de vapeur d'eau (chaleur latente) disponible au sol. On a donc une relation de proportionnalité entre ETR et LE : $LE = L_v\ ETR$ ($L_v$ : chaleur latente de vaporisation de l'eau).

## Modèles utilisés pour les simulations

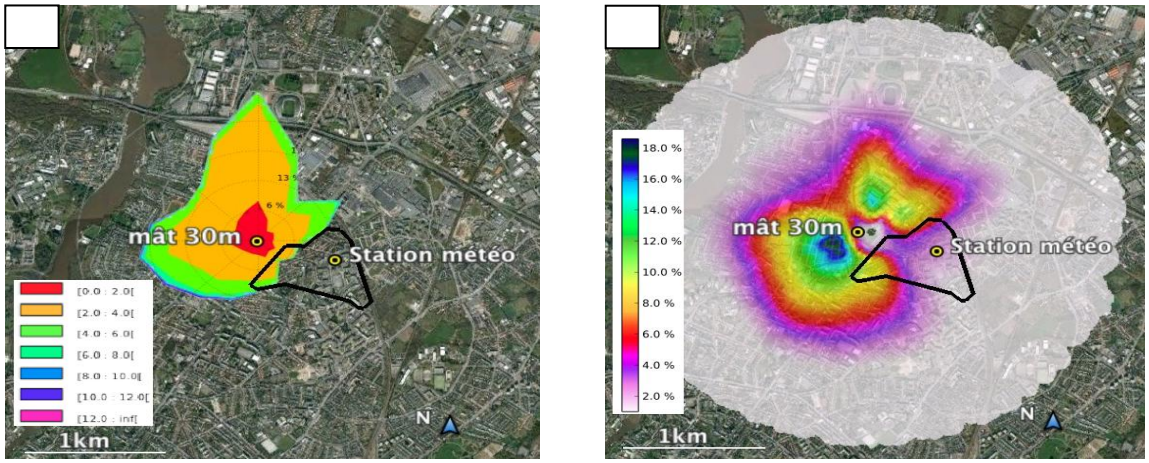
Deux modèles sont utilisés pour les simulations.

- SM2U : modèle de sol urbain mono-dimensionnel adapté à l'échelle de la ville [1]. Ce modèle permet de modéliser le bilan d'énergie des surfaces en considérant 7 modes de recouvrement des sols et toitures. Ce modèle a été validé sur le centre ville de Marseille [2] (campagne CLU-Escompte).
- URBS : modèle hydrologique distribué adapté aux bassins versants et basé sur les banques de données urbaines. Il permet de simuler le débit à l'exutoire d'une zone urbaine et l'état hydrique du sol. Ce modèle a été validé sur différents bassins versants urbains nantais et pour de longues chroniques hydrologiques en continu [3].

## Identification et analyse des zones sources associées aux flux mesurés

Le modèle analytique de footprint FSAM de Schmid [4] a été utilisé en considérant la rugosité aérodynamique de la surface urbaine constante et égale à 0,5 m. L'année 2009 a été une année statistiquement bien représentative des données de vent à Nantes. Les aires d'influence contribuant à 80 % des flux mesurés sur le mât sont contenues dans une zone de rayon 1 km autour du mât (Figure 1). Deux zones avec une contribution maximale sont identifiées en concordance avec les directions des vents dominants. Le quartier du Pin Sec est dans une zone où la contribution est plus modeste, puisqu'elle n'intervient que située dans 15 % des événements de l'année.

**Figure 1 :** Roses des vents (en km/h) (a) et contributions cumulées (en %) (b) des zones sources (le contour en noir indique les limites géographiques du quartier du Pin Sec)



## Comparaison mesures et simulations

Des simulations du bilan énergétique (avec SM2U) et du bilan hydrologique (avec URBS) ont été effectuées sur le quartier du Pin Sec pour la période Mai 2008-Mai 2009, à partir de bases de données cadastrales, dans lesquelles les modes de couverture des sols (bâti, végétation) sont bien décrits. Les comparaisons des simulations avec les mesures quart-horaires sur le mât situé à 400 m du quartier montrent une forte sous-estimation du flux de chaleur sensible calculé par SM2U (Figure 2a). Les flux de chaleur latente simulés avec URBS et SM2U (Figures 2b et 2c) montrent une tendance correcte, grâce à une bonne documentation de la végétation et de l'humidité des sols. La zone entourant le mât est constituée de quartiers hétérogènes (habitat individuel, collectif, industriel…) où la présence de la végétation n'est pas négligeable.

L'utilisation conjointe du modèle de sol SM2U pour le calcul des flux et du modèle de footprint pour pondérer la contribution des surfaces doit permettre de mieux évaluer les flux de chaleur. Ainsi, la base de données urbaines BDTopo de l'IGN a été exploitée pour obtenir une description du bâti et des modes d'occupation des sols dans un large périmètre autour du mât. La zone est découpée en mailles de 200 m x 200 m et tous les paramètres utiles sont obtenus en utilisant la plateforme OrbisGis développée par l'atelier SIG de l'IRSTV et fournis en entrée du modèle SM2U.

Avec ces données, et en remplaçant les surfaces non documentées dans la BDTopo par du sol nu, l'évapotranspiration est clairement sous-estimée (Figure 3a) alors que le flux de chaleur sensible semble mieux représenté (Figure 3b). Ce constat montre la nécessité de superposer, dans les zones périurbaines, différentes bases de données pour caractériser à la fois la végétation et le caractère 3D du tissu urbain. Une étude de sensibilité à la description des surfaces urbaines est en cours. La méthode développée sera utilisée en vue de l'amélioration des paramétrisations dans les modèles de bilan énergétique des surfaces et des flux d'évaporation calculés dans les modèles d'hydrologie.

**Figure 2 :** Comparaison entre les flux mesurés et simulés ($Wm^{-2}$) sur le Pin Sec
a) simulations Hs de SM2U ; b) simulations LE de URBS ; c) simulations LE de SM2U

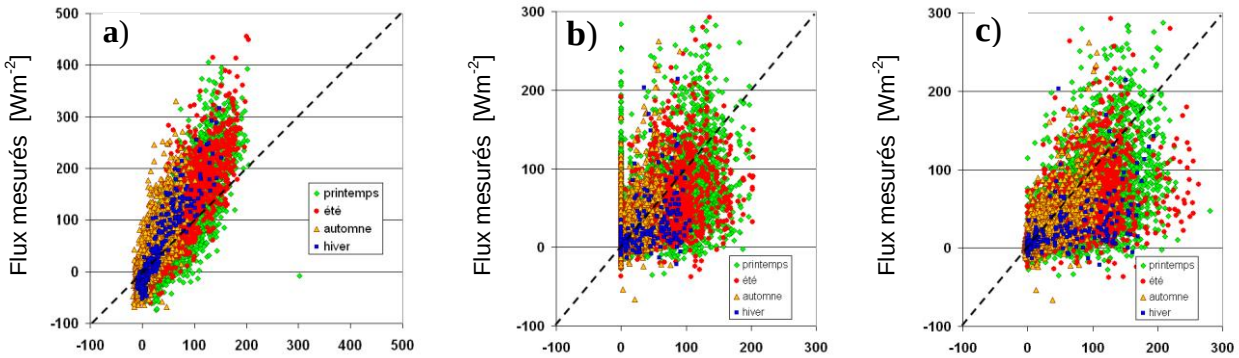
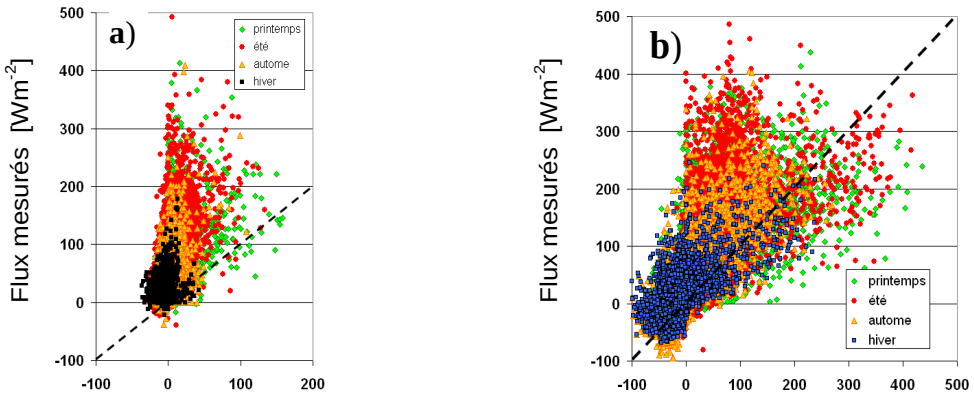



**Figure 3 :** Comparaison entre les flux mesurés et simulés SM2U ($Wm^{-2}$) pondérées par les footprints
a) flux de chaleur sensible (année 2009) ; b) flux de chaleur latente (année 2009)



**Remerciements**
Cette étude a bénéficié du soutien financier de la Région des Pays de la Loire dans le cadre du projet régional MEIGEVille.

## Bibliographie

[1] Dupont S., Mestayer P.G, Guilloteau E., Berthier E. and Andrieu H.
Parameterisation of the Urban Water Budget with the Submesoscale Soil Model
*Journal of Applied Meteorology and Climatology, Vol. 45, n° 4, 2006, pp. 624-648*

[2] Dupont S. and Mestayer P.G.
Parameterisation of the Urban Energy Budget with the Submesoscale Soil Model (SM2-U)
*Journal of Applied Meteorology and Climatology, Vol. 45, n° 12, 2006, pp. 1744-1765*

[3] Rodriguez F., Andrieu H. and Morena F.
A distributed hydrological model for urbanized areas
Model development and applications to case studies
*Journal of Hydrology, Vol. 351, n° 3-4, 2008, pp. 268-287*

[4] Schmid H.P.
Source areas for scalars and scalar fluxes
*Boundary Layer Meteorology, Vol. 67, n° 3, 1994, pp. 293-318*

# Etude de l'influence de l'hétérogénéité morphologique du tissu urbain sur la dynamique de l'atmosphère : une approche de modélisation adaptée à l'échelle de la ville

Magdalena Maché, Jean-François Sini et Isabelle Calmet
Laboratoire de Mécanique des Fluides UMR 6598 CNRS - Ecole Centrale de Nantes

**Nos travaux s'appuient sur le modèle atmosphérique ARPS qui modélise les écoulements turbulents par l'approche de simulation des grandes échelles. Un terme de traînée a été ajouté dans l'équation de bilan de quantité de mouvement pour représenter l'influence de la canopée sur l'écoulement. Ce terme s'applique uniquement à l'intérieur de la canopée et dépend de deux variables liées à la morphologie urbaine : $a_f$, la densité frontale par unité de volume, et $C_d$, le coefficient de traînée par niveau. $a_f$ est déterminé à partir des propriétés géométriques de la canopée et $C_d$ est déduit de données de vent en soufflerie. Après avoir été validée pour des canopées de cubes, cette méthode est utilisée ici pour étudier l'influence de la direction du vent sur la vitesse moyenne dans et au-dessus de la canopée.**

## Introduction

La modélisation numérique à l'échelle de ville ne peut être abordée en tenant compte de façon détaillée de tous les bâtiments qui constituent le tissu urbain. Cependant, il est important d'avoir une description, au moins statistique, de la dynamique des transferts entre l'atmosphère et l'intérieur de la canopée urbaine, décrite selon les spécificités morphologiques des différents quartiers : arrangement des bâtiments, hauteur moyenne, densité bâtie... Les travaux présentés ici concernent à la fois la méthode développée pour traduire l'influence de la morphologie du tissu urbain sur l'écoulement et son application dans le cas de la ville de Nantes.

## Méthode

Une approche de type porosité-traînée a été intégrée dans le modèle de simulation des grandes échelles ARPS (Advanced Regional Prediction System of Storms, Université d'Oklahoma) pour simuler les interactions entre les canopées végétales denses et l'atmosphère [2]. L'influence de la canopée sur l'écoulement est modélisée en rajoutant une force de traînée dans les équations de bilan de quantité de mouvement ainsi qu'un terme de dissipation, proportionnel à la traînée, dans l'équation de transport du modèle TKE (Turbulent Kinetic Energy). La force de traînée s'exprime :

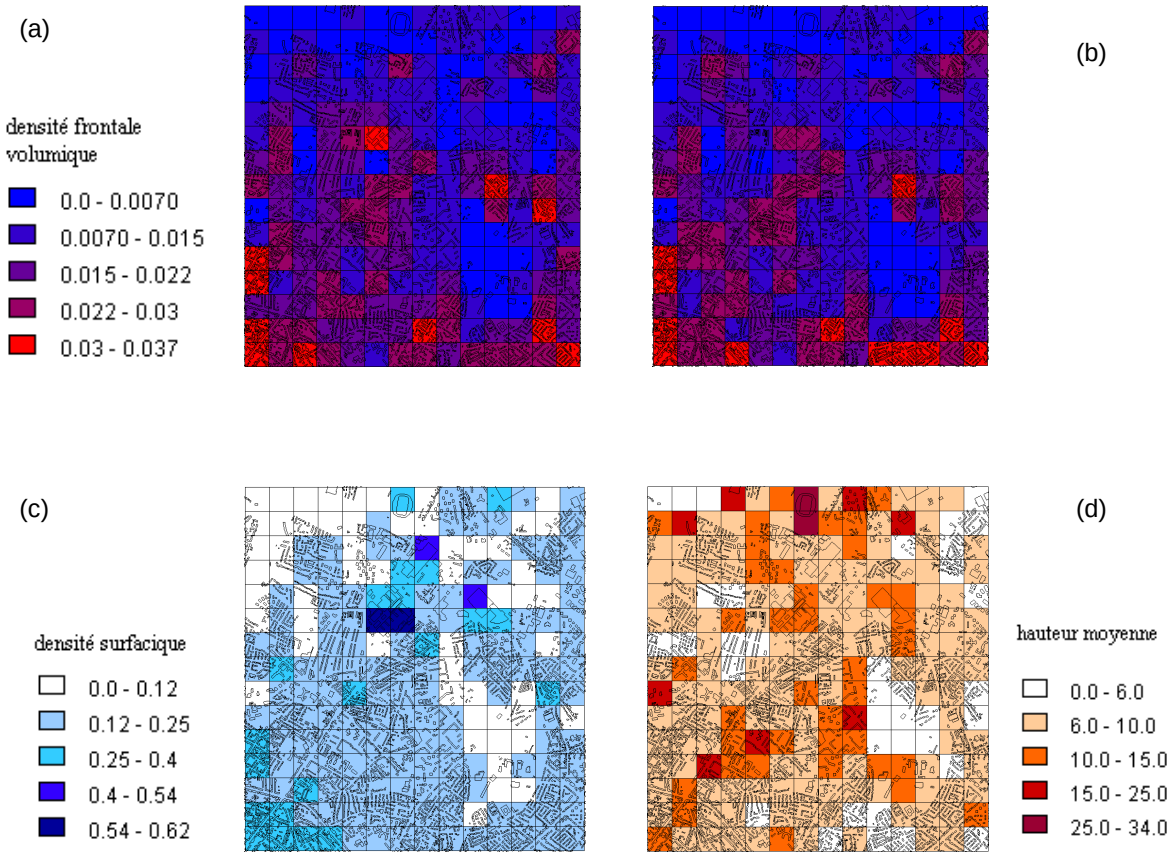
$$F_{D_i} = 0.5 C_d a_f \tilde{u}_i \sqrt{\tilde{u}_j \tilde{u}_j}$$

où $u_i$ désigne la vitesse du vent dans la direction $i$, $a_f(z)$ est la densité frontale volumique (définie comme la somme des surfaces frontales des obstacles dans une maille divisée par le volume d'air de la maille) et $C_d(z)$ est le coefficient de traînée. Alors que des valeurs de $C_d$ constantes permettent de reproduire correctement l'écoulement dans les canopées végétales, la spécificité des canopées bâties nécessite de considérer l'évolution verticale de $C_d$ à l'intérieur de la canopée. L'adaptation du modèle aux canopées urbaines a donc nécessité la détermination des profils verticaux de $C_d(z)$, par ajustement du profil de vitesse moyenne pour des arrangements de cubes déjà étudiés en soufflerie ou par simulation numérique détaillant les obstacles [1] [5] [7]. Pour cela, 4 cas de canopées homogènes ont été traités qui se distinguent par leur densité surfacique $\lambda_p$, définie comme le rapport de la surface totale au sol occupée par les obstacles à la surface totale de la maille [6]. Cette paramétrisation permet de reproduire les profils de vitesse moyenne à l'intérieur de la canopée. Au dessus de la canopée, ces profils ont été comparés avec succès avec la loi logarithmique théorique, montrant ainsi que les transferts de quantité de mouvement à l'interface canopée-atmosphère sont bien représentés par cette méthode. Les paramètres de rugosité obtenus par régression linéaire sont en accord avec ceux obtenus dans différentes études [3].

## Paramétrisation du tissu urbain

Les grandeurs nécessaires à notre modèle (Figure 1) - densité bâtie, les hauteurs moyenne et maximale des bâtiments et leur densité frontale volumique $a_f(z)$ - sont extraites de la base de données urbaines BDTOPO de l'IGN à l'aide de la plateforme OrbisGIS, sur des mailles horizontales de 200m x 200m qui garantissent la représentativité statistique du milieu urbain.

**Figure 1 :** Paramètres morphologiques : densité frontale à 1m au-dessus du sol par vent d'ouest (a) et de sud (b) ; densité surfacique (c) et hauteur moyenne (d)

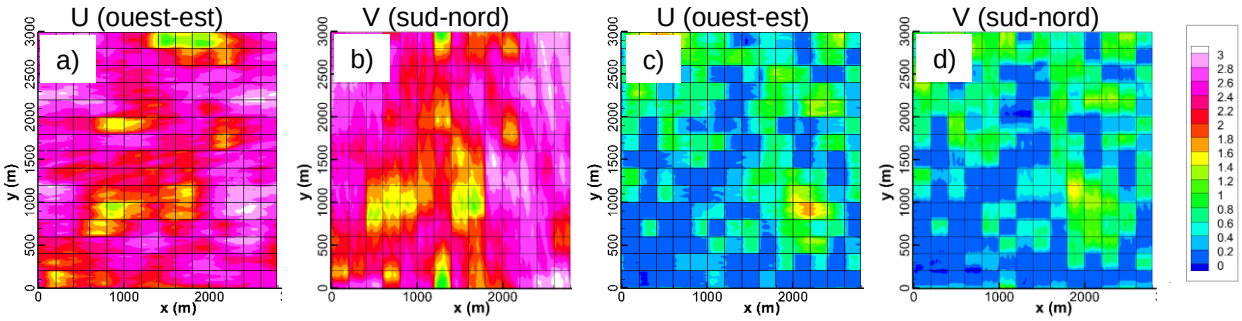



Les simulations numériques sont effectuées sur le Secteur Atelier Pluridisciplinaire nantais de l'IRSTV avec une résolution horizontale de 20m et verticale de 1m dans la canopée.

## Influence locale de la direction du vent sur sa vitesse

L'effet local de la direction du vent dépend de la hauteur au-dessus du sol. Deux coupes x-y sont présentées pour les deux directions de vent (Figure 2). La distribution de la vitesse dans la canopée est similaire à celle de la densité frontale surfacique alors que la distribution de la vitesse au dessus de la canopée est similaire à celle de la hauteur moyenne des bâtiments dans une zone statistiquement homogène. L'influence d'une zone à une autre dans la canopée est visible jusqu'à 100 m alors qu'au dessus de la canopée (à 14,5 m), cette influence est visible sur plusieurs centaines de mètres.

**Figure 2 :** Vitesse de vent (m/s) pour un vent d'ouest (a, c) et un vent de sud (b, d) à une hauteur de 1,5m (c, d) et de 14,5m (a, b) au-dessus du sol




## Influence moyenne de la direction du vent sur sa vitesse

L'influence moyenne de la direction du vent sur le quartier entier reste très faible. En conséquence, les paramètres de rugosité calculés sont peu sensibles à la direction du vent sur le quartier, que la méthode de calcul employée soit celle de Macdonald [4] ou corresponde à une régression linéaire (Tableau 1).

En revanche, à direction de vent donnée, l'utilisation de l'une ou l'autre des deux méthodes conduit à des paramètres différents. Ceci suggère que la méthode [4], dans laquelle on suppose que la hauteur des bâtiments est homogène, n'est pas adaptée à la morphologie d'une ville réelle.

**Tableau 1 :** Paramètres de rugosité calculés par la méthode [4] et par régression linéaire

| Paramètres | Vent d'ouest | Vent de sud |
|---|---|---|
| $\lambda_p$ | 0,172 | 0,172 |
| $\lambda_f$ | 0,095 | 0,093 |
| u* | 0,290 | 0,280 |
| $z_0$/H - Macdonald | 0,080 | 0,078 |
| d/H - Macdonald | 0,356 | 0,356 |
| $z_0$/H - régression | 0,039 | 0,036 |
| d/H - régression | 0,484 | 0,506 |

## Conclusion et perspectives

La méthode présentée est une première étape vers une modélisation cohérente à l'échelle du quartier pour des études à micro-échelle dans un environnement réaliste. Une évaluation en site réel est prévue par une comparaison avec les données de vent collectées pendant la campagne FluxSAP 2010. La modélisation des échanges thermo-radiatifs et hydriques entre les surfaces et l'atmosphère complétera dans un futur proche le modèle.

## Bibliographie


[1] Castro I.P., Cheng H., Reynolds R.
Turbulence over urban-like roughness: deductions from wind-tunnel measurements
*Boundary-Layer Meteorology, Vol. 118, 2006, pp. 109-131*

[2] Dupont S., Brunet Y.
Edge flow and canopy structure: a large-eddy simulation study
*Boundary-Layer Meteorology, Vol. 126, 2008, pp. 51-71*

[3] Hagishima A., Tanimoto J., Nagayama
Aerodynamic parameters of regular arrays of rectangular blocks with various geometries
*Boundary-Layer Meteorology, Vol. 132, 2009, pp. 315-337*

[4] Macdonald R.W., Griffiths R.F., Hall D.J.
An improved method for the estimation of surface roughness of obstacle arrays
*Atmospheric Environment, Vol. 32, 1998, pp. 1857-1864*

[5] Macdonald R., Carter S., Slawson P.
Measurements of mean velocity and turbulence statistics in simple obstacle arrays at 1:200 scale
*Technical report. University of Waterloo, Thermal Fluids Report 2000-1*

[6] Maché M., Calmet I., Sini J.F.
Analysis of the dynamical interactions between atmosphere and urban canopies of different densities using a drag force approach
*Proceedings of the HARMO13 conference, pp.668-672, 1-4 June 2010, Paris, France*

[7] Santiago J.L., Coceal O., Martilli A., Belcher S.E.
Variation of the Sectional Drag Coefficient of a Group of Buildings with Packing Density
*Boundary-Layer Meteorology, Vol. 128, 2008, pp. 445-457*

# Modèle numérique pour la caractérisation du confort thermique dans les éco-quartiers : méthodologie et validation sur une configuration de rue canyon

Khaled Athamena
Centre Scientifique et Technique de Bâtiment
Laboratoire de Mécanique des Fluides, UMR CNRS 6598, Ecole Centrale de Nantes
Jean François Sini
Laboratoire de Mécanique des Fluides, UMR CNRS 6598, Ecole Centrale de Nantes
Sabre Maeva
Centre Scientifique et Technique de Bâtiment
Jean Michel Rosant
Laboratoire de Mécanique des Fluides, UMR CNRS 6598, Ecole Centrale de Nantes

**La morphologie urbaine et les matériaux de surface sont deux facteurs qui jouent un rôle important dans la modification du microclimat urbain. La simulation numérique offre la souplesse nécessaire pour prévoir les performances thermo-aérauliques d'un large éventail de configurations urbaines. Cet article présente une approche numérique basée sur un couplage entre un modèle CFD - Computational Fluid Dynamics (Code_Saturne) et un modèle thermo-radiatif (Solene). Les vitesses de vent et les températures de surface simulées sont comparées aux données de mesure obtenues durant la campagne expérimentale nantaise EM2PAU[1]. Le couplage développé sera par la suite appliqué à différentes configurations d'éco-quartiers afin de hiérarchiser leur impact sur le confort extérieur.**

## Introduction

Pour caractériser le confort thermique au sein des espaces urbains, la simulation numérique est un outil utile permettant d'évaluer la performance thermique des différentes configurations urbaines [1]. Parmi les modèles utilisés, on distingue :

- les modèles de dynamique des fluides (Computational Fluid Dynamics – CFD) qui déterminent la température et la vitesse de l'écoulement autour des bâtiments à partir des températures de surface fournies en données d'entrée ;
- les modèles thermo-radiatifs qui fournissent les températures des surfaces à partir de la température et de la vitesse supposées connues de l'écoulement.

D'ordinaire, dans les simulations CFD, on impose souvent par défaut une valeur uniforme de température des surfaces. D'un autre coté, la plupart du temps, une valeur de référence du vent et de la température de l'air est utilisée dans les modèles thermo-radiatifs pour calculer les températures de surface. Le couplage des deux modèles doit permettre de s'affranchir de ces hypothèses fortes et d'améliorer ainsi la qualité des résultats de simulation. Dans cet article, un couplage entre un modèle CFD (Code_Saturne développé par EdF[2]) et un modèle thermo-radiatif (Code Solene développé par le laboratoire CERMA[3]) est présenté.

## Principe de couplage itératif

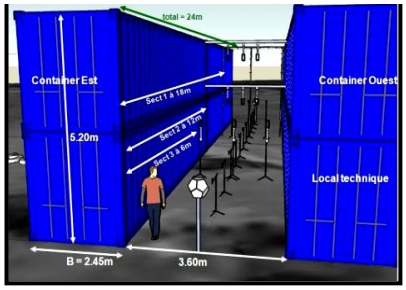
La simulation couplée consiste à introduire un processus itératif à chaque pas de temps de calcul entre les deux outils numériques [Figure 1]. Au pas de temps ***t*** de la simulation, les températures de surface $T_s$, qui résultent du bilan thermo-radiatif résolu dans le code Solene, sont introduites comme conditions aux limites dans la simulation thermo-aéraulique réalisée par le Code_Saturne. La simulation thermo-aéraulique permet d'obtenir, à proximité des parois, les températures d'air $T_{air}$, les coefficients d'échange convectif h, qui sont alors réintroduits dans le bilan thermo-radiatif en régime transitoire du code Solene. A chaque pas de temps, le couplage entre les deux modèles se poursuit jusqu'à ce qu'un critère de convergence soit atteint. Dans notre

[1] Etude de l'impact des effets Micro-Météorologiques sur la Propagation Acoustique en milieu urbain. Campagne expérimentale (2009-2011) à Nantes.
[2] Electricité de France.
[3] Centre de Recherche sur la Méthodologie d'Architecture, Ecole d'Architecture de Nantes.

cas, il correspond à un écart moyen inférieur à 0,1 °C entre les températures de surfaces calculées entre deux itérations successives.

**Figure 1 :** Principe du couplage itératif

**Figure 2 :** Dimensions de la maquette EM2PAU




## Campagne de mesure EM2PAU

La campagne EM2PAU a été réalisée sur le site nantais de l'IFSTTAR (Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux). La maquette est constituée de deux lignes de bâtiments formant une configuration de rue canyon. Chaque ligne est composée de quatre conteneurs de transport. L'axe de la rue forme un angle de 43° avec la direction du Nord [Figure 3]. Les façades et les toits des conteneurs sont constitués d'une tôle en acier peint de 2,5 mm d'épaisseur. Le sol de la parcelle est recouvert d'une couche d'asphalte de 5 cm.

### *Les données d'entrée pour les simulations*

Les simulations concernent la journée très chaude du 07 juillet 2010, durant laquelle le vent a tourné progressivement sur 360°. Les calculs sont effectués pour une période de 24 heures avec un pas de temps de 15 minutes. La maquette a été maillée par triangulation, avec au total 42412 facettes [Figure 3]. Les flux solaires (global et diffus) et le flux infrarouge atmosphérique ont été mesurés et utilisés comme données d'entrées du modèle Solene, ainsi que les températures à l'intérieur de chaque conteneur et à une profondeur de 75 cm dans le sol. Le profil du vent moyen dans la couche atmosphérique sur sol plan est représenté par une loi logarithmique :

$$U(z) = \frac{U^*}{\kappa} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)$$

où U* est la vitesse de frottement, $z_0$ la longueur de rugosité et k la constante de von Kármán.

Ce profil de vent imposé en entrée du domaine a été reconstitué à chaque pas de temps à partir des vitesses de vent mesurées à 10 m du sol et en fixant empiriquement la hauteur de rugosité $z_0$ selon la nature de la surface en amont du site.

### *Comparaison des résultats*

Les Figures 4.A à 4.D présentent la comparaison des températures de surface simulées avec celles des mesures fournies par des thermocouples installés en surface dans la section transversale médiane de la rue : au sol (**z/H = 0**), en toiture (**z/H = 1**), sur les façades Est et Ouest (**z/H = 0,77, 0,57**, respectivement). Les lignes verti-cales indiquent l'instant où les thermocouples passent au soleil (lignes discontinue) ou à l'ombre (ligne continue). L'analyse montre un excellent accord entre les résultats des simulations et les mesures, notamment pour la toiture et les deux façades de la rue canyon. Ce bon accord tient en particulier au forçage des températures intérieures des conteneurs mesurées à chaque pas temps, mais aussi à la faible inertie thermique de la paroi des containers en acier peint (2,5 mm d'épaisseur). Les graphes des températures de surface des façades Est et Ouest montrent deux pics : un maximum absolu lorsque la façade est ensoleillée et un pic secondaire lorsque la façade opposée voit le soleil. Ce dernier est dû au phénomène d'inter-réflexion des flux infrarouges entre les deux façades. Au niveau du sol, l'analyse montre une faible surestimation des résultats des simulations durant la journée. Ceci est probablement dû à une mauvaise estimation des caractéristiques physiques de l'asphalte et du sol.

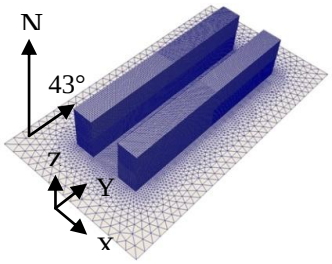
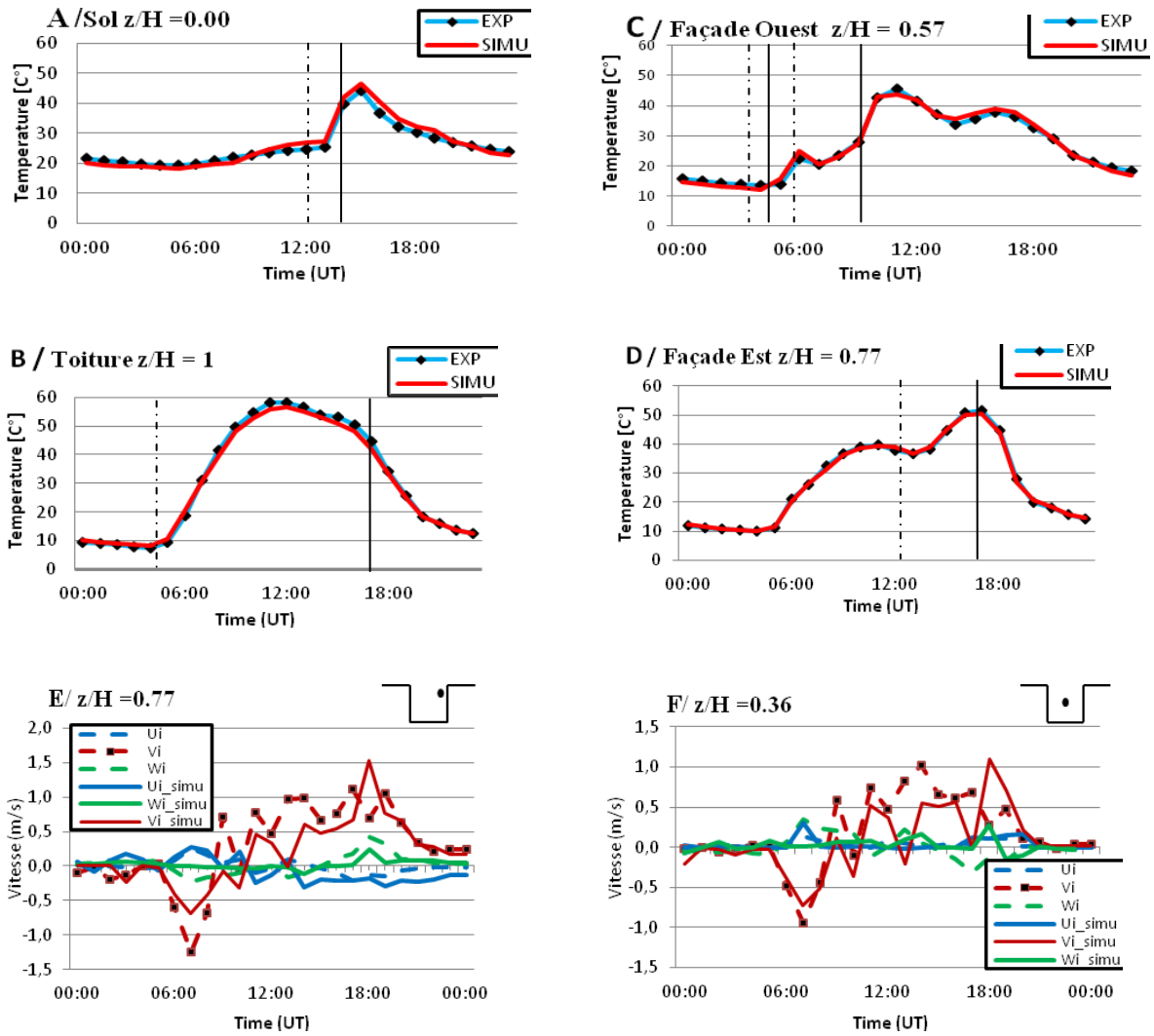



**Figure 3 :** Modélisation et maillage de la maquette EM2PAU

Les deux Figures 4.E et 4.F présentent une comparaison entre les vitesses du vent simulées et les données de mesure fournies par deux anémomètres soniques installés à l'intérieur de la rue à différentes hauteurs. Le premier anémomètre est installé à 1 mètre de la façade Est à la cote z/H = 0.77 et le second au milieu de la rue à z/H = 0.36. L'analyse montre une sous-estimation des résultats de calcul, spécialement pour la composante longitudinale V. Une des raisons de cette sous- estimation pourrait être liée à une mauvaise représentation près du sol des profils d'entrée construits sur un unique point de mesure du vent à z = 10 m et aux valeurs de rugosité empiriques imposées z0. Compte tenu de l'extraordinaire complexité des écoulements atmosphériques à l'échelle locale, il est de toute façon très improbable (sauf fortuitement) de trouver un bon accord expérience-calcul dans une comparaison ponctuelle. Une statistique d'ensemble serait certainement plus favorable.

**Figure 4.** Comparaisons des résultats entre les simulations et les mesures : **(A,B,C,D)** températures de surface, **(E, F)** vitesses de l'air.



## Conclusion

L'analyse des résultats montre que les conditions aux limites d'entrées pour les simulations thermo-aérauliques et le choix des caractéristiques solaires et thermiques des matériaux sont deux facteurs qui affectent sensiblement la qualité des simulations.

**Remerciements**
Nous remercions le Conseil Régional des Pays de la Loire d'avoir financé le projet de recherche EM2PAU et le LCPC pour partager les données de mesures expérimentales.

## Bibliographie

[1] Masson V, Grimmond C.S.B., and Oke T.R., 2002
Evaluation of the Town energy balance (TEB) scheme with direct measurements from districts in two cities
*J. Appl Meteor., 41, 1011*

# Caractérisation des ambiances dans les grands ensembles : entre modélisation architecturale, sensible et physique

Amar Bensalma, Marjorie Musy et Nathalie Simonnot
Laboratoire CERMA, UMR CNRS 1563, ENSA Nantes

**Nous abordons dans cet article la qualité des ambiances architecturales et urbaines de trois grands ensembles situés à Nantes, il s'agit : des Dervallières (1952/1965), de Breil Malville (1955/1967) et de Malakoff (1967/1971). Le choix de ces « échantillons d'étude » s'est fait sur des critères typo-morphologiques caractérisant l'urbanisme de ces ensembles (barres, tours, pyramidales, etc.). La démarche de caractérisation mise en place consiste en une approche pluridisciplinaire relevant des sciences humaines et sociales pour les enquêtes (perception et vécu), de la physique pour les simulations microclimatiques et enfin de l'architecture pour l'approche d'analyse architecturale. Nous exposerons principalement des résultats obtenus par la caractérisation physique et sensible des ambiances.**

## Introduction

Au regard des enjeux actuels liés à « la ville durable », les zones résidentielles en difficultés tels que les grands ensembles font l'objet de sollicitations multiples et pressantes [1]. Ces ensembles constituent par leur grand espace libre un potentiel foncier attrayant pour l'application des concepts de la « ville dense » qui permet de lutter contre l'étalement urbain et ses effets néfastes sur l'environnement. L'enjeu se présente aussi au niveau d'un développement social et économique harmonieux entre le centre et sa périphérie, les questions qui se posent par rapport à ces enjeux globaux concernent la qualité de vie et le vécu des habitants de ces ensembles : le cadre de vie et la qualité des ambiances urbaines sont-ils pris en compte dans leur réaménagement ? Si oui, de quelle manière ? Les erreurs commises dans la période de construction massive des logements sociaux en France sont-elles évitées lors de leur réhabilitation ? Comment les critères quantitatifs et qualitatifs de conception s'équilibrent-ils ? Ces questionnements soulignent un paramètre important dans la conception des espaces de vie et d'émancipation des citoyens : celui de la prise en compte de leurs pratiques des espaces et de leurs ressentis. En effet, leurs exigences en termes de confort et de bien-être sont de plus en plus importantes, elles ne se limitent plus au seul aspect fonctionnel mais concernent aussi les ambiances, l'esthétique, la sécurité, etc. Afin que ces exigences soient prises en compte, tout projet de rénovation ne peut se passer d'un « diagnostic » portant à la fois sur la dimension matérielle de ces espaces (logements et espaces publics), et sur la dimension sensible, c'est-à-dire les pratiques/ressentis dont ils font l'objet.

## Objectif et méthode

Dans ce travail de thèse nous caractérisons les ambiances [2] de trois grands ensembles situés à Nantes, il s'agit des quartiers : les Dervallières (1952/1965), le Breil Malville (1955/1967) et Malakoff (1967/1971). Notre méthode consiste à confronter trois approches : une approche d'observation, une approche sensible et une approche physique. Les deux premières approches interrogent le vécu et le ressenti des habitants : comment perçoivent-ils leur cadre de vie ? Comment jugent-ils la vie sociale dans leur quartier ? Et comment considèrent-ils les opérations de rénovation ? La dernière approche, quant à elle, permet une évaluation objective de certains paramètres physiques résultant de l'interaction entre les facteurs climatiques de la région et le milieu construit. Pour y répondre, la démarche de caractérisation mise en place consiste dans un premier temps en une approche « exploratrice » des espaces urbains à l'aide de l'observation (continue et ponctuelle). Elle nous a permis de découvrir comment les habitants s'approprient leurs espaces de vie par l'identification des différents types d'interactions individu-individu, individu-espace et individu-microclimat. Cette première approche nous a également permis de préparer l'approche dite « sensible », qui consiste à recueillir auprès des habitants des informations sur la perception de leur environnement : microclimatique, sonore, visuel et olfactif par le moyen de questionnaires et d'entretiens. Les habitants se sont exprimés sur la qualité des ambiances dans leurs espaces

de vie, ce qui nous a permis d'expliciter et de comprendre certaines « scènes d'ambiances » relevées par les observations. Les ambiances microclimatiques décrites par les habitants sont croisées par la suite avec une troisième approche dite « physique », qui permet à travers des simulations numériques de déterminer leurs conditions d'occurrence. Indépendamment de l'approche sensible, l'approche physique nous a permis d'évaluer les potentiels solaire, énergétique et aéraulique des trois quartiers étudiés. En résumé, nous distinguons dans cette analyse :

- les variables qui sont directement croisées avec les résultats de l'approche sensible – la qualité de l'ensoleillement des espaces publics et des logements, les sensations aux vents ;
- les variables intéressantes pour l'analyse physique de l'ambiance même si elles n'ont pas été relevées dans l'approche sensible : les durées d'ensoleillement, les apports solaires, le niveau d'éclairement, les vitesses des vents dominants, ainsi que les champs de pression et de turbulences.

## Exemples de croisement et de complémentarité entre approches

Par exemple, la qualité d'ensoleillement au niveau des logements est positivement perçue par les habitants, dont 80 % (des trois quartiers) trouvent que leurs logements sont bien ensoleillés, voire trop ensoleillés pour certains habitants des Dervallières. En effet, la présence d'appartements traversants (double exposition) et les durées d'ensoleillement relevées dans ce quartier par les simulations attestent d'une surexposition au soleil dans certains logements. Les résultats des simulations effectuées avec le logiciel *Solène*[1] montrent des durées d'ensoleillement moyennes par façade (pour une journée d'été) égales à 7h 00 pour les façades Nord-Ouest, 6h 20 pour les façades Sud-Est, 9h 00 pour les façades Sud-Ouest et 3h25 Nord-Est, pour une durée de jour de 15h44 (ciel clair). Cette partie physique nous a également permis de caractériser les différentes configurations bâties (orientation, disposition et gabarit) vis-à-vis de l'ensoleillement. Aux Dervallières, l'architecte Marcel Favraud a privilégié une orientation selon un axe diagonal à 45°, ce qui fait que les immeubles ont une orientation Nord-Ouest Sud-Est et Sud-Ouest Nord-Est, afin d'avoir une répartition équitable de l'ensoleillement sur les façades, comme nous le validons par les simulations. En revanche, à Malakoff, les architectes Evano, Cormier, Choisel et Leroux ont opté pour une orientation Nord-Nord Ouest et Sud-Sud Ouest des façades, ce qui fait que certaines pièces de logements sont orientées uniquement au Nord (notamment des chambres), un constat relevé principalement sur les logements situés dans des tours. Une telle situation peut être accentuée par la présence d'un effet de masque entre immeubles (relevé par les simulations).

L'exemple de l'analyse de la qualité d'ensoleillement peut s'étendre à d'autres paramètres de perception (sonores, visuels, thermiques) liés à une ou plusieurs approches, comme dans le cas des sensations aux vents, pour lesquelles nous avons constaté que les habitants sont plus sensibles aux effets de coins. Ces derniers souvent situés le long des parcours piétonniers (entrées d'immeubles, passages très traversés, etc.) constituent pour certaines personnes souffrant d'un handicap physique et pour les personnes âgées des situations d'inconfort très désagréables, parfois dangereuses comme l'ont fait apparaître les enquêtes[2]. Les résultats de simulations effectuées avec le logiciel Saturne[3] sur l'écoulement des vents avec et sans végétation montrent que l'atténuation de ces effets de coins par la mise en place d'un bloc végétal ne constitue pas la solution la plus efficace. Néanmoins, une adaptation de l'aménagement des parcours et des accès aux espaces publics de façon à éviter les effets de coins peut être une solution optimale afin d'assurer le confort des usagers car elle permet de bénéficier de l'apport thermique de ces « couloirs de rafraîchissement » tout en évitant leur effet mécanique souvent désagréable pour les personnes âgées fortement présentes dans ces

[1] *Solène* est un logiciel de simulation d'ensoleillement, d'éclairement et de rayonnement thermique, développé par le CERMA (Centre de recherche méthodologique d'architecture), http://solene.cerma.archi.fr/wiki/doku.php

[2] Témoignage de l'ancien gardien de l'immeuble « building » aux Dervallières : « je me souviens une fois j'ai aidé une femme qui revenait du centre commercial avec deux sacs lourds, je l'ai croisée au niveau de l'angle de building pas loin de la sortie de l'immeuble, en lui prenant les deux sacs elle s'est fait pratiquement emporter par le vent, je me suis dit ola la la !!! J'aurais dû la laisser avec ses deux sacs… » (Témoignage recueilli le 27/07/2009).

[3] *Saturne* : est un logiciel de simulation numérique en mécanique des fluides, développé depuis 1997 par la division Recherche et Développement d'EDF.

grands ensembles. Lors des observations menées aux Dervallières, nous avons constaté que certains espaces très boisés situés au niveau des barres parallèlement disposées ne sont pas du tout utilisés bien qu'ils soient aménagés, les habitants justifient cet état de fait par la proximité des immeubles et donc l'absence d'intimité mais aussi par l'atmosphère assez humide qui règne dans ces espaces. Effectivement, les simulations solaires et aérauliques effectuées sur la zone concernée montrent que ces espaces sont peu ensoleillés en été et très peu ensoleillés en hiver, avec une forte exposition aux vents dominants froid nord-est (décembre, février, mars, avril et septembre) dont la vitesse peut atteindre 5m/s pour une vitesse de référence de 3m/s , accentuée par l'effet de canalisation dû à la disposition parallèle des immeubles. Ils restent néanmoins protégés des vents dominants humides venant de l'ouest.

## L'emprise du visuel sur le vécu des habitants

« …les modalités vécues propres à chaque habitant ont certainement une communauté de sens... Outre le je, il y a sans doute un nous qui s'exprime dans la quotidienneté » [3]. Ce « nous » semble être superficiellement pris en compte dans les rénovations des grands ensembles car, dans les témoignages des habitants, il ressort que ces réaménagements menés par les bailleurs ne constituent qu'une remise au propre des espaces sans une réelle réponse à leurs attentes en termes de vie quotidienne ; certains vont même plus loin en les qualifiant de « cache-misères ». La réhabilitation du quartier Malakoff constitue une bonne illustration de ceci. L'un des trois bailleurs présents dans le quartier a procédé à une transformation complète de ses immeubles, d'une part en agrandissant certains logements plutôt que d'autres et en empiétant sur l'espace de circulation commun afin de réduire les charges d'entretiens, et d'autre part en fermant les balcons individuels avec une double isolation interne et externe afin d'améliorer l'isolation thermique et phonique. Un autre bailleur a procédé à une rénovation classique de ses immeubles : ravalement des façades, changement des fenêtres, remise aux normes du réseau électrique. Les habitants du premier bailleur sont réellement satisfaits du confort actuel de leurs logements et ils n'ont pas de difficultés à s'identifier à leurs immeubles « originalement » rénovés selon eux. En revanche les habitants du deuxième bailleur sont insatisfaits des rénovations effectuées jugées trop superficielles et souvent mal faites. Ils se comparent toujours à ceux du premier bailleur : pourquoi nos balcons n'ont-ils pas été fermés ? Leurs appartements étant bien isolés, le bruit du voisinage est moins présent... Ces rénovations, censées apporter plus d'intimité et un meilleur respect du voisinage, sont devenues une source de tensions et de conflits entre les habitants.

## Conclusion

Intégrer la notion d'ambiance ou plus précisément le vécu et la perception des habitants en amont et en aval des rénovations nous semble indispensable pour la réussite de ces opérations. Les enquêtes sociologiques basées sur des données d'évaluation classiques (classe d'âge, nombre d'habitants, équipements et services) sont loin de refléter l'attente réelle des habitants en termes d'ambiances et de bien-être dans leur quartier. Pour cela, l'une des solutions consisterait à réaliser des «parcours d'ambiances» avec les habitants pour leur permettre de décrire la perception de leur environnement. Ces expériences sensibles pourraient être croisées par la suite avec des données physiques (microclimatiques, sonores et autres), ce qui permettrait aux aménageurs d'expliciter éventuellement certaines situations d'inconfort et de gêne relevées par les habitants et donc d'y apporter une amélioration, ou tout simplement de proposer des aména-gements permettant d'agrémenter l'espace.

## Bibliographie

[1] Hatzfeld H., Moutton Y.
Les espaces libres, atouts des grands ensembles.
*CERTU, avril 2006, pp. 141*

[2] Augoyard J.-F.
Ambiances architecturales et urbaines
*Parenthèses, 1998, pp. 218*

[3] Augoyard J.-F.
Pas à pas, essai sur le cheminement quotidien en milieu urbain
*Editions du Seuil, Paris, 1979, pp. 19*

# Modélisation et simulation microclimatique couplée des aménagements urbains et du comportement thermique des bâtiments

Laurent Malys
Laboratoire CERMA, UMR CNRS 1563, ENSA Nantes
Julien Bouyer
CETE de l'Est, LRPC de Nancy, ERA 31

**Le constat de la contribution de la densification urbaine au réchauffement climatique, se répercutant lui-même sur la demande énergétique liée au bâti en perpétuelle augmentation, implique de prendre en compte les interactions thermiques au niveau de l'interface bâtiments - microclimat local. Dans ce travail, une représentation thermique nodale de bâtiment a été intégrée à un modèle de simulation microclimatique. Cet outil permet d'estimer à la fois la consommation énergétique d'un bâtiment en prenant en compte la perturbation du microclimat et la contribution du fragment urbain à l'îlot de chaleur. Nous présentons ici l'implémentation du couplage CFD / simulation thermo-radiative mis en œuvre, son intégration dans une chaîne de traitement de données spatiales et son application à un cas d'étude réel dans le cadre du projet ANR VegDUD.**

## Introduction

Avec des exigences de performance énergétique de plus en plus contraignantes, l'utilisation d'outils de simulation thermique dynamique des bâtiments devient indispensable. Certains sont utilisés pour une expertise énergétique lors d'un processus avancé de la conception du bâti par les architectes et les bureaux d'études. Or, avec les nouvelles problématiques estivales liées au réchauffement climatique et à l'îlot de chaleur urbain, il apparaît désormais nécessaire de prendre en compte, dès l'esquisse, à la fois l'effet du climat local et de l'environnement proche sur la consommation énergétique des bâtiments et l'effet rétroactif du comportement thermique du bâti sur le microclimat. Il faut alors compléter la simulation thermique de l'intérieur du bâtiment par les principaux phénomènes microclimatiques à l'échelle du fragment urbain, parmi lesquels le vent, le rayonnement solaire, les échanges de rayonnement infrarouge et l'évapotranspiration.

La première partie présente le modèle existant tel qu'il a été développé dans la thèse de Julien Bouyer [1], puis adapté à un nouveau code de mécanique des fluides : code-saturne. La seconde partie présente la manière dont l'outil va être utilisé dans le cadre du projet VegDUD et les perspectives induites en terme de développement et d'intégration.

## Outils de simulation et modèles

Afin de prendre finement en compte ces interactions, nous avons développé un outil microclimatique intégrant un modèle de thermique de bâtiment simplifié par rapport aux outils de simulation thermique dynamique classiques, mais faisant appel à une représentation plus fine de l'enveloppe externe. Le modèle microclimatique permet d'évaluer précisément l'impact d'éléments d'aménagement urbain comme la végétation ou les sols perméables.

### *Modèle microclimatique*

Le modèle microclimatique consiste en un couplage entre un code de mécanique des fluides numérique (CFD), code-saturne, et un code de simulation thermo-radiative, Solene. Il a été développé dans plusieurs thèses successives au CERMA à partir de celle de Jérôme Vinet [2]. Les champs de variables aérauliques extérieurs sont simulés dans une veine numérique (maillage 3D), avec un modèle RANS en régime stationnaire et un modèle de fermeture de turbulence k-$\varepsilon$. Des subroutines de code-saturne ont été développées afin de définir des profils de vents et de turbulence incidents et d'attribuer aux cellules internes les flux thermiques et hydriques surfaciques correspondants. Les simulations thermo-radiatives sont réalisées à l'aide du logiciel Solene développé au CERMA [3]. Dans Solene, les flux solaires incidents directs et diffus sont calculés à partir d'un modèle de ciel discrétisé,

tandis que les inter-réflexions solaires et les échanges infrarouges sont pris en compte grâce à un algorithme de radiosité, le tout aboutissant à un bilan thermique complet sur un maillage surfacique.

### *Modèle thermique de bâtiment*

Le modèle de bâtiment, intégré dans la partie thermo-radiative du couplage [1], est un modèle thermique nodal multizone qui a la particularité d'utiliser des conditions extérieures discrétisées afin de représenter le plus finement possible les effets de l'environnement. Pratiquement, chaque type de paroi (parties vitrées et non vitrées) comporte deux nœuds intérieurs reliés aux mailles extérieures correspondant à la discrétisation spatiale des maquettes thermo-radiative et aéraulique. La méthode de calcul peut être le régime libre (calcul des ambiances thermiques), le régime forcé (calcul de la consommation énergétique) ou mixte.

### *Modèle de couplage*

Le couplage est pîloté à l'aide de modules spécifiques en python. La vitesse, la température et l'humidité de l'air près de chaque facette extérieure issues des simulations aérauliques sont utilisées pour calculer le coefficient d'échange superficiel conducto-convectif et sont intégrées aux conditions aux limites dans le modèle thermo-radiatif. Les flux thermiques et hydriques résultants sont alors réinjectés dans le modèle aéraulique. Le calcul pour un pas de temps est poursuivi jusqu'à ce que la température extérieure converge d'une itération à l'autre.

## Application dans le cadre du projet VegDUD

### *Présentation du projet*

Le projet ANR villes durables « VegDUD : le rôle de la végétation dans le développement urbain durable » a notamment pour objectif d'évaluer l'impact d'aménagements végétaux sur le microclimat urbain et sur la consommation énergétique des bâtiments. Son volet modélisation (« MODE ») doit permettre de développer des modèles microclimatiques urbains intégrant les effets de différents dispositifs végétaux, que ce soit à l'échelle du bâtiment et de son interface avec l'environnement ou à l'échelle de la rue, de l'îlot ou du quartier.

Dans le cadre de la thèse de Laurent Malys [4], qui s'inscrit dans ce projet, le modèle présenté sera utilisé pour déterminer l'effet de dispositifs végétaux sur la consommation énergétique du bâtiment à l'échelle du fragment urbain en prenant en compte l'effet indirect de la modification du microclimat. Il a donc été intégré dans une chaîne de traitements permettant de tester différents scénarios de densification et de végétalisation sur des cas d'applications réels avec des données provenant d'une base de données géographique.

### *Amélioration du modèle dans le cadre du projet*

Les modèles de végétation, qui ne traitent pour l'instant que des pelouses et des arbres avec des approches simplifiées, nécessitent des compléments. Des modèles de toitures et de façades végétales prenant en compte l'évapotranspiration de la végétation en fonction des paramètres climatiques et de l'état hydrique des feuilles et du substrat seront intégrés. Il est envisagé d'utiliser des modèles nodaux unidimensionnels avec un nœud pour les feuilles et un nœud pour l'air au sein de la couverture végétale [5].

### *Cas d'étude du quartier Pin Sec et intégration avec les autres volets du projet*

Une campagne expérimentale est menée dans le cadre du projet sur l'Observatoire Nantais des Environnements Urbains (ONEVU) dans le quartier du Pin Sec à Nantes. En plus des mesures météorologiques classiques, elle permettra d'obtenir des données plus spécifiques,

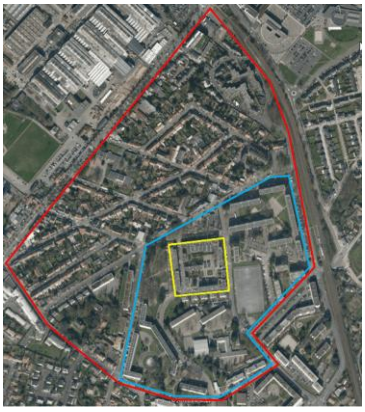


**Figure 1 :** Vue aérienne du quartier Pin Sec (zone rouge), zone d'intérêt pour les simulations aérauliques (zone bleue) et pour les simulations thermo-radiatives (zone jaune)

notamment des mesures de flux et la caractérisation de l'occupation du sol. Ce quartier sera également utilisé comme cas d'étude pour l'application du modèle présenté ici.

**Importation des données d'entrée**

L'outil de couplage a été adapté pour traiter les données issues du SIG utilisé dans le volet PHYSIO. La chaîne de traitement permet ainsi la production de maquette et l'attribution à celle-ci de données diverses issues de mesures ou des bases de données géographiques : type de bâtiment, couverture végétale, espèces d'arbre, caractéristiques radiatives des couverts, etc. Une maquette 3D du quartier a été créée et des résultats préliminaires sur la consommation énergétique d'un bâtiment et sur les tempé-ratures de surface ont été obtenus.

**Validation du modèle**

Les mesures météorologiques et les températures de surfaces issues de la campagne expérimentale serviront à vérifier si le modèle thermo-hygro-aéraulique permet de reproduire les modifications du microclimat local sur l'écoulement du vent et les variations de l'humidité et de la température de l'air ambiant et si les modèles thermiques des bâtiments et des surfaces urbaines permettent de retrouver les températures de surfaces mesurées. Il n'est pas prévu de validation concernant la consommation énergétique des bâtiments.

## *Projections sur le quartier Pin Sec*

Différents scénarios de densification et de végétalisation du quartier Pin Sec seront établis. Le modèle sera alors utilisé pour évaluer leur impact sur le microclimat et sur la consommation énergétique des bâtiments. Il s'agira dans un premier temps de déterminer quelles pourraient être les évolutions possibles d'un quartier tel que celui du Pin Sec dans le cadre d'une politique de densification urbaine, en s'appuyant sur la réglementation ou bien, par analogie avec des projets existants, sur des quartiers similaires. Le choix de la morphologie urbaine sera un point sensible de l'établissement des scénarios. Dans un deuxième temps, des scénarios de végétalisation à l'aide de toitures et de façades végétales seront testés afin de déterminer si la végétation est en mesure d'atténuer l'effet exothermique de la densification.

## Bibliographie

[1] Bouyer J.
Modélisation et simulation des microclimats urbains, impact de l'aménagement urbain sur les consommations énergétiques des bâtiments
*Thèse de doctorat, École polytechnique de l'Université de Nantes 2009, 312 p.*

[2] Vinet J.
Contribution à la modélisation thermo-aéraulique du microclimat urbain. Caractérisation de l'impact de l'eau de et la végétation sur les conditions de confort en espaces extérieurs
*Thèse de doctorat, École polytechnique de l'Université de Nantes 2000, 245 p.*

[3] Miguet F., Groleau D. et Marenne C.
A combined sunlight and skylight tool for microclimatic analysis in urban architectures
*Solar Energy in Architecture and Urban Planning 4th European conference*
*H.S. Stephens and Associates, 1996, pp. 338-341*

[4] Malys L.
Modélisation microclimatique de la végétation urbaine, évaluation de l'impact de dispositifs végétaux architecturaux sur la consommation énergétique des bâtiments
*Thèse de doctorat, École Centrale de Nantes en cours*

[5] Palomo Del Barrio E.
Analysis of the green roofs cooling potential in buildings
*Energy and Buildings vol. 27, n° 2, 1998, pp. 179-19*

# Développement d'un code CFD de simulation atmosphérique prenant en compte le rayonnement atmosphérique pour des géométries urbaines complexes

Yongfeng Qu, Maya Milliez, Luc Musson-Genon, Bertrand Carissimo
Centre d'Enseignement et de Recherche en Environnement Atmosphérique (CEREA)
Laboratoire Commun Ecole des Ponts ParisTech - EDF R&D

**Afin de prendre en compte le rayonnement atmosphérique et les effets thermiques des bâtiments dans les simulations d'écoulement atmosphérique et de dispersion des polluants en milieu urbain, nous avons développé un modèle de rayonnement atmosphérique tri-dimensionnel dans le module atmosphérique du code CFD open-source *Code_Saturne*. Le modèle radiatif a déjà été validé avec des cas simples et les résultats d'un cas réel. Nous présentons ici les résultats du couplage du modèle radiatif et thermique avec le modèle d'écoulement dynamique 3D sur une journée de la campagne MUST (Mock Urban Setting Test) réalisée aux USA. De plus, nous comparerons les résultats avec des approches plus simples issues de la littérature.**

## Introduction

L'intérêt pour la micro-climatologie en milieu urbain a augmenté au cours des dix dernières années. Il s'agit d'étudier la réponse de l'écoulement atmosphérique aux sollicitations thermiques d'un système urbain avec des transferts radiatifs et des échanges convectifs en tenant compte des parois des bâtiments. Afin de modéliser plus précisément l'écoulement dans la canopée urbaine avec des conditions stratifiées et de prendre en compte les échanges convectifs en trois dimensions, nous avons développé un schéma tridimensionnel du rayonnement à micro-échelle dans un code de CFD (Computational Fluid Dynamics) qui s'adapte à la géométrie complexe. Le schéma radiatif a été validé avec des cas idéalisés et les résultats d'un cas réel (Milliez et *al*, 2006 [8] ; Milliez, 2006 [9]). Ici, nous présenterons le modèle et nous discuterons des résultats du couplage complet.

## Équations et modèles

### *Le modèle CFD*

Les simulations sont effectuées avec le modèle CFD Open-Source *Code_Saturne* qui est capable de traiter la physique en géométrie complexe. Dans ce travail, nous utilisons le module atmosphérique, qui prend en compte les conditions météorologiques à plus grande échelle et la stratification de l'atmosphère. Dans nos simulations, nous utilisons une approche RANS avec une fermeture de turbulence k-ε. Le solveur numérique est basé sur une approche en volumes finis pour les variables co-localisées en maillage non structuré. La discrétisation temporelle est obtenue par un schéma de pas fractionnaires, avec une étape de prédiction-correction (Archambeau et *al*, 2003 [1] ; Milliez et Carissimo 2007, 2008 [6]).

### *Le modèle radiatif*

Nous avons adapté à l'atmosphère un schéma radiatif de transfert de chaleur, disponible dans *Code_Saturne* pour la géométrie complexe. Ce modèle, basé sur la Méthode des Ordonnées Discrètes (DOM), résout l'équation de transfert radiatif pour un milieu gris semi-transparent (Milliez et *al*, 2006 [8] ; Milliez 2006 [9]). Etant un paramètre clé, la température de surface est déterminée par le bilan d'énergie de surface et est liée de manière fondamentale à chacune de ses composantes de flux. Nous l'avons obtenue avec une approche simple : la méthode Force-Restore, qui est largement utilisée pour la modélisation du sol dans les modèles météorologiques :

$$\frac{\partial T_w}{\partial t} = \frac{\sqrt{2\omega}}{\mu_w} Q_w^* - \omega(T_w - T_{g/b}) \qquad (1)$$

où $T_w$ est la température de paroi, ω est la fréquence angulaire de rotation de la Terre, $\mu_W$ est l'admittance thermique, $T_{g/b}$ est la température du sol en profondeur ou la température intérieure des bâtiments, $Q_w$* est le flux net total

reçu par la paroi. Ce dernier peut être exprimé comme :

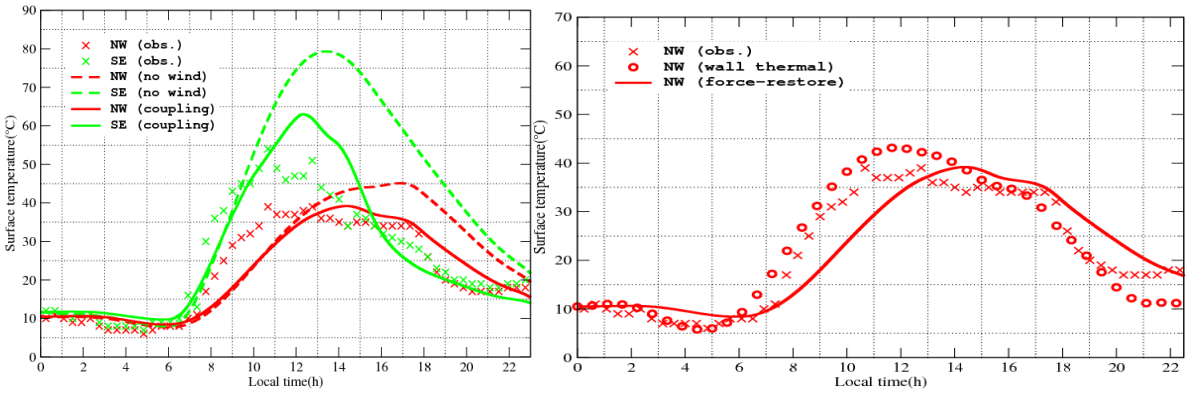
$$Q_w^* = Q_S^* + Q_L^* - Q_H - Q_{LE} - Q_F \qquad (2)$$

où $Q_S$* et $Q_L$* désignent les flux nets à grande et courte longueurs d'onde, $Q_H$ le flux de chaleur sensible, $Q_{LE}$ le flux de chaleur latente et $Q_F$ le flux de chaleur anthropique.

## Résultats

Notre validation est basée sur l'expérience Mock Urban Setting Test (MUST) (Yee et Biltoft 2004 [2]). MUST est avant tout dédié à l'étude de la dispersion en milieu bâti (Milliez et Carissimo 2007 et 2008 [6]). Elle comprend également des mesures de tempé-ratures de parois que nous avons décidé d'exploiter pour étudier en détail le couplage dynamique-radiatif. Le domaine a été réduit à trois rangées de trois containers avec une taille de domaine optimisée. Nous avons simulé la journée du 25 septembre 2001. La variation de la température profonde du sol est négligée. La température à l'intérieur du bâtiment est mise à jour avec la température moyennée sur la surface au pas de temps précédent. Les valeurs de l'albédo, de l'émissivité et de l'admittance thermique ne sont pas fournies dans l'expérience, nous avons donc utilisé les valeurs trouvées dans la littérature. Les évolutions des températures de la journée pour la face correspondant au toit, face SE, (et la face NE, non montrée ici) sont correctement reproduites par notre modèle couplé en utilisant la méthode Force-Restore (Figure 1 gauche). Pour la face NW (et la face SW, non montrée ici) il y a, dans les résultats du modèle, un retard dans le réchauffement. Ceci peut être dû à la conduction entre les parois des containers qui n'est pas prise en compte dans les simulations. En supposant la présence d'une isolation à l'intérieur du bâtiment, un modèle de paroi thermique est capable de réduire le retard dans le réchauffement (Figure 1 droite). Les résultats de simulation montrent une différence d'amplitude importante entre le modèle couplé et le modèle radiatif seul, mettant en avant l'importance de modéliser la dynamique avec précision dans les modélisations à micro-échelle.

**Figure 1 :** Evolution des températures des parois (obs : mesures ; no wind : simulation avec le rayonnement seul ; coupling : simulation avec le couplage dynamique-radiatif ; wall thermal : modèle de paroi thermique, force-restore : le modèle force-restore).




## Discussion : comparaison de trois méthodes utilisées pour prédire le flux de chaleur sensible

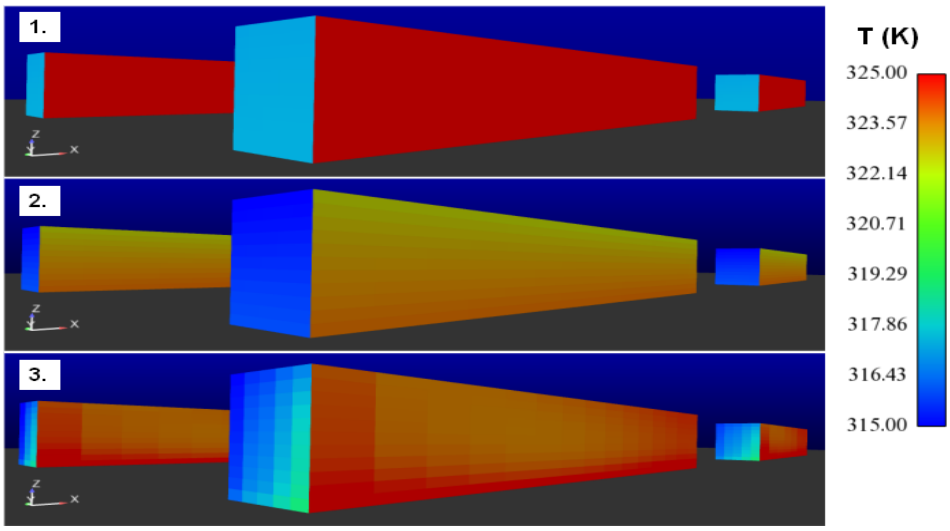
Dans cette partie, nous allons comparer trois schémas prédisant le flux de chaleur sensible. Le cas simulé est basé sur le précédent : il a lieu de 12h à 12h 30 le même jour, avec une direction du vent en amont de - 45°. La température initiale de l'air est de 18° C, la vitesse du vent à 10 m est de 4 $ms^{-1}$.

La Figure 2 résume les résultats des trois schémas convectifs en visualisant la température de parois. Le schéma constant $h_f$ (Figure 2.1), qui est généralement utilisé dans les outils de simulation en architecture (Miguet et Groleau 2002 [5]), donne un coefficient de transfert constant. Avec le schéma 1D $h_f$ (Figure 2.2), le coefficient de transfert thermique est calculé sur une relation simple (Krayenhoff et Voogt 2007 [3]) qui est fonction du profil du vent 1D à l'intérieur de la canopée urbaine. Dans notre cas, nous avons utilisé un profil exponentiel de

(Macdonald 2000 [4]). Dans le modèle 3D $h_f$ (Figure 2.3), $h_f$ est calculé en résolvant les équations 3D RANS dans l'ensemble du domaine fluide.

Pour ce cas, les trois schémas convectifs ont donné une différence du flux sensible autour de 100 ~ 240 W $m^{-2}$ aux faces SE et NE. La température moyenne de surface calculée par les trois schémas convectifs reste similaire. De plus, comme le réseau bâti n'est pas très dense dans la configuration MUST, les effets d'ombre et de multi-réflexions sont faibles. C'est la raison pour laquelle les températures sur chaque face, dans l'approche $h_f$ constante, montrent peu de différence. Avec le modèle $h_f$ 1D, on peut voir clairement l'inhomogénéité 1D des températures de surface qui est liée à la loi exponentielle. Les résultats du modèle $h_f$ 3D montrent l'inhomogénéité 3D des températures de surface, liée à l'hétérogénéité du vent 3D. Sur la même face, nous pouvons avoir une différence de température d'environ 4K. Ces résultats démontrent l'effet important de la méthode de calcul du flux convectif sur les températures de surface en milieu urbain. Il faut aussi noter que dans la comparaison de ces trois schémas convectifs, nous n'avons changé que le coefficient de transfert et non pas la température de l'air (qui est calculée pour chaque maille du domaine fluide).

**Figure 2 :** Comparaison des trois modèles de convection avec le mur de visualisation SE et NE à 12h30 : 1 modèle hf Constant ; modèle hf 1D ; 3 modèle hf 3D).




## Conclusions et perspectives

L'évaluation du modèle micro-échelle avec un couplage 3D dynamique-radiatif utilisant les observations d'un milieu urbain idéalisé, MUST, suggère que le modèle de couplage dynamique-radiatif marche assez bien. Le modèle est capable de reproduire l'évolution des températures pour les différentes faces d'un container au cours d'un cycle diurne. L'impact de la convection sur la température de surface est significatif. Le calcul 3D du flux de chaleur sensible permet de prédire plus précisément les températures de surface non uniforme. Dans le cas MUST, la canopée urbaine est idéalisée. Les incertitudes associées à l'épaisseur et aux matériaux du mur du bâtiment limitent la validation des résultats. Ainsi, la perspective de ce travail est d'améliorer le modèle de paroi thermique. En outre, le modèle couplé dynamique-radiatif sera utilisé en milieu urbain réel sur l'expérience CAPITOUL (Ville de Toulouse, France).

## Bibliographie

[1] Archambeau F. and Mechitoua, N. and Sakiz M., 2003
Code_Saturne: a Finite Volume Code for the Computation of Turbulent Incompressible Flows Industrial Applications
*International Journal on Finite Volumes*

[2] Biltoft C.A., 2001
Customer report for Mock Urban Setting Test
*DPG Document No. WDTC-FR-01-121, West Desert Test Center, U.S. Army Dugway Proving Ground, Dugway, Utah*

[3] Krayenhoff E.S. and Voogt J.A., 2007
A microscale three-dimensional urban energy balance model for studying surface temperatures
*Boundary-Layer Meteorology 123, 433-461*

[4] Macdonald R.W. 2000
Modelling the mean velocity profiles in the urban canopy layer
*Boundary-Layer Meteorology 97, 25-45*

[5] Miguet F. and Groleau D., 2002
A daylight simulation tool for urban and architectural spaces – application to transmitted direct and diffuse light through glazing
*Build Environ., 37, 833-843*

[6] Milliez M. and Carissimo B., 2008
CFD modelling of concentration fluctuations in an ideal-ized urban area, for different meteorological conditions
*Boundary-Layer Meteorology, 127, 241-259*

[7] Milliez M. and Carissimo B., 2007
Numerical simulations of pollutant dispersion in an idealized urban area, for different meteorological conditions
*Boundary-Layer Meteorology, 122, 321-342*

[8] Milliez M., Musson-Genon, L. and Carissimo B., 2006
Validation of a radiative scheme for CFD modelling of heat transfers between buildings and flow in urban canopies
*Preprints of the 6th International Conference on Urban Climate, Goteborg, Sweden; June 12-16*

[9] Milliez M., 2006
Modélisation micro-météorologique en milieu urbain: dispersion des polluants et prise en compte des effets radiatifs
*Ph.D. Thesis, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées*

# Impact des technologies de contrôle des émissions du trafic routier sur la qualité de l'air à Paris

Yelva Roustan, Marie Pausader, Christian Seigneur
Centre d'Enseignement et de Recherche en Environnement Atmosphérique
Laboratoire commun École des Ponts ParisTech - EDF R&D, Université Paris-Est

**Malgré le développement et l'utilisation depuis des années de technologies visant à réduire les émissions toxiques du trafic routier, l'impact sur la qualité de l'air de ces émissions reste important, particulièrement en Île de France. L'étude par modélisation présentée ici s'attache à déterminer les contributions respectives des différents phénomènes qui pourraient expliquer les tendances actuelles observées pour les concentrations de polluants liés au trafic routier. Les résultats obtenus suggèrent que la réduction des émissions de $NO_x$ doit être accompagnée de mesures de réduction des COVNM plus importantes que celles envisagées dans le secteur des transports routiers pour éviter un accroissement des niveaux d'ozone. Les concentrations en $NO_2$ modélisées passent par un maximum en 2010 du fait de la « diésélisation » du parc de véhicules particuliers et d'un accroissement du ratio $NO_2/NO_x$ à l'émission lié à l'utilisation de filtres à particules. Enfin, les concentrations en $PM_{2.5}$, de façon prévisible, ne diminuent pas proportionnellement aux réductions des émissions.**

## Contexte et motivation de l'étude

La contribution du trafic routier à la pollution de l'air en région Île de France est évaluée comme étant significative [1] [2] [3] [4]. Les concentrations d'oxydes d'azote ($NO_x$[1]) y ont décru de moitié de 1994 à 2008 alors que dans le même temps celles de dioxyde d'azote ($NO_2$) sont restées a peu près constantes. Les concentrations d'ozone ($O_3$), à l'exception de la variabilité interannuelle liée à la météorologie, sont également globalement stables depuis 2001. Les concentrations en particules fines ($PM_{2.5}$)[2] ont peu diminué de 2000 à 2007 avec des niveaux moyens pour 2007 restant à 14 µg/m$^3$ [5].

De l'observation de ces tendances il apparaît utile d'évaluer dans quelle mesure les technologies de contrôle des émissions du trafic routier affecteront les concentrations des polluants atmosphériques dans les années à venir. Nous présentons ici une étude par modélisation sur la période 2005-2020 de l'impact des évolutions des émissions du trafic routier sur les concentrations d'$O_3$, de $NO_2$ et de $PM_{2.5}$.

Dans plusieurs zones urbaines européennes, il a été constaté que les concentrations en $NO_2$ n'ont pas décru ces dernières années alors que les émissions de $NO_x$ diminuent [6]. Une raison expliquant cela serait la concomitance de la « diésélisation » du parc de véhicules particuliers et de l'augmentation du ratio $NO_2/NO_x$ à l'émission liée à l'utilisation de filtre à particules (FAP) [7] [8]. Une autre explication avancée invoque le rôle joué par la photochimie atmosphérique, en particulier par $O_3$, dans la formation de $NO_2$ secondaire[3].

En ce qui concerne la réduction des émissions de particules liée à l'installation de FAP, on peut s'attendre à ce que l'effet sur les concentrations en $PM_{2.5}$ ne soit pas proportionnel du fait de l'impact limité sur la fraction secondaire des particules.

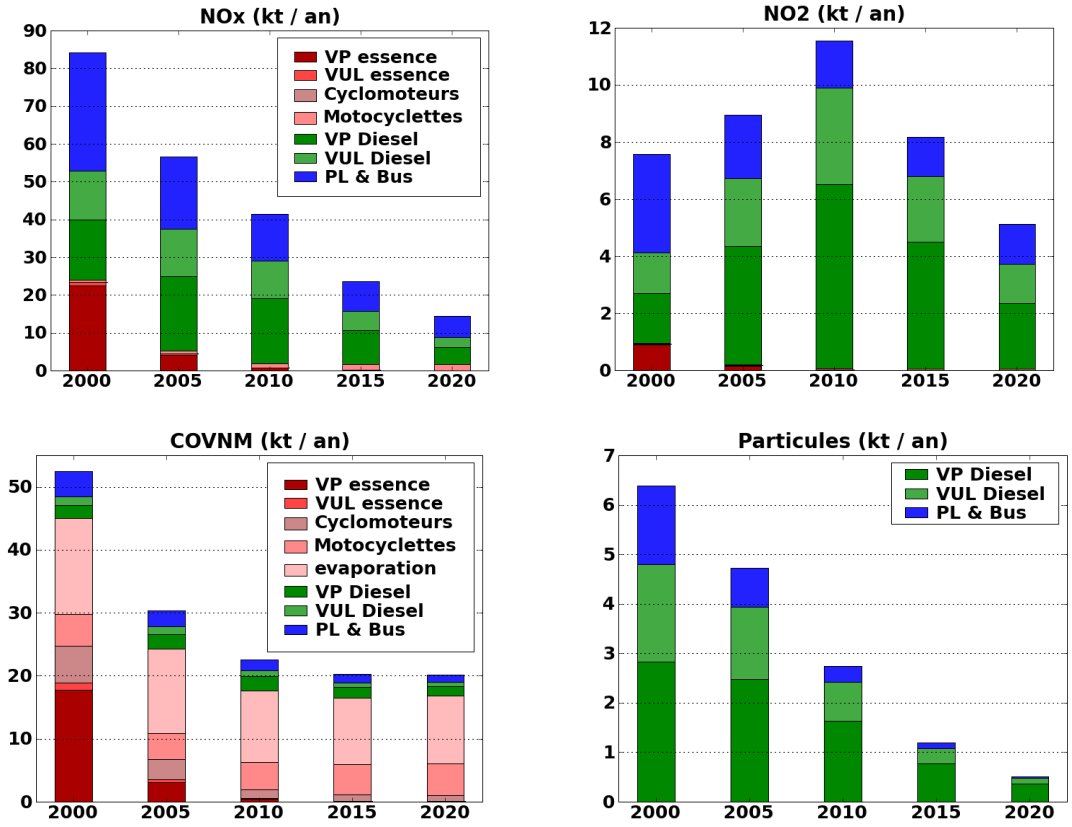
Enfin, les technologies de réduction des émissions concernent également les composés organiques volatiles non méthaniques (COVNM). En milieu urbain, ceci serait susceptible de conduire à une diminution des concentrations d'$O_3$, mais la décroissance conjointe des émissions de $NO_x$ peut entraîner des effets de compensation indésirables.

[1] On utilise ici la notation usuelle décrivant les $NO_x$ comme l'aggrégation de NO et $NO_2$.
[2] Particules de diamètre aérodynamique inférieur à 2,5 µm.
[3] Produit par réaction chimique dans l'atmosphère et non directement émis.

## Méthodologie de l'étude

L'étude a été conduite sur la base de simulations numériques de qualité de l'air utilisant un ensemble de données communes relatives à l'année 2005 à l'exception de celles correspondant aux émissions du trafic routier, modifiées pour chaque simulation. Cela a permis de concentrer l'analyse sur les effets de l'évolution de ces émissions. L'étude repose sur le développement de cadastres d'émission future pour le secteur des transports routiers. L'estimation du parc de véhicules projeté a été basée sur les données d'immatriculation du Service de l'Observation et des Statistiques (SOeS) du Commissariat Général au Développement Durable (CGDD). Ces données ont été extrapolées pour les années futures selon la méthodologie proposée dans [9]. L'utilisation moyenne des véhicules a été supposée constante sur la période envisagée. Les facteurs d'émissions correspondants utilisés ont été obtenus à partir du modèle d'émissions COPERT [10]. Cette méthode de projection a été appliquée à un cadastre déjà existant (cadastre Airparif) pour l'Île de France pour l'année 2000.

**Figure 1 :** Evolution modélisée des émissions du trafic routier en Île de France



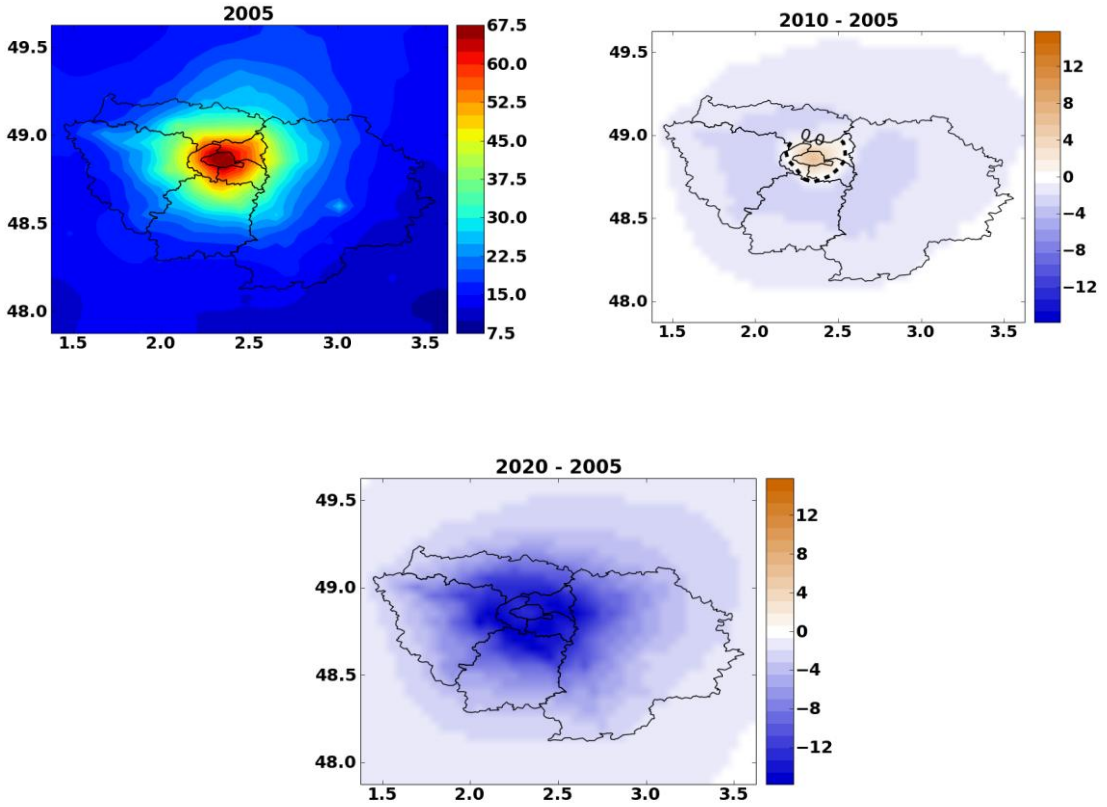

Oxydes d'azote (NOx), dioxyde d'azote (NO2), Composé Organique Volatil Non Méthanique (COVNM).

Les simulations numériques de qualité de l'air ont été réalisées avec le modèle de chimie-transport de la plate-forme POLYPHEMUS [11]. Ce modèle représente l'évolution des concentrations des principaux polluants impliqués dans la pollution photochimique sous l'effet des différents forçages déterminant la qualité de l'air (météorologie, émissions, etc...). Une évaluation des résultats du modèle par compa-raison à des observations (Base de données de qualité de l'air de l'ADEME) pour l'année 2005 a été réalisée pour les polluants considérés dans cette étude [12]. Les résultats se sont révélés au niveau de l'état de l'art du domaine.

## Analyse des résultats

La Figure 1 montre l'évolution projetée des émissions du trafic routier de $NO_x$, de $NO_2$, de COVNM et de particules de 2000 à 2020. L'augmentation du trafic prévue ne neutralise pas la réduction des facteurs d'émissions pour les $NO_x$, les COVNM et les particules, ce qui conduit pour ces espèces à une baisse des émissions de 2000 à 2020. Ces réductions représentent une baisse entre 2005 et 2020 des émissions tous secteurs confondus de l'ordre de 38 %, 7 % et 32 % respectivement. Il est intéressant de noter que l'objectif de réduction des émissions de 30 % établi par le « Plan Particule » pour 2015 est atteint pour le secteur des transports routiers sans autres mesures que celles envisagées à travers les facteurs d'émissions dérivés par Hugrel et Joumard (2006) [10]. Le passage par un maximum pour les émissions de $NO_2$ s'explique par la compétition entre la baisse des émissions de $NO_x$ et l'augmentation du ratio $NO_2/NO_x$ à l'émission, la première tendance prenant le pas sur la seconde après 2010.

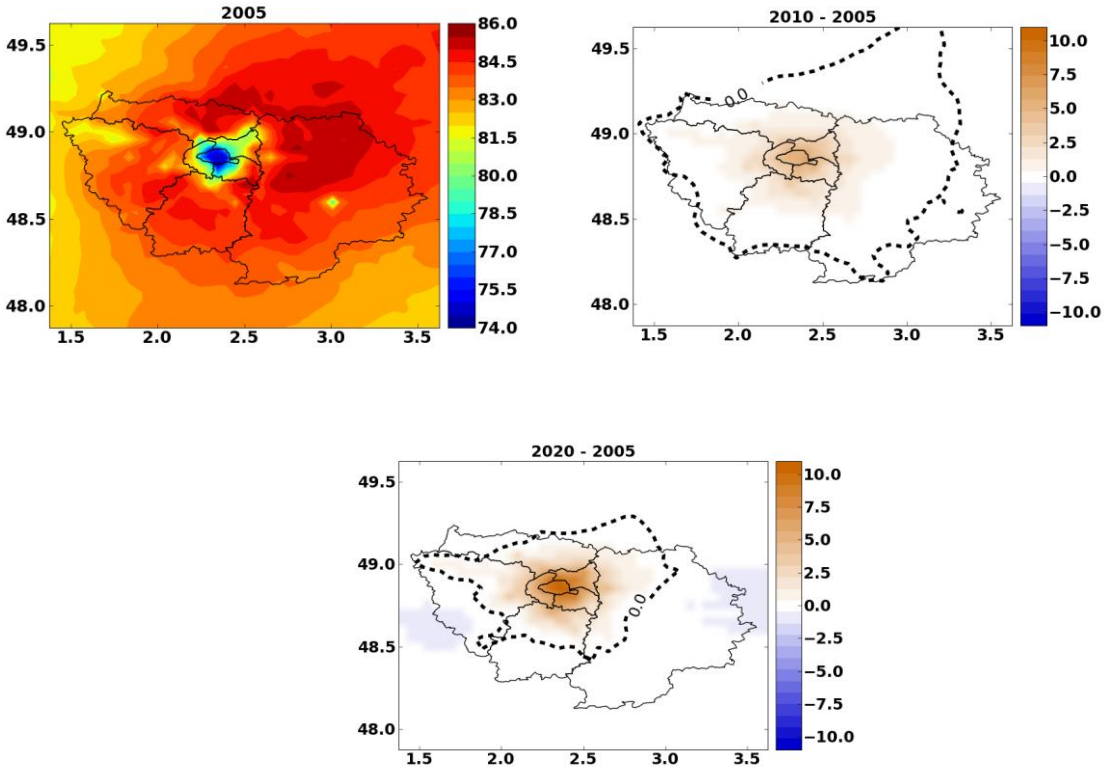
**Figure 2 :** Concentrations de $NO_2$ en 2005 et évolution en 2010 et 2020 (en $\mu g.m^{-3}$)




L'évolution de la moyenne annuelle du maximum journalier des concentrations horaires de $NO_2$ sur l'ensemble du domaine modélisé (Figure 2) montre que les concentrations augmentent dans le centre de l'Île de France entre 2005 et 2010 et baissent sur l'ensemble du domaine à l'horizon 2020. L'exploration réalisée par ailleurs dans cette étude du rôle de la chimie atmosphérique montre qu'elle ne permet pas d'expliquer ce passage par un pic en 2010 qui est lié à l'évolution des émissions.

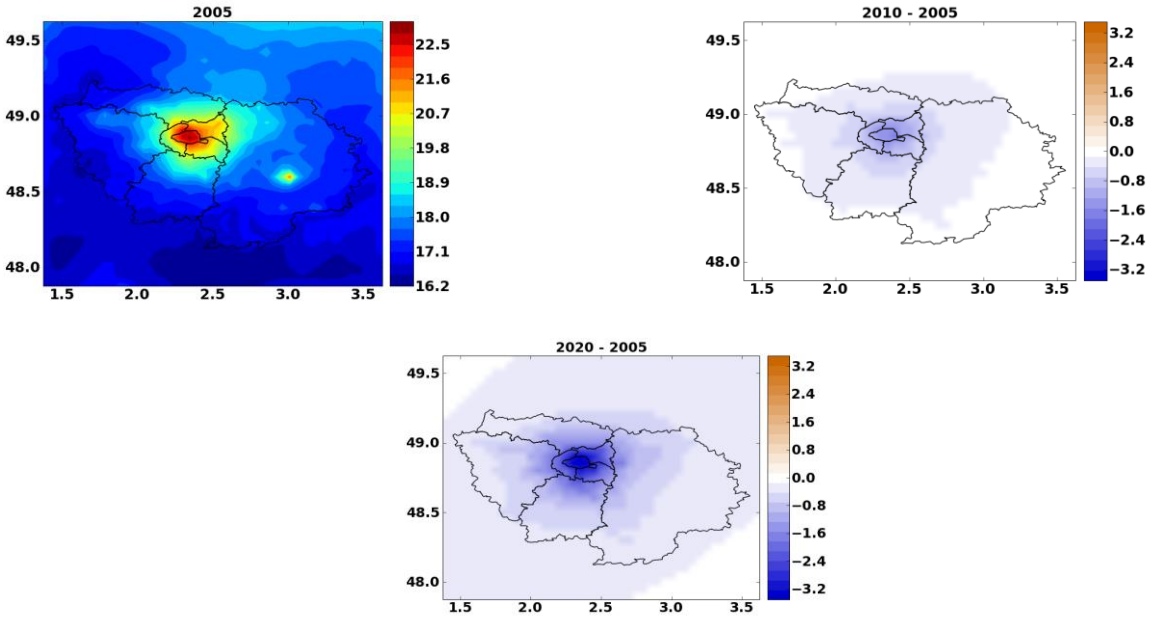
La Figure 3 illustre l'évolution de la moyenne sur la « saison d'ozone » (avril à septembre) du La Figure 3 illustre l'évolution du maximum journalier des moyennes sur huit heures des concentrations d'ozone. Les concentrations augmentent de 2005 à 2020 dans la partie centrale du domaine et décroissent dans les bordures extérieures. L'augmentation s'explique par un effet local plus fort des diminutions des émissions de $NO_x$ (qui, en régime chimique urbain typique, conduisent à la titration de l'ozone) que de celles de COVNM. La réduction des émissions de COVNM se fait toutefois sentir dans les zones périurbaines.

**Figure 3 :** Concentrations de $O_3$ en 2005 et évolution en 2010 et 2020 (en µg.m$^{-3}$)




La Figure 4 présente les résultats concernant l'évolution des concentrations moyennes annuelles en $PM_{2.5}$. Une réduction des concentrations est attendue pour l'ensemble du domaine. Le fait que son intensité ne soit pas proportionnelle à la diminution des émissions s'explique par le rôle des apports extérieurs au domaine et par la part secondaire des particules qui représente une proportion importante de la masse. On ne peut donc s'attendre à ce qu'une réduction des émissions primaires, même importante, conduise à une forte réduction des concentrations.

**Figure 4 :** Concentrations de $PM_{2.5}$ en 2005 et évolution en 2010 et 2020 (en µg.m$^{-3}$)



## Conclusion

Les résultats de cette étude permettent d'éclairer les tendances observées pour les concentrations de $O_3$, $NO_2$ et $PM_{2.5}$ en Île de France. La stagnation des concentrations d'$O_3$ peut être reliée à la diminution simultanée des émissions de $NO_x$ et de COVNM. De plus fortes réductions portant sur les émissions de COVNM devraient permettre d'éviter les effets de compensation indésirables. Pour les concentrations de $NO_2$, la stagnation est probablement à relier à une augmentation temporaire des émissions. Une décroissance devrait survenir selon les tendances actuelles de l'évolution des émissions. Enfin, du fait de la proportion forte en particules secondaires, les mesures visant la réduction des concentrations devraient également considérer les précurseurs gazeux pour gagner en efficacité.

## Bibliographie


[1] Zmirou D., Gauvin S., Pin I., Momas I., Sahraoui F., Just J., Le Moullec Y., Brémont F., Cassadou S., Reungoat P., Albertini M., Lauvergne N., Chiron M., Labbé A.
Traffic related air pollution and and incidence of childhood asthma
*J. Epidemiol. Community Health, Vol. 58, pp. 18-23, 2004*

[2] Airparif
Évaluation de la qualité de l'air en Île-de-France à l'échéance 2010 et impact du Plan de Protection de l'Atmosphère
*Rapport Airparif, 2004*

[3] DRIRE Île de France
Plan de Protection de l'Atmosphère
*Rapport final, 2006*

[4] Nedellec V., Lagache R., Guillaume B., Liousse C., Jeannée N., Mosqueron L., Desqueyrous H.
Effets des normes EURO IV et V sur la réductioin des impacts sanitaires du trafic routier urbain en France
*Environnement Risques & Santé, Vol 9, pp 39-50, 2010*

[5] Airparif
Bilan de la qualité de l'air en Île-de-France en 2009
*Rapport Airparif, 2ème édition, mars 2010*

[6] Carslaw D.
Evidence of an increasing NO2/NOx emissions ratio from road traffic emissions
*Atmos. Environ., Vol. 39, pp 4793-4802, 2005*

[7] Shorter J.H., Herndon S., Zahniser M.S., Nelson D.D., Wormhoudt J., Demerjian K.L., Kolb C.E.
Real-time measurements of nitrogen oxide emissions from in-use New York city transit buses using a chase vehicle
*Environ. Sci. Technol., Vol. 39, pp 7991-8000, 2005*

[8] Kousoulidou M., Ntziachristos L., Mellios G., Samaras Z.
Road-transport emissions projections to 2020 in European urban environment
*Atmos. Environ., Vol. 42, pp 7465-7475, 2008*

[9] Lacour S. et Joumard R.
Parc, usage et émissions des véhicules routiers en France de 1970 à 2020
*Rapport Technique 0208, INRETS - LTE, 2002*

[10] Hugrel C. et Joumard R.
Directives et facteurs agrégés d'émission des véhicules routiers en France
*Rapport Technique 0611, INRETS - LTE, 2006*

[11] Mallet V., Quélo D., Sportisse B., Ahmed de Biasi M., Debry É, Korsakissok I., Wu L., Roustan Y., Sartelet K., Tombette M., Foudhil H.
Technical note : the air quality modeling system polyphemus
*Atmos. Chem. Phys., Vol. 7, pp 5479-5497, 2007*

[12] Roustan Y., Pausader M., Seigneur C.
Estimating the effect of on-road vehicle emission controls on future air quality in Paris
*Atmos. Environ., doi :10.1016/j.atmosenv.2010.10.010, 2010*

# - C -

# Ville et énergie

# Modélisation de la demande énergétique des bâtiments à l'échelle d'un quartier

Adrien Gros, Emmanuel Bozonnet, Christian Inard
LEPTIAB, Université de La Rochelle

**Le milieu urbain est le siège d'un microclimat particulier principalement caractérisé par le phénomène d'îlot de chaleur urbain (ICU). L'augmentation des besoins de climatisation liée à l'ICU entraîne des rejets de chaleur, d'où un phénomène de rétroaction. Microclimat urbain et demande énergétique des bâtiments étant fortement liés, l'objet de cette étude est de présenter la méthodologie afin de développer un modèle prenant en compte ce couplage dans la modélisation thermique des bâtiments en milieu urbain.**

## Contexte et objectif

Le bâtiment représente, parmi tous les secteurs économiques, le plus gros consommateur d'énergie. La France ayant pour objectif de diviser par 4 l'énergie finale consommée, le secteur du bâtiment représente alors un acteur clef pour résoudre ce défi environnemental. Dans le cadre de l'amélioration des performances énergétiques du bâtiment, les outils de modélisation thermique dynamique des bâtiments sont indispensables.Traditionnellement, afin d'évaluer les performances énergétiques des bâtiments, les données climatiques de la station météorologique la plus proche sont utilisées pour la simulation des besoins énergétiques. Cependant, le milieu urbain est caractérisé par des conditions microclimatiques particulières qui peuvent être localement très différentes de ces données météorologiques ponctuelles. Le phénomène le plus représentatif du microclimat urbain est le phénomène d'îlot de chaleur qui se caractérise par des températures d'air en centre ville supérieures à celles en zone rurale.

Les exigences de confort actuel entraînent une utilisation de plus en plus massive des systèmes de climatisation en période estivale. L'emploi de ces climatiseurs entraîne des rejets de chaleur qui ont pour effet d'augmenter les températures d'air dans les rues et donc d'intensifier l'îlot de chaleur urbain [1]. Il apparaît alors un phénomène de rétroaction positif entre les besoins en rafraîchissement des bâtiments et le phénomène d'îlot de chaleur urbain. Pour pouvoir prendre en compte ce phénomène de rétroaction dans la modélisation des performances énergétiques des bâtiments, il est alors nécessaire de coupler la modélisation du microclimat urbain à la modélisation des ambiances intérieures des bâtiments.

La modélisation des besoins énergétiques des bâtiments à l'échelle d'un quartier permettra de mettre en évidence l'interaction entre les bâtiments et l'environnement urbain. Ce couplage se fera à l'aide d'un modèle réduit de bâtiment, d'un modèle thermo-aéraulique urbain simplifié, d'un modèle de rayonnement courte longueur d'onde, d'un modèle de rayonnement grande longueur d'onde linéarisé et d'un modèle de transfert hydrique. Nous proposons dans cette étude de présenter les trois premiers modèles qui serviront au couplage final.

## Modèle réduit de bâtiment

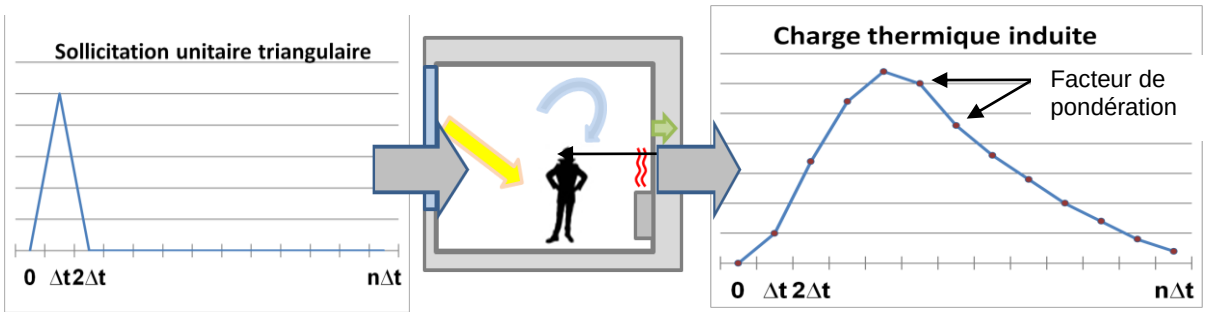
L'utilisation d'un modèle réduit de bâtiment permet de simplifier la modélisation des conditions microclimatiques urbaines tout en prenant en compte les différents transferts thermiques présents dans les bâtiments. Ce modèle réduit de bâtiment doit être suffisamment précis pour pouvoir décrire les ambiances intérieures des bâtiments, en intégrant des solutions techniques particulières et les scénarii d'occupation. La méthode des facteurs de pondération servira à déterminer les besoins énergétiques d'un ou plusieurs locaux représentatifs qui serviront à composer l'ensemble du cadre bâti à l'échelle d'un quartier.

La méthode des facteurs de pondération consiste à déterminer les réponses thermiques temporelles discrètes d'un local aux sollicitations unitaires suivantes : températures de surfaces extérieures du local, rayonnement solaire pénétrant dans le local, température d'air intérieur du local. Ces résultats sont ensuite utilisés pour déterminer la réponse thermique

de ce local à une sollicitation d'intensité quelconque.

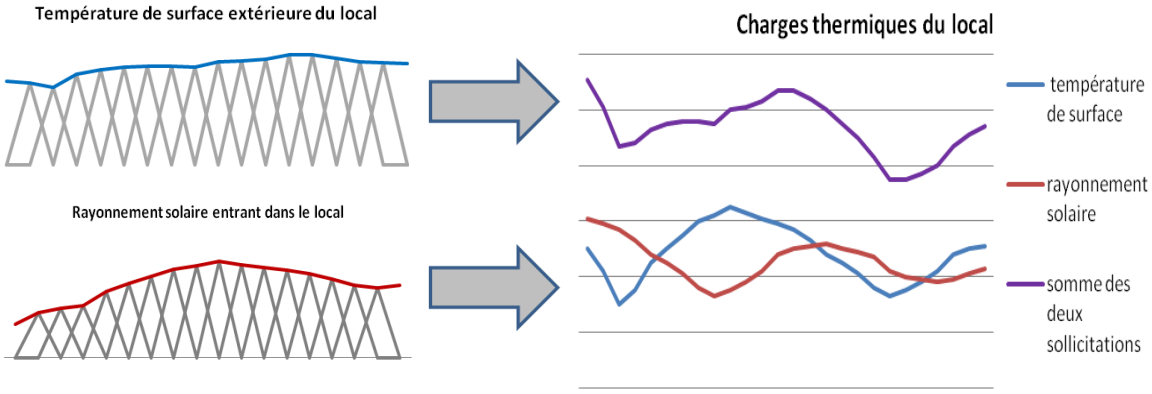
Une variation unitaire triangulaire de chacune de ces sollicitations est appliquée à un local type à l'instant initial t = 0. La charge thermique du local induite par cette sollicitation unitaire est calculée en prenant en compte tous les types de transferts thermiques dans le local (conduction, convection et rayonnement) pour les instants suivant *t=0*. Les facteurs de pondérations $FP_k$ de la sollicitation *k* sont les valeurs de la charge thermique convective induite aux instants *t*=0, Δt, 2Δt,…, nΔt [2][3] .

**Figure 1 :** Application d'une sollicitation unitaire à un local pour le calcul des facteurs de pondération



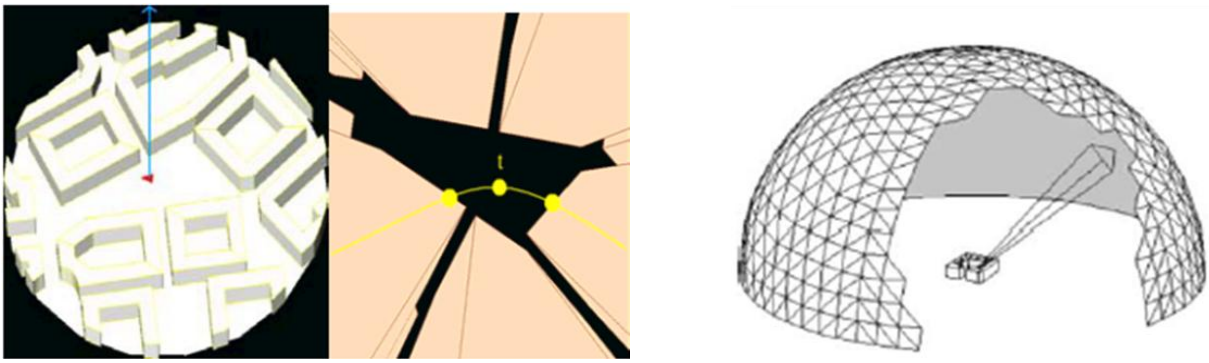

En décomposant les sollicitations réelles sous forme triangulaire (Figure 2), les facteurs de pondération peuvent alors être utilisés pour calculer la charge thermique induite par des sollicitations d'intensités réelles. Les charges thermiques induites par l'ensemble des sollicitations est la somme des charges induites par chaque sollicitation.

**Figure 2 :** Décomposition de sollicitations réelles en signaux triangulaires et charges thermiques induites




## Modélisation du rayonnement solaire

**Figure 3 :** Projection sphérique d'une scène urbaine (a) et modèle de voûte céleste (b) sous SOLENE



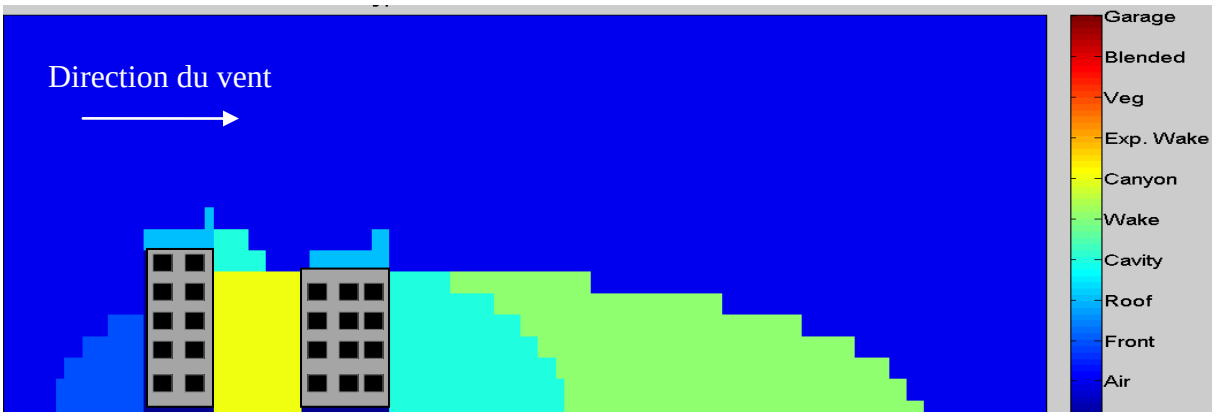
a b

Le logiciel SOLENE est utilisé pour modéliser les échanges radiatifs solaires d'un quartier à partir de la maquette tridimensionnelle numérique d'un quartier [4]. La triangulation de cette maquette décompose les différentes surfaces urbaines en facettes triangulaires. Des procédures de projection sphérique appliquée au centre de chaque facette permettent de constituer les masques solaires et de calculer le rayonnement solaire direct reçu par chacune de ces facettes (Figure 3a). Le calcul du rayonnement diffus se fait à partir d'un modèle de voûte céleste. Ce modèle de ciel est considéré comme un hémisphère de rayon infini maillé avec une triangulation géodésique (Figure 3b). Chaque maille est une source de rayonnement diffus calculée à l'aide du modèle de ciel de Perez [5]. Après avoir calculé les facteurs de forme entre chaque facette, la méthode des exitances permet de calculer toutes les inter-réflexions, pour en déduire le flux solaire total reçu par chaque facette.

## Modélisation des échanges convectifs

Des lois empiriques ont été développées dans la littérature pour définir les champs de vitesse d'air dans les zones d'écoulements particulières autour des bâtiments en fonction de la direction du vent (zones de surpression frontale, zone de dépression arrière, rue canyon…) [6].

**Figure 4 :** Représentation des différentes zones d'écoulements aérauliques pour deux bâtiments vus de profil sous le logiciel QUIC




À partir d'une représentation tridimensionnelle d'un quartier, le logiciel QUIC [7] utilise ces lois empiriques pour calculer un champ de vitesse d'air continu au sein d'un quartier. Pour modéliser les transferts thermiques par transport d'air en milieu urbain, l'air ambiant sera décomposé en zones distinctes. Les champs de vitesses calculés par QUIC serviront à évaluer les débits entre chacune de ces zones et un bilan thermique permettra alors de déterminer la température de chaque zone.

## Conclusion

Le couplage de ces différents modèles permettra de calculer les températures de surface et le rayonnement solaire capté par les bâtiments. Ces données serviront alors de données d'entrée pour le calcul de la charge thermique de différents locaux représentatifs formant l'ensemble du cadre bâti du quartier. Cet ensemble de modèles couplés décrivant les conditions climatiques d'un quartier d'une part et les besoins énergétiques d'autre part pourront servir alors à comparer et à quantifier l'impact de différentes solutions d'aménagement urbain. Le développement de tels modèles amènera à plus long terme la création de nouvelles générations d'outils d'aide à la conception ne se limitant plus aux bâtiments et à leurs systèmes mais incluant aussi l'environnement urbain.

## Bibliographie


[1] Bozonnet E.
Impact des microclimats urbains sur la demande énergétique des bâtiments - Cas de la rue canyon
*Thèse de doctorat, Université de La Rochelle, juin 2005*

[2] Depecker P., C. Menezo J. Virgone et Lepers S.
Design of buildings shape and energetic consumption
*Building and Environment , Vol. 36, n° 5, juin 2001, pp. 627-635*

[3] Rousseau S.
Simulation numérique du comportement thermique des locaux d'habitation. Évaluation de l'influence de la radiation solaire, des conditions climatiques et des paramètres caractéristiques du bâtiment
Thèse de doctorat, INSA de LYON, 1978

[4] Vinet J. et Groleau D.
La modélisation des transferts radiatifs dans le logiciel Solene. Applications au microclimat urbain et au confort thermique en espace ouvert
*IBPSA France 2000, Sophia Antipolis, pp. 29-35, 2005*

[5] Perez R., Seals R., et Michalsky J.
All-weather model for sky luminance distribution--Preliminary configuration and validation
*Solar Energy, Vol. 50, n° 3, mars 1993, pp. 235-245*

[6] Kaplan H., et Dinar N.
A lagrangian dispersion model for calculating concentration distribution within a built-up domain
*Atmospheric Environment, Vol. 30, n° 24, décembre 1996, pp. 4197-4207*

[7] Pardyjak E. R., et Brown M.
QUIC-URB v. 1.1 :
*Theory and User's Guide 2003*

# Méthodologies de conception climatique de quartiers urbains pour l'efficacité énergétique des bâtiments

Yuan Huang
Laboratoire CERMA, UMR CNRS 1563, ENSA Nantes
Green Architecture Research Center, Huazhong University of Science and Technology, Chine
Marjorie Musy
Laboratoire CERMA, UMR CNRS 1563, ENSA Nantes
Gérard Hégron
IFSTTAR
Hong Chen, Baofeng Li
Green Architecture Research Center, Huazhong University of Science and Technology, Chine

**Ce travail de recherche propose une méthodologie de conception de morphologies urbaines, et d'étude de leurs impacts sur le microclimat urbain et sur la consommation énergétique des bâtiments à l'échelle du quartier. Une classification des formes urbaines ainsi que des indicateurs morphologiques représentatifs de ces formes est proposée afin d'étudier leur association avec les conditions climatiques locales. A partir de simulations, les rapports entre la morphologie urbaine et le microclimat urbain sont explorés de manière à mettre à jour des liens entre la typologie de formes urbaines, les indicateurs morphologiques et les paramètres physiques. Enfin, des règles régissant les rapports entre forme urbaine, performance solaire et consommation énergétique des bâtiments sont proposées.**

## La négligence de l'impact du microclimat urbain dans la conception urbaine pour l'efficacité énergétique des bâtiments

Oke[1] fait valoir que la climatologie urbaine peut devenir une science plus prédictive. Ses conclusions peuvent être d'une utilité directe pour la planification et la conception urbaine, alors que la réalité montre combien l'application des résultats de la climatologie urbaine à la conception urbaine reste limitée. Ce dernier constat est repris par Golany[2] invitant les concepteurs urbains à prendre leur responsabilité et à fournir des formes urbaines adaptatives basées sur l'étude du climat local. L'impact des formes urbaines sur le microclimat urbain ainsi que le potentiel des apports en énergies gratuites restent néanmoins négligés à ce jour dans l'étude de la consommation énergétique des bâtiments à l'échelle du quartier.

Notre recherche explore le développement d'un meilleur mode de collaboration entre la conception urbaine et la micro-climatologie urbaine à l'échelle du quartier qui permettrait d'améliorer sensiblement les conditions microclimatiques et de profiter de l'énergie passive afin d'augmenter l'efficacité énergétique des bâtiments, notamment pour des climats chauds l'été et froids l'hiver.

## L'étude du rapport entre morphologie urbaine, microclimat urbain et consommation énergétique des bâtiments

Notre recherche se concentre sur l'étude du rapport entre morphologie urbaine, microclimat urbain et consommation énergétique des bâtiments. Les objectifs de recherche concernant le rapport entre ces trois éléments sont les suivants :

- Grâce au diagnostic des caractéristiques des morphologies urbaines, les différents impacts des formes urbaines sur le microclimat urbain peuvent être qualifiés et quantifiés, puis leurs impacts sur la consommation énergétique des bâtiments peuvent être comparés.
- Grâce à la conception de morphologies urbaines, certaines des conditions décisives du microclimat urbain peuvent être améliorées afin de réduire la consommation énergétique des bâtiments.

Selon la typologie des formes urbaines

[1] Oke R. Street design and urban canopy layer climate. Energy and Buildings 1988 ; vol.11: pp.103-113.
[2] Golany G. S., Urban design morphology and thermal performance. Atmospheric Environment, 1996. Vol. 30 : pp. 455-465.

employée et les indicateurs morphologiques proposés, certains indicateurs morpho-climatiques sont dérivés. Ces méthodes peuvent aider les concepteurs urbains à mieux comprendre les performances microclimatiques des morphologies urbaines (par exemple, la performance solaire, la performance de l'écoulement du vent). Les résultats de la recherche peuvent aider les concepteurs à mieux utiliser les stratégies de la conception climatique afin d'augmenter l'efficacité énergétique des bâtiments à l'échelle du quartier.

## Les méthodes de simulation et d'analyse des résultats

Pour la méthode de simulation, SOLENE [2] est utilisé d'abord pour calculer le pourcentage de ciel visible et la durée d'ensoleillement de toutes les surfaces de l'environnement bâti observé. Puis les résultats sont comparés aux indicateurs morpho-climatiques pertinents. Ensuite, le modèle de calcul thermo-radiatif de Coupled-Simulation [3] est lancé pour quantifier la performance énergétique solaire des bâtiments. Enfin, le calcul des consommations pour le chauffage et le rafraîchissement des bâtiments est effectué. Les cas d'étude ont été choisis en zone chaude l'été et froide l'hiver dans la ville de Wuhan en Chine. Les études de cas effectuées sur des formes urbaines représentatives sont organisées en deux séries : descripteurs élémentaires de formes urbaines et aménagement de formes urbaines.

L'analyse des résultats est réalisée en cinq étapes.

- Des outils de typologie des formes urbaines et des indicateurs morphologiques sont proposés pour décrire les caractéristiques des diverses formes urbaines.
- La performance solaire de formes urbaines est un aspect principal à étudier, le potentiel surfacique de durée d'ensoleillement et le potentiel surfacique de pourcentage de ciel visible sont proposés comme indicateurs morpho-climatiques principaux. Ces indicateurs dérivés permettent une analyse rapide des avantages d'une forme urbaine importants pour le diagnostic de la performance solaire des bâtiments.
- Les valeurs cumulées de l'énergie solaire transmise par les fenêtres $E_{trans}$ et de l'énergie solaire absorbée par les parois $E_{abs}$ des façades relevant de différentes orientations sont étudiées. En outre, un indicateur de valeur équilibrée entre hiver et été est développé pour évaluer et optimiser la performance d'énergie solaire des bâtiments non seulement en été mais aussi en hiver.
- La déperdition énergétique au niveau des surfaces internes des bâtiments $E_{cond}$ est étudiée selon deux aspects : la surface de déperdition et la déperdition énergétique par unité de surface des faces internes.

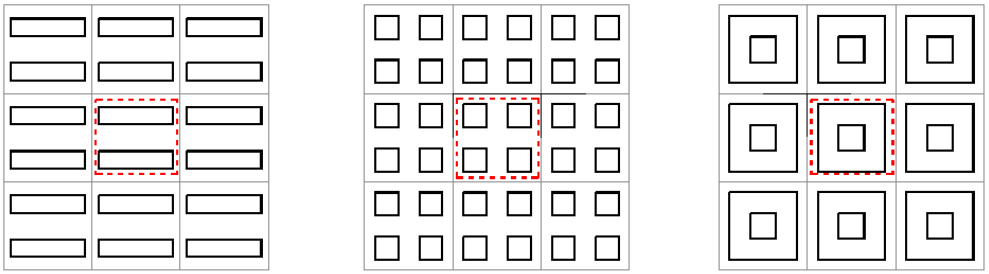
Pour tous les cas étudiés, les consommations totales pour le chauffage et le rafraîchissement $E_{total}$ d'un jour de référence sont comparées. La déperdition énergétique sur les surfaces internes $E_{cond}$ et le gain d'énergie solaire transmise $E_{trans}$ sont considérés comme étant prioritaires parmi tous les composants de la consommation totale. Les valeurs de différentes consommations sont ensuite unifiées par unité de superficie de plancher $E$ $(Wh/m^2)$ pour la comparaison des nombreuses études de cas. Pour l'analyse des résultats, un cas de référence est choisi. Les différences des consommations entre le chauffage et le rafraîchissement sont alors comparées suivant ce cas de référence.

## La traduction des règles en stratégies et les outils de conception de formes urbaines

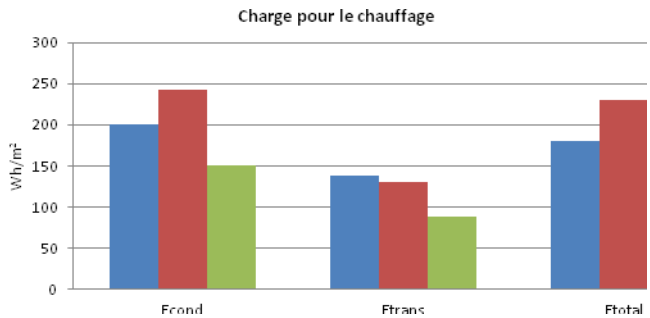
Les règles en stratégies sur les descripteurs élémentaires sont étudiées en 5 ensembles.

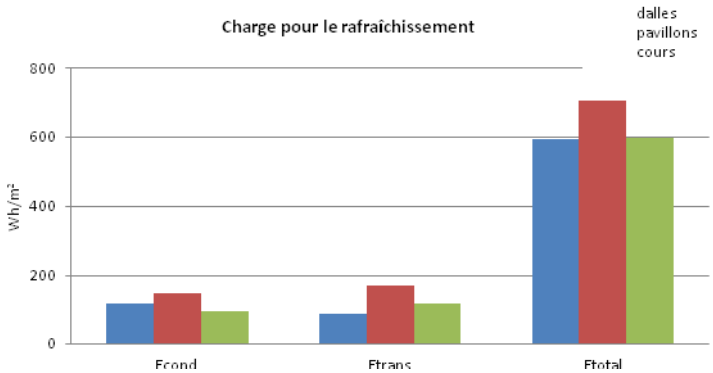
**Modèles élémentaires des formes construites génériques** : parmi les trois modèles élémentaires représentatifs d'un aménagement uniforme (quartiers de dalles, de pavillons et de cours), le quartier de dalles est le cas le plus favorable pour la performance énergétique solaire et pour l'augmentation de l'efficacité énergétique des bâtiments. Le quartier pavillonnaire est le cas le moins favorable (Figure 1).

**Figure 1 :** Comparaison des consommations selon les trois modèles élémentaires des formes construites



Dalles Pavillons Cours

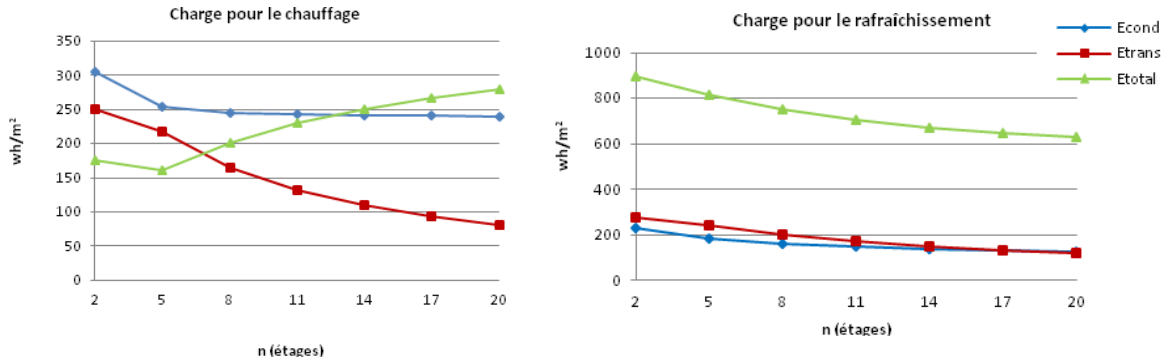



Econd : échande d'énergie conductive par unité de surface (Wh/m$^2$)
Etrans : gain d'énergie solaire via les fenêtres par unité de surface (Wh/m$^2$)
Etotal : bilan d'échange d'énergie par unité de surface (Wh/m$^2$)

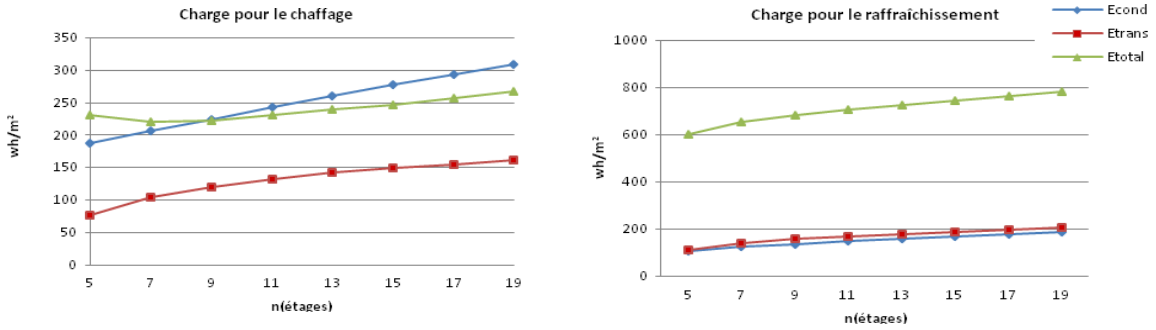
**Coefficient d'occupation des sols** (COS) : dans le quartier pavillonnaire, avec l'augmentation de la valeur du COS (à coefficient d'emprise au sol - CES constant), la performance énergétique solaire s'aggrave en hiver mais s'améliore en été, les consommations pour le chauffage et pour le rafraîchissement varient de façon inverse. La variation de cet indicateur est contradictoire entre été et hiver, il n'y a donc pas de valeur optimisée pour l'efficacité énergétique des bâtiments (Figure 2).

**Figure 2 :** Comparaison des consommations de l'ensemble – COS



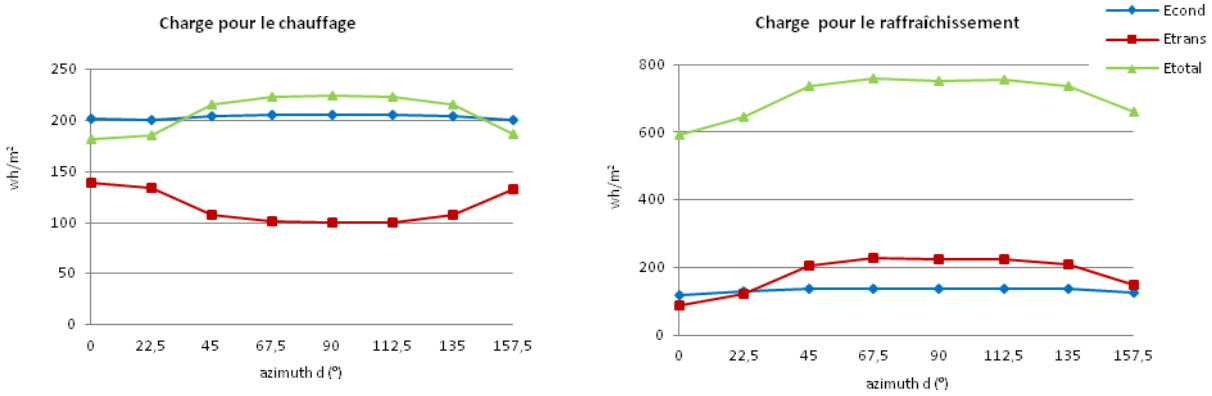

**Coefficient d'Emprise au Sol (CES) :** dans le quartier pavillonnaire, l'énergie solaire transmise augmente et l'énergie solaire absorbée diminue (en été et en hiver) quand la valeur du CES (à COS constant) diminue, la performance de l'énergie solaire transmise est la meilleure quand la valeur du CES est la plus haute, lorsque la valeur du CES est la plus basse, la performance d'énergie solaire absorbée en été et l'augmentation de l'efficacité énergétique des bâtiments dans les deux saisons sont aussi les meilleures (Figure 3).

**Figure 3 :** Comparaison des consommations de l'ensemble - CES




**Azimut de quartier δ :** dans un quartier de dalles, avec un azimut variant de Nord-sud vers Est-ouest, la performance solaire est moindre et la consommation pour le chauffage et le rafraîchissement augmente dans les deux saisons. Le quartier orienté Est-ouest est le cas le moins favorable pour une bonne efficacité énergétique des bâtiments et le quartier orienté Nord-sud est le cas le plus favorable (Voir Figure 4).

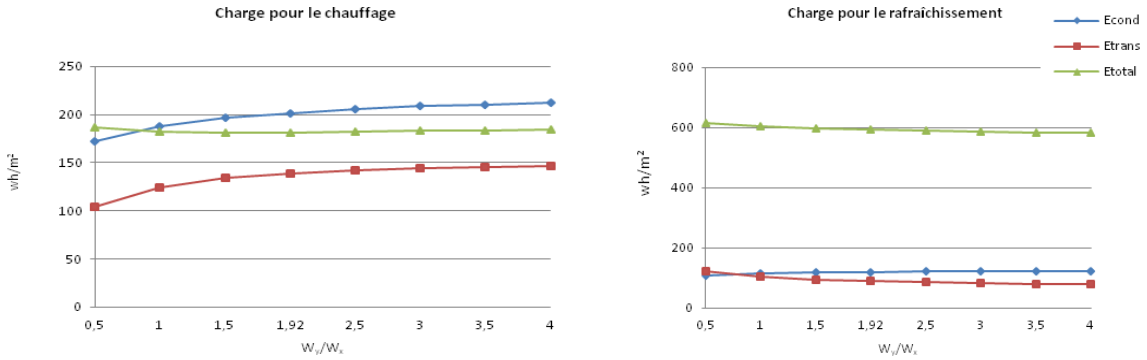
**Figure 4 :** Comparaison des consommations de l'ensemble - l'Azimut de quartier




**Ratio entre la largeur des rues dans les deux directions :** dans le quartier de dalles (COS et CES constants), avec l'augmentation de la valeur du ratio, la performance solaire devient plus favorable. Toutefois, la déperdition énergétique des bâtiments augmente ce qui

compense l'avantage de la performance énergétique solaire entre les deux saisons. En conséquence, il n'y a pas de valeur optimisée de $W_y/W_x$ (rapport de la largeur des rues directionnel) pour l'efficacité énergétique des bâtiments (Figure 5).

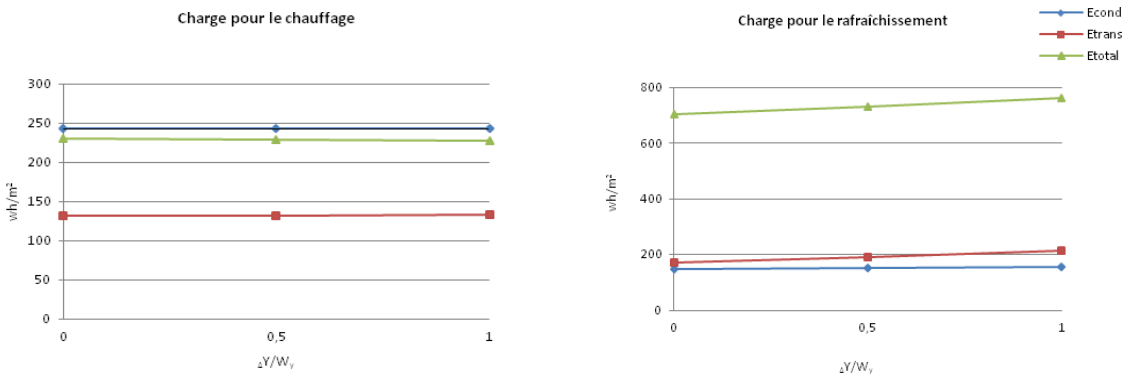
**Figure 5 :** Comparaison des consommations de l'ensemble - ratio entre la largeur des rues dans les deux directions




L'aménagement de formes urbaines est discuté dans ses dimensions horizontale et verticale :

**Aménagement horizontal de formes urbaines :** en général, l'impact de la variation de l'aménagement horizontal de formes urbaines sur la performance solaire et sur la consommation pour le chauffage et le rafraîchissement semble très limité. Quand il y a un déplacement relatif d'une ligne de bâtiments selon axe Est-ouest *ΔX*, peu d'impact sur la performance solaire et sur la consommation pour le chauffage et le rafraîchissent est observé. Quand il y a un déplacement relatif d'une ligne de bâtiments selon axe Nord-sud *ΔY*, une augmentation du gain d'énergie solaire en été et de consommation pour le rafraîchissement est observée (Figure 6). Il faut donc éviter les modèles d'aménagement horizontal qui amènent la surexposition au soleil sur les façades Est et Ouest en été.

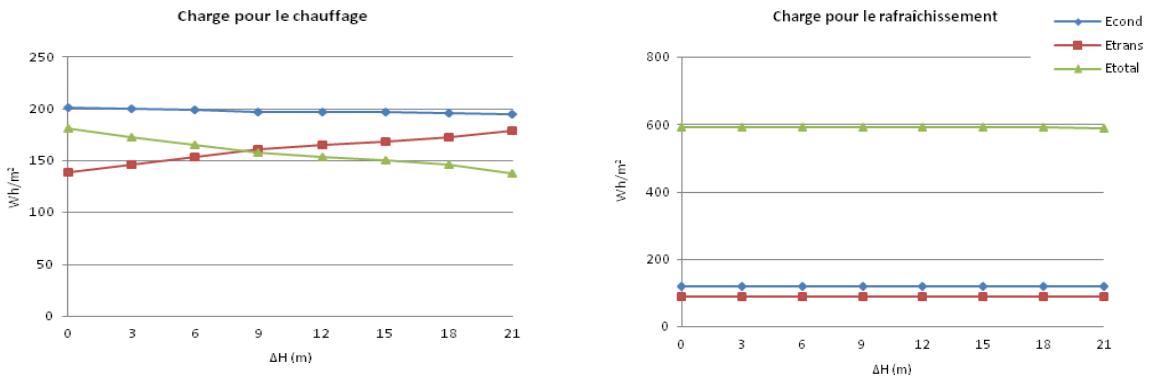
**Figure 6 :** Comparaison des consommations de l'ensemble de l'aménagement horizontal - déplacement relatif selon axe Nord-sud *ΔY*




**Aménagement vertical de formes urbaines :** par rapport à l'aménagement horizontal, l'impact de l'aménagement vertical de formes urbaines est beaucoup plus fort sur la performance solaire et sur la consommation pour le chauffage. Dans la comparaison des modèles verticaux de formes urbaines, le modèle sud-bas nord-haut est le cas le plus favorable pour la performance solaire et pour la réduction de la consommation de chauffage.

Lorsque nous nous concentrons sur l'analyse de la variation de la différence de hauteur des bâtiments *ΔH* entre les lignes aménagées, avec l'augmentation de *ΔH*, la performance solaire s'améliore et la consommation pour le chauffage se réduit surtout en hiver. En revanche, l'impact de la variation de *ΔH* sur la consommation pour le rafraîchissement n'est pas très évident (Figure 7).

**Figure 7 :** Comparaison des consommations de l'ensemble de l'aménagement vertical - variation de la différence de hauteur des bâtiments *ΔH*




## Conclusion

En résumé, l'analyse des résultats montre une série de rapports intéressants entre les formes urbaines, la performance solaire et la consommation énergétique pour le chauffage et le rafraîchissement. Dans les conditions indiquées, les résultats donnent des lignes directrices pour la conception urbaine permettant de favoriser des stratégies visant l'augmentation de l'efficacité énergétique des bâtiments et d'éviter les cas de formes urbaines qui pénalisent cette efficacité en fonction des conditions climatiques. La typologie de formes urbaines et les indicateurs morphologiques peuvent être exploités pour diagnostiquer dans un premier temps les caractéristiques de formes urbaines avant de faire une analyse fine via une simulation complète. Avec ces outils pratiques de diagnostic, les concepteurs urbains peuvent donc affiner les esquisses de leurs plans avant d'effectuer des calculs lourds.

## Bibliographie

[1] Adolphe L.
A simplified model of urban morphology: application to an analysis of the environmental performance of cities
*Environment and Planning B : Planning and Design, Vol. 28, 2001, pp. 183-200*

[2] Idczak M., Groleau D., Mestayer P., Rosant J.M. et Sini J. F.
An application of the thermo-radiative model SOLENE for the evaluation of street canyon energy balance
*Building and Environment, Vol. 45, 2010, pp.1262-1275*

[3] Chen H., Ooka R., Harayama H., Kato S. and Li X.
Study on outdoor thermal environment of apartment block in Shenzhen, China with coupled simulation of convection, radiation and conduction
*Energy and Buildings, Vol.12, 2004, pp. 47–58*

[4] Huang Y.
Methodology of Climatic Design of Urban District for Buildings Energy Efficiency
*Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Nantes (France) et Huazhong University of Science and Technology (Wuhan, Chine), 2010*

# Du bâtiment à la ville : l'intégration des données énergétiques dans la conception architecturale située

Laëtitia Arantes
UR Architecture, Environnement et Cultures Constructives, Grenoble
Centre Scientifique et Technique du Bâtiment, Grenoble
Olivier Baverel
UR Architecture, Environnement et Cultures Constructives, Grenoble
UR NAVIER, École des Ponts Paris-Tech, Champs-sur-Marne
Pascal Rollet
UR Architecture, Environnement et Cultures Constructives, Grenoble
Daniel Quenard
Centre Scientifique et Technique du Bâtiment, Grenoble

**Ce travail de thèse en architecture considère l'intégration des données énergétiques dans la conception architecturale et urbaine « située », sur la base d'une donnée d'entrée : l'énergie primaire consommée lors de la construction et de l'exploitation d'un bâtiment. La partie présentée ici s'intéresse à l'intégration urbaine du bâtiment et propose plus précisément de réaliser la modélisation et l'optimisation morpho-énergétique d'un « morceau de ville ». Générée à partir du modèle énergétique simplifié d'un bâtiment, la modélisation gère, entre autres, la problématique du droit au soleil par une méthode d'optimisation utilisant les algorithmes génétiques. Après l'étude de configurations urbaines classiques (forme linéaire, bloc avec cour centrale, etc.), cette phase propose, par l'optimisation, de définir la ou les formes de ville permettant d'obtenir des densités et des bilans énergétiques globaux acceptables.**

## Introduction

### *Typo-morphologie et énergie : quelle relation à l'échelle urbaine ?*

Ces dernières décennies, devant les impératifs croissants de mixité urbaine et sociale, d'accès aux services urbains, de maîtrise des coûts du foncier, ou encore de qualité environnementale, se cristallisent des contradictions de la société contemporaine : conflit entre la recherche de proximité urbaine et la demande sociale dominante d'habitat individuel ; conflit entre la recherche de densité verticale et de développement horizontal de récupération d'énergie ; ou encore conflit entre vie urbaine au sein d'un réseau de transports en commun et besoin de liberté individuelle.

Face à ces enjeux, de nombreux urbanistes et politiques ont choisi de promouvoir la ville compacte : dans une logique de développement durable, maîtriser l'étalement urbain suppose de « refaire la ville sur la ville », de densifier la ville. Parmi les typologies à l'œuvre, la tour connaît depuis quelques années un fort regain d'intérêt [1]. De retour sur le devant de la scène urbaine, la tour participe à la conquête de l'espace vertical. Dans ce contexte, et à une époque où la population urbaine mondiale ne cesse de croître, il convient de s'interroger sur le devenir morphologique et spatial de la ville : vers quel(s) modèle(s) de ville allons-nous ? La tour y a-t-elle sa place ?

Plus particulièrement, les morphologies de bâtiments sont une dimension importante de leurs performances énergétiques. De nombreuses études ont notamment montré l'impact de la compacité d'un bâtiment sur ses besoins de chauffage : plus un bâtiment est compact (c'est-à-dire plus son enveloppe déperditive est réduite), plus ses besoins de chauffage sont réduits [2, 3]. Mais, établie à l'échelle d'une ville, cette relation morpho-énergétique est moins évidente, tant la ville est complexe dans sa composition morphologique et spatiale. Aussi peut-on également se demander si la ville dense et compacte est vraiment un modèle de durabilité et d'efficacité énergétique.

Pour éclairer ces interrogations sur la durabilité et la performance énergétique des formes urbaines, le présent travail propose de réaliser des études morpho-énergétiques à deux échelles : d'abord celle d'un bâtiment seul dit bâtiment « objet », puis celle d'un bâtiment « situé » c'est-à-dire d'un bâtiment inséré dans un « morceau de ville ».

### *L'hypothèse de la recherche : pour de nouvelles formes d'habiter en milieu urbain dense*

L'hypothèse de travail est la suivante : dans un contexte de refondation de la façon de concevoir les projets d'architecture pour mieux intégrer les préoccupations liées au développement durable, la réhabilitation de tours existantes ou la réalisation de nanotours[1] sont des pistes plausibles de forme d'habitat en centre urbain dense. Développées depuis 2005 à travers les travaux de recherche et de développement architecturaux de l'ENSAG (École Nationale Supérieure d'Architecture de Grenoble) - notamment via plusieurs projets élaborés par les étudiants de la thématique de master Architecture et Cultures Constructives -, les *nanotours* sont des petites tours de moins de 50 mètres de hauteur empilant des maisons individuelles. Installées en milieu urbain, elles mettent à portée des habitants tous les avantages de la ville, avec la proximité des établissements scolaires, des commerces, des équipements, des services administratifs, des transports en commun, etc., et répondent aussi, notamment à travers des espaces extérieurs privatifs de qualité, aux besoins d'intimité et d'indépendance de chacun. Ainsi, la *nanotour* vise à proposer un habitat « léger », durable et économique pour répondre à une demande croissante de logements à coût modéré en France.

## Une méthodologie en plusieurs étapes

### *Première étape : le modèle énergétique du bâtiment « objet »*

#### Principales caractéristiques du bâtiment étudié

Pour effectuer ces études morpho-énergétiques successives, nous réalisons d'abord la modélisation énergétique simplifiée d'un bâtiment dit « objet », c'est-à-dire considéré en dehors de tout cadre bâti. Pour cette étude, le choix se porte sur une typologie de bâtiment en longueur (type « barre »), dont la façade principale (c'est-à-dire la plus longue) est orientée vers le Sud. Deux des trois dimensions du bâtiment constituent les variables dimensionnelles en fonction desquelles sera déterminé le bilan d'énergie du bâtiment : sa longueur *L* et sa hauteur *H*. La profondeur *p* est quant à elle fixée selon des conditions d'accès à la lumière et à la ventilation naturelles pour des logements traversants Nord-Sud : en corrélation avec les études de Carlo Ratti *et al.* [4], la profondeur du bâtiment est deux fois égale à la profondeur de pénétration (c'est-à-dire la différence entre la hauteur sous linteau et la hauteur du plan utile).

Par ailleurs, pour tenir compte du bilan énergétique lié à la construction du bâtiment, des hypothèses sont également établies en ce qui concerne les matériaux de construction utilisés. Pour répondre aux attentes d'évolutivité et de modularité du bâtiment, le choix s'est porté sur une structure murs de refends - dalles en béton et une enveloppe légère en ossature bois. Enfin, la dernière hypothèse concerne la localisation géographique du bâtiment, le lieu d'implantation choisi étant la ville de Grenoble située en zone climatique H1. On peut lui associer des données climatiques, telles que le gisement solaire, la durée d'insolation ou encore les températures d'air et de sol.

#### Méthode de calcul

Le modèle prend en compte de nombreux flux, témoins de la complexité conceptuelle et de fonctionnement du bâtiment. Ces flux comprennent, d'une part, des flux de consommations : l'énergie grise nécessaire à la construction du bâtiment ; les besoins de chauffage et de refroidissement ; les consommations d'éclairage ; la consommation des appareils auxiliaires ; les consommations dues aux comportements des usagers (eau chaude sanitaire et électricité domestique) ; les consommations dues au fonctionnement des ascenseurs. D'autre part, les flux comprennent également des flux de gains d'énergie, à savoir : des gains solaires passifs (par les vitrages) et actifs (thermiques et photovoltaïques) ; des apports internes (liés au fonctionnement des appareils électriques, à l'éclairage et aux activités métaboliques).

Le modèle préalable dresse le bilan énergétique simplifié du bâtiment, à partir d'équations statiques établies à partir des normes européennes et françaises et de la Réglementation Thermique française. Pour plus de représentativité, on travaille à partir des énergies primaires ($E_p$) plutôt que finales ($E_f$) : la différence réside dans le fait que les premières tiennent compte du mode de production de l'énergie. Les calculs incluent donc les ratios de conversion $E_p/E_f$ utilisés par la Réglementation Thermique (électricité : 2,58 ; énergies fossiles : 1 ; bois : 0,6). Le but de ce premier travail est de déterminer les

[1] concept de nanotours déposé par CANOPEA (voir http://www.solardecathlon.fr/)

proportions optimales d'un bâtiment pour un bilan énergétique global (toutes énergies confondues) positif.

### *Seconde étape : le modèle énergétique du bâtiment « situé » et du morceau de ville*

**Objectif et méthode**

Le modèle plus « global » propose de passer du bâtiment « objet » au bâtiment « situé », c'est-à-dire inséré dans un cadre urbain. Par une méthode d'optimisation utilisant les algorithmes génétiques et intégrant les résultats de la précédente modélisation du bâtiment, cette extension à l'échelle urbaine entend définir, pour un espace donné, la (ou les) configuration(s) optimale(s) de bâtiments au regard d'objectifs de densité de population et de performance énergétique. L'optimisation sera réalisée à l'aide de l'outil BIANCA [5]. Développé par Paolo Vannucci et Angela Vincenti à l'Institut Jean Le Rond d'Alembert (Université Paris 06), l'outil BIANCA est un algorithme génétique qui a déjà permis de résoudre des problèmes d'optimisation combinatoires difficiles dans le domaine de l'ingénierie.

**Prospective et travaux en cours**

Cette deuxième phase d'étude morpho-énergétique se décompose en deux parties. La première partie vise à évaluer et optimiser des configurations urbaines traditionnelles comme le bloc avec cour centrale, la forme linéaire orientée Ouest-Est, le Plan Voisin proposé par Le Corbusier, ou encore le plan concentrique et « en escaliers » tel que proposé par Richard Rogers pour l'aménagement du quartier Lu Jia Zui à Shanghai. Dans cette première étape de l'analyse de scénarios, partant d'une maille régulière, la modélisation cherchera à optimiser les dimensions des bâtiments (hauteur et longueur), ainsi que la taille de la maille *m*. En ce qui concerne les dimensions de bâtiments, l'étude portera d'abord sur des hauteurs de bâtiments identiques, puis cherchera des hauteurs différentes. Le but de cette première partie est d'identifier, parmi quelques configurations traditionnelles, celles qui répondent aux objectifs de densité et de durabilité.

La deuxième partie concerne plus spécifiquement l'optimisation par algorithme génétique. L'optimisation propose notamment de positionner des bâtiments de dimensions variables sur une trame irrégulière, et d'en optimiser l'implantation en fonction d'objectifs et de contraintes. Plus précisément, la fonction objectif à maximiser est la densité de population (c'est-à-dire le nombre d'habitants au km²), le but étant de satisfaire à la demande croissante de logements urbains à une époque où la population urbaine ne cesse d'augmenter. Concernant les contraintes à respecter, d'une part, cette extension intègre une contrainte énergétique : chaque bâtiment devra présenter un bilan énergétique positif ou nul. Grâce à un outil mathématique permettant de définir l'impact de l'ombre d'un bâtiment sur un autre, le modèle gère, d'autre part, les problématiques du droit au soleil. À partir de ces objectifs et contraintes, l'algorithme génétique espère, pour un espace donné, déterminer les caractéristiques spatiales et dimensionnelles des bâtiments, c'est-à-dire leurs dimensions (hauteur et longueur) et agencement.

## Perspectives

In fine, ce modèle morpho-énergétique de la ville entend servir d'outil d'accompagnement dans l'aménagement urbain, et plus particulièrement donner les grandes lignes d'orientation pour aller vers des bâtiments, et plus généralement, des « morceaux » de villes durables. Plus précisément, il propose de définir les formes de ville permettant d'obtenir des densités et des bilans énergétiques globaux acceptables. En introduisant la notion de contexte, le but est d'évaluer la corrélation entre les performances d'un bâtiment et son intégration urbaine et environnementale. Par son application sur l'aménagement d'une parcelle donnée, l'outil ainsi défini à partir de l'algorithme génétique pourra notamment contribuer à définir des configurations spatiales et morphologiques de bâtiments intéressantes au regard de contraintes énergétiques et d'ensoleillement et d'objectifs de densité.

## Bibliographie


[1] Paquot Th.
La Folie des hauteurs, Pourquoi s'obstiner à construire des tours ?
*Éditions Bourin Editeur, 2007, 220 p.*

[2] Depecker P., Menezo Ch., Virgone J., Lepers S.
Design of building shape and energetic consumption
*Building and Environment n°36, 2001, pp. 627-635*

[3] Jedrzejuk H., Marks W.
Optimization of shape and functionnal structure of buildings as well as heat source utilization
*Building and Environment,Vol. 37, n° 12, 2002, pp. 1379-1383*

[4] Ratti C., Richens P.
Raster analysis of urban form
*Environment and Planning B : Planning and Design n°31, 2004, pp.297-309*

[5] Vincenti A., Ahmadian M. R., Vannucci P.
BIANCA : a genetic algorithm to solve hard combinatorial optimisation problems in engineering
*Journal of Global Optimisation n°48, 2010, pp.399-421*

# - D -

# Morphologies, dynamiques urbaines et représentations

# Modélisation 3D urbaine automatique par photogrammétrie 3D haute résolution

Jean-Philippe Pons
Université Paris-Est, IMAGINE, MOD-EVE, CSTB, Sophia-Antipolis
Renaud Keriven
Université Paris-Est, IMAGINE, Ecole des Ponts ParisTech, Marne-la-Vallée
Olivier Tournaire et Souheil Soubra
Université Paris-Est, IMAGINE, MOD-EVE, CSTB, Sophia-Antipolis

**Pouvoir simuler des phénomènes physiques en milieu urbain est aujourd'hui un enjeu capital permettant aux décideurs d'orienter leurs choix, notamment sur des projets d'aménagement urbain ayant un impact sur l'environnement. Ce type de simulations s'appuyant sur des données décrivant le territoire et sa morphologie, il est nécessaire de disposer d'une information de qualité, à un niveau de richesse que les fournisseurs de données actuels ne proposent pas. Dans ces travaux, nous proposons une méthode totalement automatique et originale de photogrammétrie 3D permettant d'obtenir à bas coûts et rapidement des représentations 3D très précises d'une scène. Un de ses intérêts majeurs est de ne travailler qu'à partir d'images qui peuvent être acquises avec des appareils photo numériques aujourd'hui largement répandus.**

## Introduction

La simulation des phénomènes physiques de la ville (trafic, acoustique, thermo-aéraulique, hydrologie, micro-climatologie…) est de plus en plus sollicitée pour l'évaluation environnementale des projets d'aménagement urbain. Ces simulations s'appuient sur une modélisation 3D de l'environnement urbain. Or l'information 3D proposée aujourd'hui par les fournisseurs de données (IGN, Spot Image, Vectuel, …) et par les portails d'information géographique (Geoportail, Google Maps, Microsoft Bing Maps) ne permet pas d'alimenter correctement des simulateurs environnementaux. Le premier obstacle est le niveau de détail insuffisant des maquettes virtuelles obtenues à partir de cartes, de vues aériennes ou d'images satellites : pas plus de quelques dizaines de polygones par bâtiment, omission d'un certain nombre d'objets urbains. Le deuxième obstacle est l'absence de sémantique. Les simulations physiques nécessitent, outre une représentation géométrique de l'espace urbain, des propriétés thématiques (réseaux, matériaux, végétation…) qui ne peuvent actuellement être extraites par des méthodes automatiques. Les techniques classiques de saisie interactive assistée par ordinateur permettent de créer des modèles 3D urbains détaillés et sémantisés adaptés à la simulation. Mais elles ne constituent pas une solution viable pour les collectivités locales car elles ont un coût de main d'œuvre important et impliquent de très longs délais d'obtention. Ainsi, la conception et le développement de technologies de production automatique de modèles 3D urbains sémantisés de haute précision à partir d'images aériennes et terrestres est un préalable à l'utilisation massive de la modélisation urbaine dans les cas réels d'aménagement. Dans ces travaux, nous présentons une nouvelle méthode de photogrammétrie 3D haute résolution qui permet de relever une partie de ces défis. Cette technologie consiste à calculer une modélisation 3D très précise d'une scène à partir de simples photographies en utilisant le même principe que la vision biologique : la stéréoscopie. Et ce de manière entièrement automatique, en quelques minutes à quelques heures de temps de calcul.

## Méthode

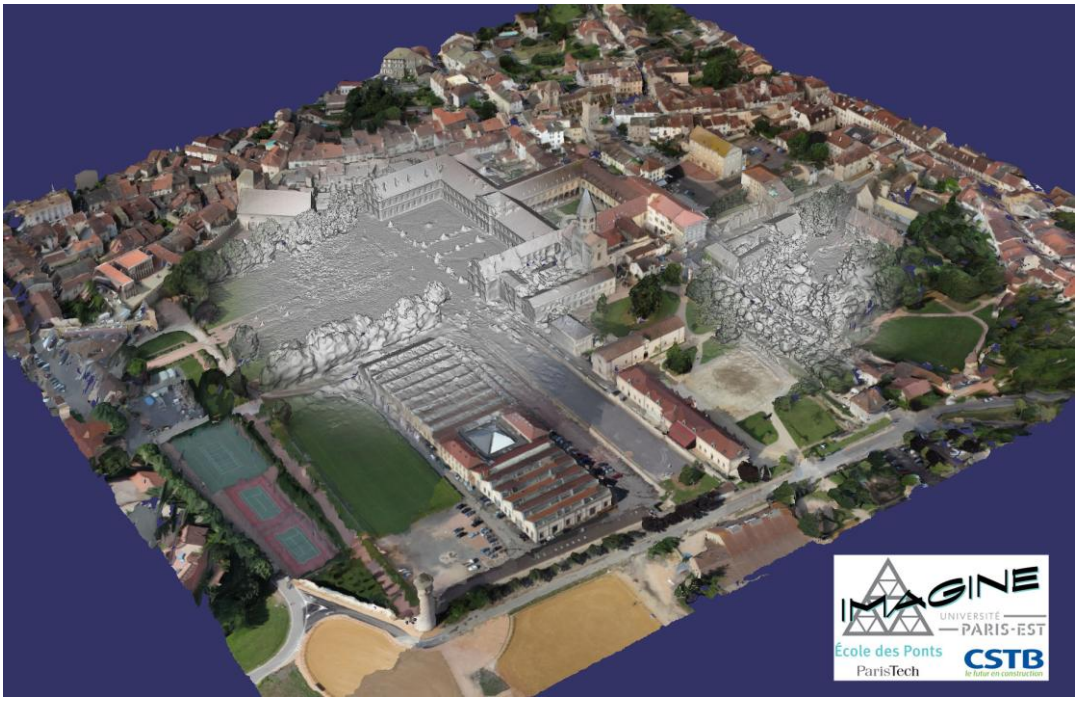
Notre méthode [1] est issue de 10 ans de travaux en vision par ordinateur, domaine à la croisée du traitement d'images et de l'intelligence artificielle. Son premier point fort est d'être promise à une utilisation de masse, puisqu'elle nécessite un simple appareil photo pour la prise de vue, ne requiert aucune intervention humaine, et impose des contraintes faibles sur la prise de vue (fond, éclairage non maîtrisés). Son deuxième point fort est la haute résolution des modèles obtenus, même pour des scènes étendues. Pour ce faire, nous utilisons une décomposition adaptative de l'espace et une optimisation du maillage avec une précision sub-pixelique. Son troisième point fort est son efficacité. L'obtention d'un modèle

3D requiert à peine quelques minutes à quelques heures de temps de calcul, selon le volume des données d'entrée, grâce à l'utilisation des enseignements de la géométrie algorithmique et de la programmation sur carte graphique.

## Validation expérimentale

Nous avons mené de nombreuses expérimentations en vraie grandeur pour éprouver notre méthode. Une prise de vues a été réalisée en hélicoptère et une modélisation 3D haute résolution d'un quartier de Cagnes-sur-Mer a été réalisée, en lien avec Orange Labs et la Communauté Urbaine Nice Côte d'Azur, avec une problématique de gestion de la ville (relevé à distance de compteurs d'eau, de gaz et d'électricité, commande des feux de circulation). Nous avons réalisé des expérimentations similaires à Marseille près de la Gare Saint-Charles, à Cluny autour de l'Abbaye, à Chamonix au centre-ville et sur le site de l'Aiguille du Midi. De plus, notre technologie s'est avérée particulièrement pertinente dans le domaine de la simulation d'éclairage de scènes complexes, pour lesquelles les méthodes traditionnelles de conception assistée par ordinateur ont un coût prohibitif et une précision insuffisante. Ainsi, nous avons réalisé, en partenariat avec la Mairie d'Entrevaux (Alpes de Haute Provence) et le CETE Méditerranée, une prise de vues en hélicoptère et une modélisation 3D haute résolution de la Citadelle, comme préalable à sa mise en lumière par les concepteurs éclairagistes.

**Figure 1 :** Reconstruction partiellement texturée de la ville de Cluny (images acquises depuis un ballon)



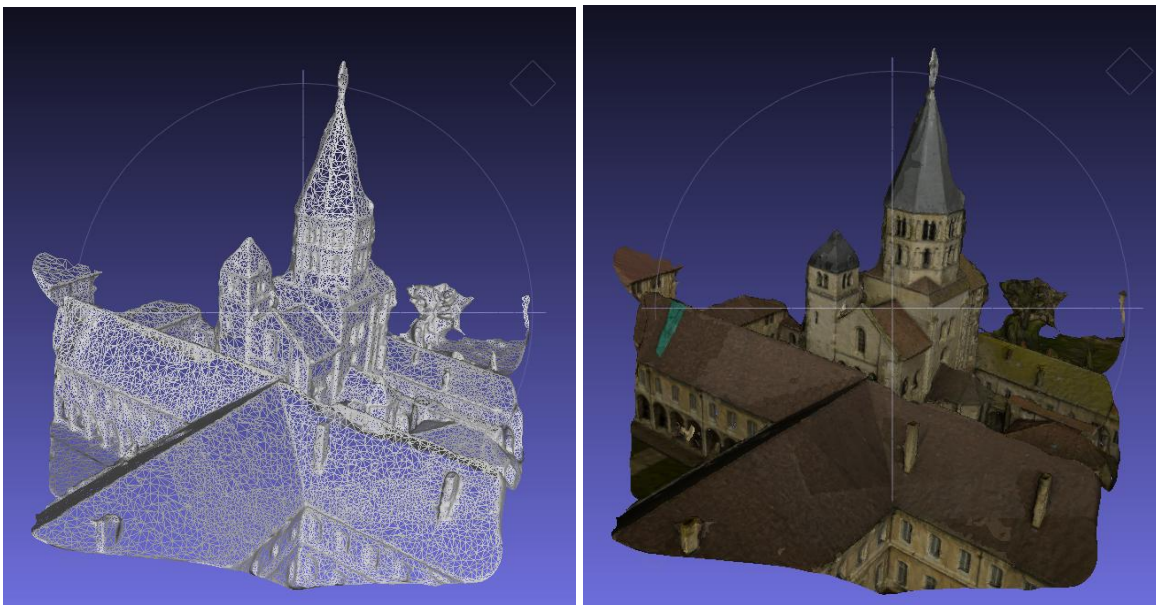

Enfin, la compétitivité de notre méthode sur le plan académique a été attestée par une évaluation comparative des meilleures méthodes de photographie 3D, lancée en 2008 par Cristoph Strecha de l'EPFL. Ce banc d'essai est constitué de 6 jeux de données comprenant entre 8 et 30 photographies de scènes architecturales. Les données et les résultats sont accessibles sur une page web. Ce banc d'essai a reçu la caution de la communauté scientifique lors de l'édition 2008 de la plus prestigieuse conférence de vision par ordinateur [2]. Depuis lors, l'évaluation est ouverte à toutes les équipes de recherche du domaine via un système de soumission électronique. Les résultats soumis par les différentes équipes sont comparés de manière quantitative à une vérité terrain extrêmement précise, acquise par télémétrie laser, et à laquelle seuls les organisateurs du banc d'essai ont accès. Les résultats de 12 équipes, incluant Microsoft Research, l'INRIA et l'EPFL, ont été soumis au banc d'essai. Deux ans après leur soumission, et sur tous les jeux de données proposés, nos

résultats se classent à la première place du banc d'essai, aussi bien d'un point de vue visuel que quantitatif, avec une avance nette par rapport au second.

## Conclusion et perspectives

Les travaux présentés permettent de reconstruire de façon robuste la géométrie des environnements urbains à partir de simples prises de vue avec un appareil photo numérique, dans des situations variées (piéton, avion, ballon, hélicoptère…). Ce type de modèle purement géométrique peut d'ores et déjà être utilisé en entrée de processus de haut niveau, par exemple pour étudier l'impact d'un projet sur le milieu urbain, réaliser des simulations acoustiques, de diffusion de polluants ou d'éclairage. Cependant, pour une meilleure compréhension du milieu urbain et des phénomènes physiques à l'œuvre dans ces simulations, des modèles plus riches peuvent être nécessaires. Les travaux menés aujourd'hui visent à enrichir la géométrie d'informations sémantiques (structure des façades, position et nombre de fenêtres, utilisation du bâtiment…) permettant notamment de décrire les fonctionnalités des bâtiments et ainsi d'intégrer dans les simulations une information complète.

**Figure 2 :** Détail sur le clocher de l'abbaye de Cluny (gauche : maillage brut ; droite : maillage texturé)



## Bibliographie


[1] Vu H., Keriven R., Labatut P. et J.-P. Pons J.-P.
Towards high-resolution large-scale multi-view stereo
*In IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Miami (USA), 2009*

[2] Strecha C., von Hansen W., Van Gool L., Fua P. et Thoennessen U.
On benchmarking camera calibration and multi-view stereo for high resolution imagery
*In IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Anchorage (USA), 2008*

[3] Carré S., Pons J.-P. et Soubra S.
Visualiser en 3D un projet d'éclairage de façade
*Webzine du CSTB, décembre 2009*

[4] Pons J.-P. et Soubra S.
L'innovation logicielle récompensée
*Webzine du CSTB, septembre 2009*

[5] Pons J.-P. et Soubra S.
Imagine : la modélisation 3D dans une nouvelle ère
*Webzine du CSTB, juin 2009*

# Reconnaissance automatique de structure viaire urbaine

Xavier Marsault
Laboratoire MAP-ARIA, ENSA de Lyon, MAP-Aria, UMR CNRS-MCC 3495, MAP n°3315 du CNRS

**Nous présentons un modèle empirique développé initialement pour des recherches menées en modélisation automatique de scènes urbaines [8], et amélioré par la suite pour la reconnaissance automatique de la voirie en milieu urbain (thème peu traité par la communauté scientifique [2]). En partant d'une description simplifiée du bâti, on vise, dans un premier temps, à identifier des critères typo-morphologiques influant sur une organisation de voirie urbaine. La mise en action du modèle convoque une méthode générative innovante pour en identifier les meilleurs paramètres et calculer automatiquement un éventail de solutions plausibles par l'application d'un algorithme d'optimisation par colonies de fourmis. Les avantages et les limites de cette approche sont ensuite analysés, et l'on suggère comment ce type de modèle peut être étendu à d'autres applications urbaines.**

## Contexte et objectifs

La reconnaissance automatique du bâti et des axes de voirie urbaine est d'abord l'objet d'intérêt de l'analyse d'images aériennes ou satellitaires, pour des applications en cartographie notamment. Nous situons ce travail (présenté à la conférence SAGEO'2010 [5]) dans le cadre de recherches portant sur le couple voirie / bâti en milieu urbain, avec un double objectif :

- produire des connaissances : identifier des paramètres typo-morphologiques susceptibles de qualifier des structures viaires urbaines (objet de cet article) ; optimiser des qualités de la voirie en fonction de l'environnement naturel ou construit (en cours d'étude) ;
- développer un outil de simulation de réseaux urbains aériens ou souterrains (voirie, réseaux techniques...) s'appuyant sur une optimisation multicritères de problèmes décrits avec des contraintes (entre autres spatiales), tels qu'on en rencontre en urbanisme, en géographie et en géomatique.

## Problématique

Historiquement, la structure viaire, souvent pré-existante, contraint fortement le découpage en îlots et le positionnement du bâti. Ainsi, il existe de fortes corrélations entre la voirie et le bâti, et notre hypothèse est qu'on doit pouvoir calculer automatiquement des plans de voiries plausibles à partir de la seule donnée d'implantation au sol du bâti, en construisant un modèle empirique descriptif de la voirie et de son organisation. Notre questionnement porte d'abord sur la nature des paramètres typo-morphologiques de ce modèle pour bien reconnaître des avenues, des boulevards, des rues, et pour combiner ces éléments afin d'obtenir de bonnes approximations du réseau viaire existant.

## Méthodologie

Notre approche exploite la topologie et la morphologie de l'espace inter-bâti, sans connaissance de la nature du sol ni de celle du bâti (objet d'études ultérieures). En utilisant des opérateurs de la morphologie mathématique et de la théorie des graphes, le modèle construit automatiquement un graphe de voirie *G* par squelettisation homotopique de l'espace inter-bâti, support de toute configuration possible de réseau viaire médian totalement connecté. Un opérateur morphologique évalue la largeur maximale disponible pour la voirie en tout point de l'espace inter-bâti. L'ajout optionnel d'une périphérie favorise l'émergence d'une ceinture de boulevards et d'avenues en l'absence de liaisons connues avec d'autres villes.

On appelle chemin homogène entre deux nœuds de *G* un groupe de jonctions consécutives ramenées à une même largeur. L'analyse des plans de voirie montre que les chemins tendent à utiliser au mieux l'espace inter-bati, tout en

étant le plus droit possible. On va donc chercher « en moyenne » des chemins parmi les plus longs, les plus larges, et les moins tortueux possibles. La combinatoire du problème est réduite drastiquement en séparant deux niveaux d'optimisation :

- une heuristique locale simplifiant le choix de chemins entre deux nœuds quelconques du graphe, favorisant les passages les moins tortueux possibles par les endroits les plus plausibles [4],
- la mise en compétition d'un grand nombre de chemins potentiels présélectionnés pour faire émerger un ou plusieurs plans de voirie définis par l'optimisation globale de critères (dont on teste la pertinence) et la satisfaction de contraintes.

**Plan du bâti** → *périphérie* → *graphe* → *squelette* → **heuristique locale** → **optimisation globale**

(image) (opérateurs morpho-maths et graphe) (chemin) ( réseau viaire)

### *Détermination automatique des chemins admissibles et de leur type*

L'analyse morphologique de la voirie est issue de mesures sur un échantillon représentatif de villes européennes de tailles variables [3, 5]. Elle s'appuie sur 4 caractéristiques (longueur l, largeur r, rectitude rect, et allongement l / r), et se traduit par une table de seuils d'admissibilité par type d'élément (avenue, boulevard, cours, rue, ruelle, cours d'eau). On exploite cette classification typologique – dont la fiabilité est très bonne en général – pour identifier au départ tous les chemins admissibles du graphe et leur type, connaissant leurs caractéristiques morphologiques.

### *Identification des réseaux par optimisation globale multicritères*

Notre approche - dont la description détaillée se trouve dans [5] – utilise 5 paramètres de base : longueur moyenne, largeur moyenne, rectitude moyenne des chemins, écart moyen de leurs largeurs aux intersections, et leur nombre dans la solution. 40 critères d'optimisation ont été conçus à partir de ces paramètres (approche mixte ou multicritère au sens de Pareto [1]). La méta-heuristique d'optimisation par colonies de fourmis *Ant-SSP* permet de calculer les meilleures solutions optimisées qu'ils produisent. A chaque cycle de calcul, *n* fourmis sont mises en concurrence pour construire un plan de voirie par l'ajout incrémental de chemins, en validant 3 contraintes de consistance : non superposition de chemins, connexité forte du réseau et minimisation du nombre d'impasses. Les chemins favorisant les meilleurs plans sont récompensés grâce à des traces de phéromones virtuelles, et ont une probabilité plus forte d'être sélectionnés au cycle suivant.

## Résultats

La simulation du modèle a été réalisée avec la « base de données géographiques de référence » de la Communauté Urbaine de Lyon, avec des temps de calcul allant de 45 min à 100 h, selon la taille du tissu traité. La démarche de consolidation pour trouver les meilleurs critères a nécessité, pour chacun d'eux : le calcul des meilleures solutions sur un très grand nombre de cycles, leur observation fine (caractéristiques visibles, manques, mauvaises détections), et la comparaison avec le tissu urbain réel. Sur les 40 critères testés, 7 critères mixtes donnent de bons réseaux, bien structurés, bien connectés, permettant de retrouver les artères principales de la voirie existante (avenues, boulevards, rues importantes) et la localisation de leurs extrémités. On observe souvent un découpage en îlots plausibles, signe de l'émergence morphologique d'un niveau supérieur à celui des chemins.

## Intérêts et limites de l'approche

Nous avons mis au point une méthode générative originale pour identifier expérimentalement des critères qui influent sur un problème de reconnaissance de voirie urbaine, et l'analyse d'un grand nombre de solutions optimisées a permis sa consolidation.

L'indépendance de la méthode d'obtention du graphe et du calcul d'optimisation permet d'envisager une meilleure reconnaissance du contour des îlots et un alignement plus réaliste avec les bâtiments. Un traitement des places, des carrefours et des vastes espaces non

construits s'avère nécessaire pour éliminer du graphe des éléments non liés à la voirie. Enfin, malgré une optimisation poussée des codes et un réglage fin des paramètres, la complexité de l'algorithme impose des temps de calculs élevés pour traiter de vastes tissus urbains.

## Perspectives

Ce type de modélisation peut être adapté à des problèmes d'ingénierie urbaine basés sur l'exploitation d'un graphe spatial et de données sociales (*e.g.* densité de population, transport), environnementales (*e.g.* nature du sol) ou énergétiques (ex : flux, consommation). On peut envisager de calculer des plans de circulation, de faire de la simulation de trafic sur un réseau, un problème économique (ex : optimisation de réseau de fourniture énergétique...).

**Figure 1 :** Plan de voirie obtenu sur une portion de la ville de Décines (rouge : boulevards ; vert : avenues ; gris : rues et ruelles)

## Bibliographie

[1] Angus D., Woodward C.
Multiple objective ant colony optimisation
*Swarm Intelligence, vol. 3, pp. 69-85, Springer 2009*

[2] Decoret X, Sillion F.
Street Generation for City Modelling
*Architectural and Urban Ambient Environment*, *INRIA 2002*

[3] Mangin D., Panerai P.
Projet urbain
*Editions parenthèses 1999*

[4] Marsault X.
Can Ants Build Urban Street Networks ?
*International Conference on Computers & Industrial Engineering (CIE'39), 6-8 juillet 2009, Troyes, France*

[5] Marsault X.
Identification automatique de réseaux de voirie urbaine avec un algorithme d'optimisation par colonies de fourmis,
*Conférence Internationale SAGEO (Spatial Analysis and GEOmatics)*,*Toulouse, France, 17-19 novembre 2010*

[6] Marsault X.
Generation of textures and geometric pseudo-urban models with the aid of IFS
*"Chaos in Art and Architecture", International Journal of Dynamical System Research, vol. I, n° 3, 2005*

# Explorer la ville polycentrique avec un modèle multi-agents

Rémi Lemoy, Charles Raux, Pablo Jensen
Laboratoire d'Economie des Transports (LET), Institut Rhône-Alpin des Systèmes Complexes (IXXI)
Laboratoire de Physique de l'ENS de Lyon, Université de Lyon, CNRS

**Le modèle standard de l'Economie Urbaine (Alonso, Muth, Mills, voir [2]) décrit analytiquement un équilibre statique de la localisation des ménages. Nous présentons un modèle multi-agents qui atteint cet équilibre d'une manière dynamique. Il nous permet de simuler l'évolution d'une ville en combinant des agents hétérogènes selon leur revenu et diverses localisations de centres d'emplois. Nous explorons, en s'écartant du modèle monocentrique classique, comment évoluent diverses variables socio-économiques caractérisant le système.**

## Questions de recherche et méthodologie

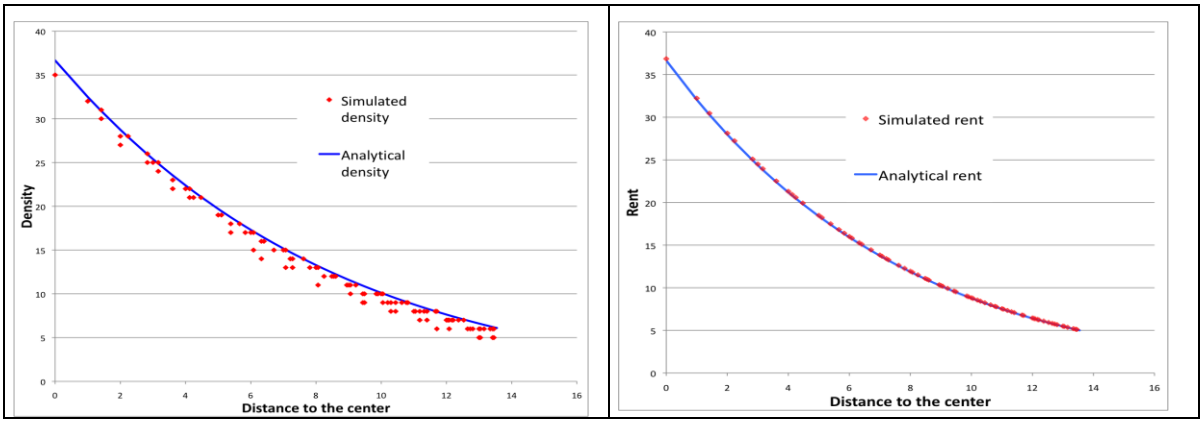
Les modèles multi-agents ont été largement utilisés pour réaliser des micro-simulations de trafic. Le but du travail présenté ici est d'utiliser cet outil en économie urbaine pour aborder des questions de la société telles que les effets à long terme de la congestion, les effets des péages urbains...

Ce travail se concentre sur l'interaction entre transport et utilisation du sol. Des modèles de type LUTI (Land Use and Transport Interaction) existent pour étudier ce problème, mais ils sont soit plutôt empiriques et macroscopiques, ou microscopiques avec choix discrets. Le modèle développé dans cette étude vise donc à pallier au manque d'outils de simulation concernant les interactions entre agents économiques. Son but est d'étudier à l'aide de mécanismes simples comment une hétérogénéité sociale peut conduire à de la ségrégation spatiale.

De nombreux travaux analytiques ont été réalisés sur le modèle d'Alonso, Muth, Mills de l'économie urbaine (présenté dans [2] ou [4]), pour étudier les facteurs qui peuvent expliquer la localisation des ménages ([1], [5]). Une des questions intéressantes abordées dans la littérature est l'influence de la ville polycentrique sur la localisation des ménages ([3], [4]).

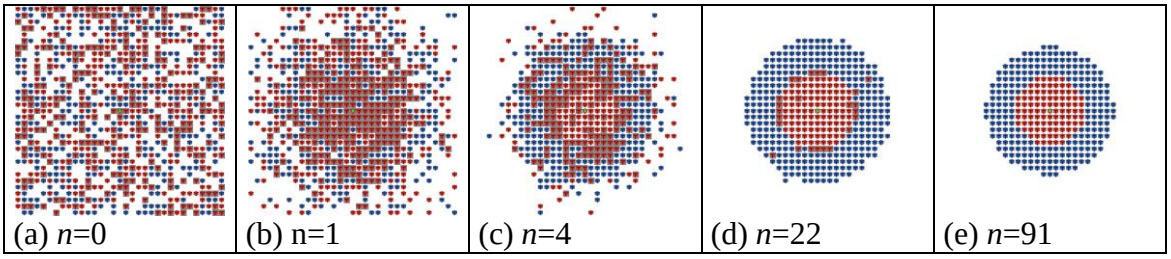
Cette étude vise à construire un modèle multi-agents partant du modèle standard de l'économie urbaine et permettant d'explorer, grâce à l'interaction entre les agents, des phénomènes difficiles à aborder de manière analytique, comme la ville polycentrique.

**Figure 1 :** Comparaison des résultats du modèle multi-agents (symboles rouges) et du modèle analytique (ligne bleue). Courbes de densité (à gauche) et de prix du logement (à droite) en fonction de la distance au centre de la ville



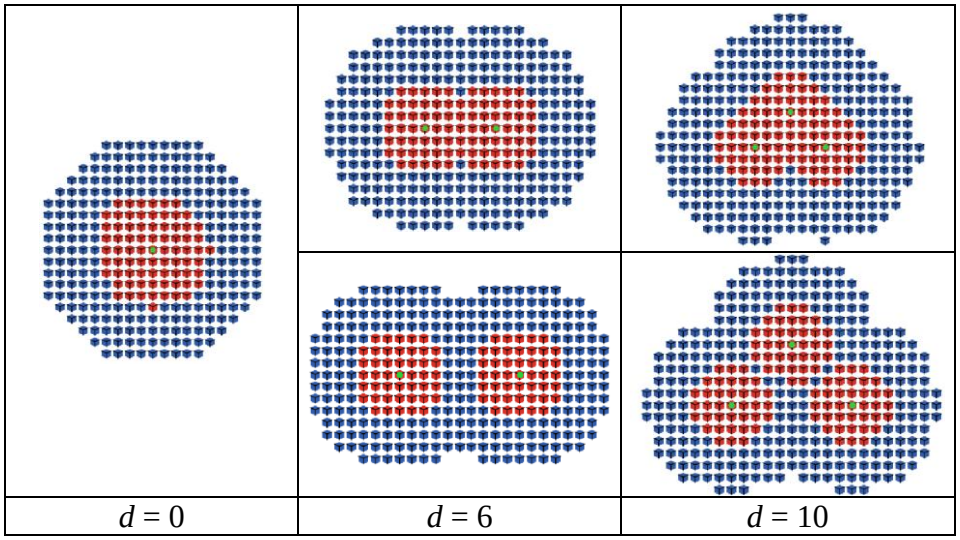

La figure précédente illustre le très bon accord entre le modèle analytique et le modèle multi-agents pour une ville simple avec une seule catégorie de revenu. Une illustration de l'évolution d'une simulation avec des agents répartis dans deux catégories de revenu est donnée par la figure suivante.

**Figure 2 :** Evolution de la forme de la ville durant une simulation. Le centre d'emploi est représenté par un point vert. Les cellules dont le fond est grisé indiquent la présence commune d'agents pauvres (en rouge) et riches (en bleu) : à l'équilibre, la ville est complètement ségrégée. *n* indique le nombre moyen de déménagements par agent depuis le début de la simulation




Nous présentons maintenant les résultats donnés par le modèle dans le cas du modèle polycentrique le plus simple possible : on introduit deux puis trois centres d'emplois, qui sont équivalents pour les agents. Ceux-ci travaillent simplement au centre le plus proche de leur lieu de résidence. Les formes urbaines correspondantes sont données par la figure suivante.

**Figure 3 :** Formes simples de villes polycentriques à 2 et 3 centres, en fonction de l'écart *d* entre les centres




Le tableau suivant donne les résultats de ce modèle simple grâce à différentes variables socio-économiques caractérisant le modèle : l'utilité des agents à haut revenu $U_r$ et à faible revenu $U_p$, qui représentent leur bien être, la distance totale parcourue par les agents $D_{tot}$ et la surface totale de la ville $S_{tot}$. Toutes ces variables sont données par rapport à une situation de référence correspondant au modèle monocentrique (d = 0).

**Tableau 1 :** Résultats correspondants

| Modèle | $U_r$ | $U_p$ | $D_{tot}$ | $S_{tot}$ |
|---|---|---|---|---|
| **Référence** | **100** | **100** | **100** | **100** |
| 2 centres *d* = 6 | 101,6 | 102,6 | 81,7 | 106,7 |
| 2 centres *d* = 10 | 102,2 | 103,1 | 78,8 | 109,7 |
| 2 centres *d* = 14 | 102,6 | 103,4 | 79,7 | 114,5 |
| 3 centres *d* = 6 | 102,1 | 103,4 | 74,4 | 108,0 |
| 3 centres *d* = 10 | 103,1 | 104,4 | 70,2 | 114,9 |
| 3 centres *d* = 14 | 103,9 | 105,3 | 68,0 | 122,1 |

Les effets sur la ville du polycentrisme dans ce modèle simple sont plutôt positifs : d'un point de vue économique, le bien être des agents, caractérisé par leur utilité, augmente avec le nombre de centres et leur écartement. Les agents pauvres bénéficient d'ailleurs plus de cette augmentation de bien être que les agents riches, ce qui est positif d'un point de vue social. Le bilan environnemental est plus mitigé : d'une part, les distances domicile - travail ont tendance à baisser, ce qui est positif, mais la baisse de la concurrence pour le sol provoque une augmentation des surfaces de logement qui étale la ville et a pour conséquence une hausse de la demande énergétique pour le chauffage et la climatisation.

## Résultats et conclusion

Ce travail montre l'intérêt de la simulation multi-agents dans l'étude des phénomènes collectifs que réalisent les sciences humaines et sociales. Avec l'exemple particulier du modèle standard de l'économie urbaine, on voit que l'utilisation de cet outil informatique de modélisation permet de reproduire fidèlement les résultats d'un modèle d'équilibre. Pour cela, il faut inventer un mécanisme d'interaction entre agents qui va dans le sens de l'obtention de l'équilibre. Cela peut être vu comme un enrichissement par rapport au modèle d'équilibre analytique puisqu'on pourrait ainsi étudier des mécanismes simples d'interaction, et également parce qu'on obtient un modèle dynamique dont l'étude du comportement peut être bien plus riche qu'une simple étude d'équilibre.

De plus, on a pu ainsi étudier des effets qui sont difficiles à étudier analytiquement pour une ville circulaire, à savoir l'influence sur la localisation des agents d'une dispersion exogène des emplois sur plusieurs centres urbains. Le modèle développé permet de manipuler facilement les agents individuellement ou collectivement, et d'extraire des observables globales pour dégager des conclusions quant à l'effet concret sur la localisation des agents des modifications apportées au modèle standard. Cela peut permettre d'apporter des éléments de réponse aux questions que se posent les aménageurs urbains.

Dans ce modèle simple, la ville polycentrique est désirable, tant du point de vue du bien être économique des agents que de la diminution des distances domicile – travail. Cependant, ce deuxième effet peut être contrebalancé en termes d'émissions de gaz à effet de serre par l'augmentation des surfaces de logement, ce qui suggère comme perspective de travail le calage d'un tel modèle sur des données réelles pour peser plus précisément ces différents effets.

## Bibliographie


[1] Bruckner J.K., Thisse J.F., and Zenou Y.
Why is central Paris rich and downtown Detroit poor? An amenity-based theory
*European Economic Review, 43:91–107, 1999*

[2] Fujita M.
Urban Economic Theory
*Cambridge University Press, 1989*

[3] Fujita M. and Ogawa H.
Multiple equilibria and structural transition of non-monocentric urban configurations
*Regional Science and Urban Economics, 12:161–196, 1982*

[4] Fujita M. and Thisse J.F.
Economie des villes et de la localisation
*De Boeck, 2003*

[5] Goffette-Nagot F., Thomas I., and Zenou Y.
Structure urbaine et revenu des ménages, chapitre 10
*Economica, 2000*

# Belgrand : un grand équipement pour l'utilisation des bases de données dans le domaine de la ville et de la mobilité

Jean-Paul Hubert, Olivier Bonin, Martin Henriquez
IFSTTAR, Université Paris-Est

**Les équipes de recherche ont intérêt à mutualiser les acquis des travaux d'ingénierie pour l'intégration de données sur la ville, qu'elles soient statistiques, géographiques, environnementales, techniques ou résultant de simulation, mais aussi les démarches pour l'acquisition de ces données. Le projet de centre de ressources « Belgrand » vise à répondre à cet enjeu majeur en s'appuyant sur : (1) un réseau scientifique multidisciplinaire ; (2) un portail web de référencement des projets, données, méthodes et outils, simulation et modèles, le cas échéant ; (3) des travaux méthodologiques mettant l'accent sur la référence spatiale, clé naturelle de croisement des données portant sur la ville ; (4) un séminaire régulier. L'infrastructure Belgrand préfigurée par le site web http://belgrand-gebd.ifsttar.fr mettra en lien projets, équipes et terrains, offrant une vue synoptique des travaux de modélisation urbaine pour les chercheurs et les décideurs.**

## Capitaliser les savoir-faire sur les données pour la ville

Le besoin de rassembler les compétences sur les données utiles à la recherche sur la ville, la mobilité et l'environnement a été maintes fois souligné. Les données utilisées dans les projets de recherche sont rarement produites dans ce but. Leur acquisition requiert des démarches auprès des producteurs ou diffuseurs et leur utilisation, des travaux d'ingénierie allant du simple reformatage à la reconstruction de bases de données. Ce travail est coûteux, *ad hoc*, mais réutilisable en grande partie dans d'autres projets, à condition d'être bien référencé et documenté. La recherche pourrait y gagner en efficacité, et élargir le spectre des données utilisables.

Le contexte est porteur. Nombreuses sont les impulsions politiques, scientifiques ou commerciales qui poussent à faciliter l'échange des données et leur valorisation : la directive européenne Inspire[1], le livre blanc du consortium PARADE[2], les travaux sur l'intéropérabilité des systèmes d'information… ou encore les produits de Google qui entrent massivement dans notre quotidien. La France réalise depuis quelques années un effort important :

- pour la mise à disposition des données (Réseau Quételet, Geoportail et Geocatalogue, politique de l'IGN à l'égard de la recherche, engagement du gouvernement et de plusieurs grandes villes pour l'open data,
- dans l'organisation des observatoires statistiques, régionaux ou nationaux, intégrant des données souvent d'origine administrative, dans les domaines de l'environnement, de l'urbanisme, de la santé…
- dans la technologie sur les données à des fins pratiques ou d'observation : création de l'Agence française pour l'information multimodale et la billetique (MEDDE-DGITM), enquête pîlote GPS intégrée à l'enquête nationale transports et déplacements (SOeS-Insee-Inrets), financement des EQUIPEX DIME-SHS (plateforme de collecte et diffusion de données pour la recherche en SHS, ScPo, Ined) et CASD (accès sécurisé aux données ENSAE Réseau Quételet), recherches en sécurité routière utilisant des enregistreurs embarqués (INRETS-DSCR : projets S-VRAI, LAVIA).

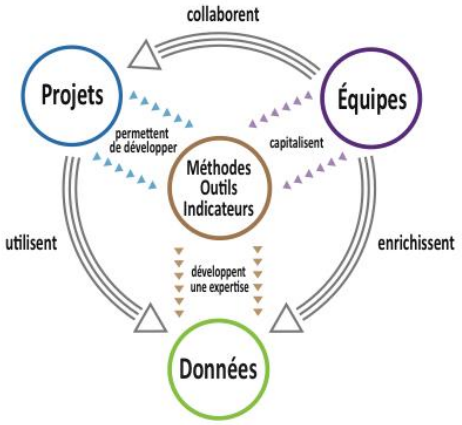
Mais la multiplication et l'informatisation des données ne vont pas sans de nouvelles contraintes. Pour protéger la vie privée, la CNIL[3] impose une rigueur croissante dans les procédures d'anonymisation, qui a pour effet pratique de supprimer des fichiers beaucoup de références spatiales. Le comité du secret statistique du CNIS contrôle l'accès à ces données indirectement confidentielles [1]. Parce qu'elles ont un caractère commercial, bien des données ne sont pas rendues publiques ou ne le sont plus depuis la privatisation d'opérateurs de transport ou de

[1] http://inspire.jrc.ec.europa.eu/
[2] http://www.csc.fi/english/pages/parade
[3] Commission nationale de l'informatique et des libertés

télécommunication. Enfin, si les innovations technologiques semblent permettre aux instituts statistiques de faire des économies substantielles, les méthodologues rencontrent de grandes difficultés pour garantir la représentativité des données collectées grâce à ces nouvelles méthodes. Pour mobiliser ce corpus d'informations potentiellement utiles chaque jour plus large et intégrer les données, les équipes de recherche ont intérêt à mutualiser les acquis du travail d'ingénierie et des démarches pour l'acquisition des données [2]. Le projet de centre de ressources « Belgrand » vise à répondre à cet enjeu majeur. La configuration générale du projet a été définie en septembre 2010 et une première phase de travaux est lancée, qui associe l'IGN, l'IFSTTAR et l'IRSTV grâce à une subvention du MEDDE.

L'objectif est de créer un cercle vertueux d'accumulation de compétences techniques et pratiques sur l'ingénierie des données, à partir des projets de recherche sur la ville durable, en s'appuyant sur :

- un réseau scientifique sur les données ouvert aux équipes de toutes disciplines ;
- un portail web de référencement des projets, données, méthodes et outils ;
- des travaux méthodologiques sur l'intégration de données, du ressourcement scientifique ;
- un cycle de séminaire de deux ans, avec publication d'actes, sur l'ingénierie des données (au sens large) pour la ville.




## Les points forts du projet

Quatre points peuvent être soulignés :

- le projet innove par son organisation distribuée et adossée à une communauté d'intérêt scientifique ; il opérera en toute neutralité à l'égard de la conduite et de la thématique des projets de recherche ;
- son action pour clarifier au maximum les conditions d'utilisation et de partage des données aidera au montage de partenariats élargis, impliquant notamment des industriels ;
- l'équipe du projet rassemble des compétences à l'interface du monde de la statistique, de l'observation environnementale, de l'information géographique et de la modélisation ; il bénéficie d'une forte dynamique de pôle à Marne la Vallée (Labex « Futurs Urbains »…) ;
- d'envergure nationale, il est voué par nature à fonctionner en réseau avec d'autres équipements analogues dans d'autres pays.

Le centre Belgrand sera ouvert à l'ensemble des acteurs : chercheurs, producteurs de données, collectivités, bureaux d'étude, etc. Il appliquera le principe de « l'équipe la plus favorisée » pour mettre à disposition de tous les modalités pratiques et juridiques d'accès aux données (par exemple : conventions pour des partenariats particuliers protégeant contre le pillage des données, etc.) ainsi que toutes les informations techniques et métadonnées.

Ses ressources web sont ébauchées dans le site prototype belgrand-gebd.ifsttar.fr. A terme, elles rendront compte, par des moyens biblio-métriques, des utilisations précises des fichiers de données dans les publications et les études. Producteurs et chercheurs pourront ainsi être informés des utilisations réelles et potentielles des données.

Le centre Belgrand archivera et diffusera des méthodes et des résultats du travail d'ingénierie des données. Il mutualisera au besoin la production et la maintenance d'outils d'intérêt général ; par exemple, pour la manipulation de référentiels spatiaux évolutifs, le changement de maille ou l'imputation spatiale. Un accent particulier est mis sur la référence spatiale qui est la clé naturelle de croisement des données portant sur la ville. Le SIG open source est privilégié comme vecteur de diffusion des méthodes, à l'exemple de l'IRSTV à Nantes [3].

Les opérations de ressourcement scientifique seront guidées par la volonté de

rapprocher les données statistiques, les données géographiques et celles issues des modèles. Elles visent aussi à apporter une meilleure reconnaissance académique du travail sur les données. Il est en effet indispensable de mieux valoriser ce travail qu'il ne l'est actuellement pour inciter les équipes à le capitaliser et à le rendre réutilisable.

**Pourquoi Belgrand ?**
Eugène Belgrand participa à la rénovation de Paris dirigée par le Baron Haussmann. On lui doit les égouts de Paris, l'aqueduc de la Vanne, celui de la Dhuis, ainsi que le réservoir de Montsouris. Le travail d'ingénierie des données partage avec les réseaux d'adduction d'eau et d'assainissement de nombreux points communs : caché, il part de la source, partage une ressource précieuse, l'épure, la recycle, irrigue et relie les individus au-delà des cloisonnements.

## Un grand équipement pour l'utilisation des bases de données au service de la modélisation urbaine

Du fait de la complexité de l'objet urbain dans le prisme du développement durable, de la densité informationnelle de ce milieu et du développement des capacités de calcul, la modélisation urbaine est une consommatrice compulsive de données. Le problème de l'intégration de ces données requiert une accessibilité continue des informations, et l'interopérabilité spatiale et sémantique des données. Classiquement, les données obtenues par observations sont des entrées pour les modèles ou encore servent à calibrer des paramètres. Elles peuvent également être mobilisées pour la vérification *a posteriori* des résultats de modèles. Mais lorsque des modèles urbains font appel à de la simulation, leurs résultats ont un statut comparable aux produits d'ingénierie créés à partir des bases de données brutes : la valeur ajoutée par la création et transformation de données doit être rendue visible. Il est nécessaire de documenter et d'évaluer les processus qui ont créé les données simulées, et utile de les capitaliser lorsqu'elles sont réutilisables.

Le référencement des modèles conceptuels, des modèles de simulation ainsi que de leurs résultats est aussi complexe et utile que celui des données d'observations. L'infrastructure web Belgrand permettra de les mettre en lien avec les projets, équipes et terrains, offrant une vue synoptique des travaux de modélisation urbaine pour les chercheurs et les décideurs. Les enjeux sont encore plus importants dans un contexte de dématérialisation des traitements sous forme de services web ou de living labs urbains associant collectivités, industriels, chercheurs et habitants, modifiant les rapports aux données et aux territoires.

Modèles et observations doivent donc bénéficier d'une dynamique commune, et non être opposés. Un équipement intégrant avec les mêmes outils : données brutes, modèles conceptuels, modèles de simulation, données intégrées et données simulées permettra une synergie plus importante entre les différentes approches scientifiques.

## Bibliographie

[1] Gaeremynck J.
Le comité du secret statistique
*Courrier des statistiques, n° 128, septembre-décembre 2009, pp.15-18*

[2] Cassier M.
Le partage des connaissances dans les réseaux scientifiques : l'invention des règles de "bonne conduite" par les chercheurs
*Revue française de sociologie, vol. 39 n°4, 1998, pp. 701-720*

[3] Rouzet C., Labbe S.
SIG en «multi-partenariat»: mobiliser les acteurs et partager les données
*Revue Internationale de Géomatique, vol. 7, N°3-4, 1997 pp. 279-295*

# Modélisation conceptuelle de l'espace urbain : une approche multi-perspective

Walid Chaker et Fabien Leurent
Université Paris-Est, Laboratoire Ville Mobilité Transport, École des Ponts ParisTech

**Dans la lignée de City-GML pour les Villes Numériques et de TRANSMODEL-TRIDENT pour les Systèmes de Transport, nous proposons l'ébauche d'un modèle conceptuel de l'espace urbain à l'aide du formalisme orienté objets. Notre modèle se veut multi-perspectives en combinant l'approche géographique avec la perspective physique. Il importe de modéliser aussi la structure topologique et spatiale des éléments. L'enjeu pratique d'un modèle informatique intégrateur serait de centraliser dans un SIG les données nécessaires au calcul d'indicateurs d'éco-conception diversifiés.**

## Introduction

La modélisation conceptuelle, à la croisée des sciences cognitives et des systèmes d'information, est l'activité qui « consiste à représenter de manière abstraite, c'est-à-dire en termes de concepts familiers aux domaines d'application et indépendamment des technologies d'implémentation, certains aspects des systèmes physiques ou humains et de leur environnement» [1]. En modélisation urbaine, une telle modélisation conceptuelle consiste à représenter et structurer les concepts clés qui forment l'environnement urbain. Les modèles urbains, en effet, « ne cessent d'augmenter en étendue et en intégration » [2]. On retrouve des modèles urbains linéaires, de gravité, systémiques, de transports, morphologiques, par agents, etc. « Chacun de ces modèles ne se définit que pour une seule vue et il y a un besoin imminent d'approches d'intégration basées sur une représentation spatialisée de l'environnement urbain » [2], l'espace étant une sorte de dénominateur commun. La représentation multi-perspectives proposée ici vise à répondre à ce besoin en combinant l'approche géographique à la perspective physique, pour modéliser le quartier tout comme le bâtiment. L'approche physique met l'emphase sur la composition matérielle de l'objet à décrire, facilitant ainsi son Analyse par Cycle de Vie (ACV). L'approche fonctionnelle, en revanche, décompose l'objet en éléments selon leurs fonctions, rôles ou usages. Quand l'objet à modéliser est un espace urbain, cette modélisation fonctionnelle devient très proche de la modélisation géographique car pour un géographe, une entité spatiale est associée à des fonctions urbaines (habitation, production, services et loisirs, échanges divers, etc.) indépendamment de sa composition physique.

## Modèles de référence

### Modèle Physique du bâtiment : Polster 95 [3]

Le modèle est décrit selon un formalisme orienté objet en utilisant des relations d'héritage et d'agrégation entre classes d'objets. Parmi les objets du modèle, on retrouve les objets fabriqués en usine, les objets construits sur site et le chantier (de construction, rénovation ou démolition) qui regroupe un ensemble de bâtiments. Un bâtiment est composé de sous-systèmes qui sont des fondations, parois, zones, etc. Chacun d'eux est fabriqué sur site à partir de composants tels que des « blocks baies » et des « murs sandwich ». Ces derniers sont formés de matériaux et de revêtements de surface, tous les deux des produits. A chaque objet sont associés des procédés (transport, mise en oeuvre, fonctionnement, déconstruction) et un inventaire contenant l'ensemble des flux élémentaires associés : les ressources puisées dans l'environnement et les émissions générées. Toutes les classes du modèle héritent de la classe générique élément qui contient les procédés et l'inventaire.

### Modèle structurel du quartier : Popovici 06 [4]

Ici, on part du fait qu' «un quartier peut inclure différents types de bâtiments (logements, bureaux etc.), leur infrastructure d'accès (routes et rues, parcs de stationnement, espaces verts etc.), des réseaux (système de distribution d'eau, égout, chauffage urbain, etc.) et des équipements collectifs éventuels (incinérateur, station d'épuration). En plus des éléments ci-dessus, une évaluation du cycle de vie au niveau du quartier doit également tenir compte des aspects liés au comportement des résidents (consommation d'eau et d'énergie, traitement des déchets ménagers, pourcentage de tri et de recyclage, etc.) et des caractéristiques du site (distances de transport, mix de production

de l'électricité, mix de production de chaleur en chauffage urbain, etc.)». Le modèle proposé utilise le même formalisme et nous semble largement inspiré du modèle physique du bâtiment de Polster. On retrouve « la classe très générale "Elément" définie en tant que classe « mère ». Ses attributs sont un nom (par exemple, le nom d'un matériau, d'un moyen de transport), une unité (par exemple kg pour un matériau, tonne-km pour un moyen de transport) et des données environnementales (par exemple un ensemble d'indicateurs environnementaux pour la fabrication et la fin de vie d'un matériau) ».

**Modèle fonctionnel du bâtiment : Gobin 03 [5]**

Même s'il n'est pas représenté selon un formalisme orienté objet, ce modèle offre une structuration fonctionnelle assez exhaustive du bâtiment. On y distingue six groupes constitutifs qui sont : "les adaptations", "la structure", "l'enveloppe", "les partitions et accès", "les équipements" et "les parachèvements". Ces groupes ont jusqu'à trois sous-niveaux pour décrire en détail les composants d'un projet. Dans le groupe de "structure", par exemple, il y a, entre autres, le sous-groupe "surfaces courantes" qui contient le niveau "surfaces utiles" où se trouvent "les planchers monolithiques", "composés" et "mixtes". Cette décomposition, bien que concentrée sur le bâtiment, prend en considération les espaces extérieurs en distinguant les espaces de circulation des accès, et ce pour chaque mode de déplacement. Toutefois, ce modèle ne permet pas de représenter la topologie de ces espaces dans le but de modéliser les réseaux de transport.

**Modèle multi-échelle de l'Environnement Urbain Peuplé : Chaker 09 [6]**

Un méta-modèle ou modèle de modèles est proposé comme un patron de conception applicable à plusieurs échelles. Ce patron regroupe des concepts génériques liés aux lieux ; à la population qui les occupent ; aux réseaux de transport; aux accès et aux transferts de mode. Comme le modèle est axé sur les transports, le concept générique de lieu ne se définit spatialement qu'à travers ses accès aux réseaux. Un lieu est soit un lieu élémentaire, soit un lieu composite qui se désagrège à une échelle plus fine. Une agglomération se décompose en quartiers. Un quartier se décompose en édifices et en lieux extérieurs, etc. Remarquons que cette décomposition, bien que fonctionnelle, présente une différence par rapport au modèle précédent car elle est fortement spatiale et les fonctionnalités du lieu sont relatives à son usage par ses occupants (personnes et ménages qui le fréquentent). Un lieu est donc perçu comme étant le lieu d'une activité. Dans le cas précédent, l'objet fonctionnel du bâtiment n'est pas forcément un lieu d'activité mais un composant qui possède un certain rôle pour assurer l'activité.

## Modèle proposé

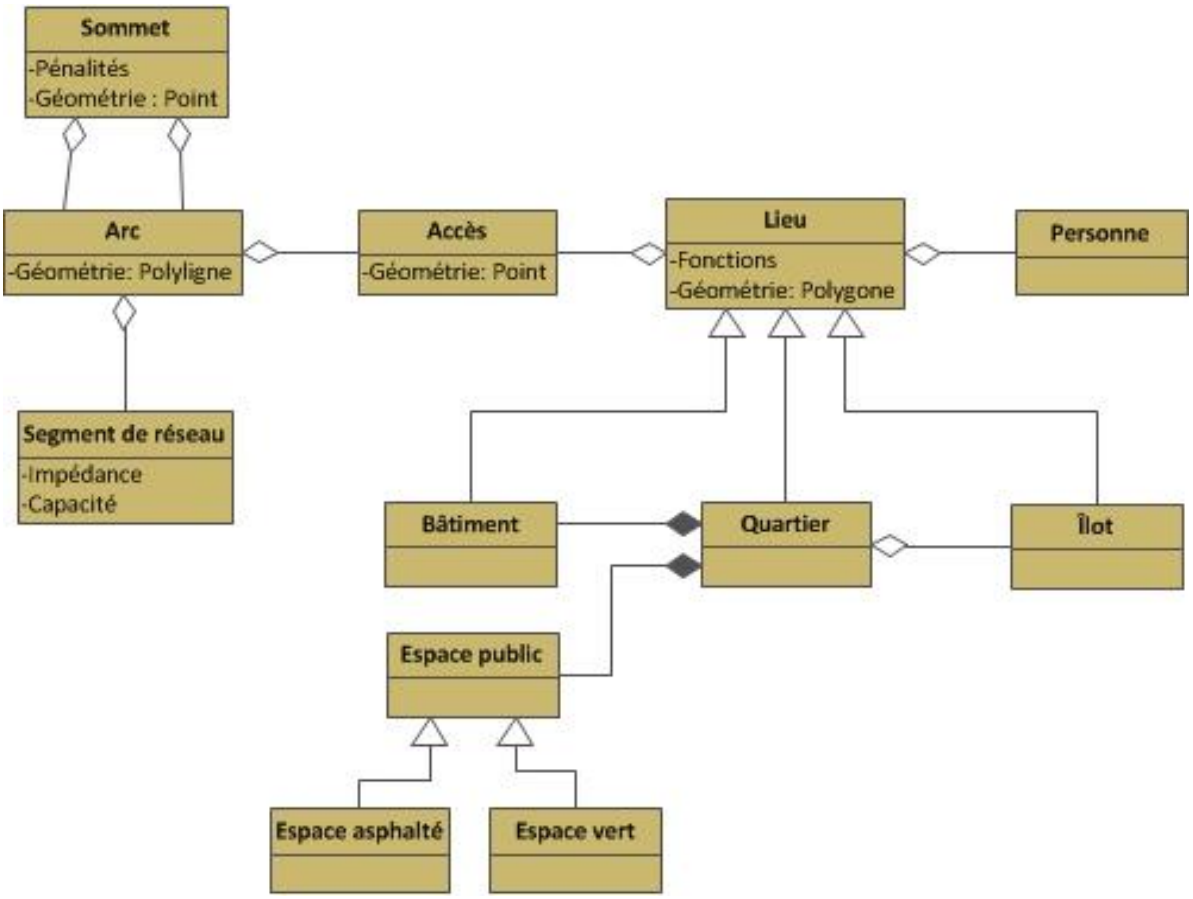
Les modèles précédents montrent une certaine complémentarité car ils permettent de répondre à des questions différentes concernant l'espace aménagé. On constate aussi que la variation d'échelle, à elle seule, n'est pas suffisante pour atteindre le niveau de généricité qui nous permet d'étudier le quartier selon une perspective à la fois physique et géographique. On se propose alors de reprendre le modèle multi-échelle de Chaker [6] et de l'adapter à la perspective physique permettant de mener l'ACV du quartier en s'inspirant des travaux de Polster [3] et de Popovici [4].

Le schéma ci-dessous représente une version simplifiée du modèle en utilisant la notation UML. En tant que formalisme orienté objet, UML utilise l'héritage et distingue l'agrégation de la composition. Pour la composition, les cycles de vie des composants et de l'agrégat sont liés alors que pour l'agrégation, les cycles de vie ne sont pas liés et l'élément agrégé peut être partagé. Cette distinction est très utile dans notre cas pour prendre en compte à la fois la composition physique et l'agrégation fonctionnelle.

Les composantes principales du modèle sont les réseaux, les lieux et les populations. Le lieu est un concept générique défini par : *i)* un ensemble de fonctionnalités ; *ii)* ses accès aux réseaux et *iii)* son empreinte au sol, représentée géométriquement avec un polygone. Le quartier, l'îlot et le bâtiment héritent tous du concept de lieu et sont reliés entre eux par des liens d'agrégation et de composition. Un quartier se décompose physiquement en espaces bâtis et en espaces extérieurs alors que le même quartier se désagrège fonctionnellement en îlots. La topologie des réseaux est représentée moyennant les arcs et les sommets qui forment des graphes logiques. Un arc représente une série de segments successifs dont les extrémités sont des

sommets. Un segment du réseau représente une conduite physiquement homogène caractérisée par une densité de flux de la grandeur transférée. Un Sommet représente un croisement et se caractérise par des pénalités de transfert définies entre chaque paire d'arcs sortant et entrant. Dans le cas du transport routier, un segment serait un tronçon de route ayant le même nombre de voies et un sommet serait un carrefour. Dans le cas du transport collectif, une mission représente une ligne de service caractérisée par une fréquence de passage et les arrêts qu'elle effectue sur le réseau. Un segment TC représente dans notre modèle un fragment homogène d'une mission. Par exemple, dans le cas où un bus quitte une voie réservée pour emprunter une voie partagée, on peut considérer cet endroit comme un point de rupture entre deux segments. Un sommet, en revanche, qui est défini entre deux arcs successifs, représente forcément un arrêt (une station ou une gare) et les pénalités représentent des pénalités de transfert. Enfin, dans le cas d'un réseau de transport d'électricité, un segment serait une portion d'une ligne électrique ayant un même niveau de tension et les sommets seraient des postes à transformateurs.

Aperçu du modèle multi-perspective proposé (Notation UML)



## Bibliographie

[1] Kolp M., Pirotte A., and Zimanyi E.
Modélisation Conceptuelle et Systèmes d'Information
*Information et Documentation : Du réel au virtuel. Presses Universitaires de Bruxelles,1998*

[2] Kohler N.
Gestion patrimoniale de stocks et modèles urbains,
*Journée Chaire éco-conception ParisTech, Marne-la-Vallée, 4 novembre 2010*

[3] Polster B.
Contribution à l'étude de l'Impact Environnemental des Bâtiments par Analyse du Cycle de Vie
*Thèse de doctorat, Ecole des Mines de Paris, décembre 1995*

[4] Popovici E.
Contribution to the Life Cycle Assessment of Settlements
*Thèse de doctorat, Ecole des Mines de Paris, février 2006*

[5] Gobin C.
Analyse fonctionnelle et construction
*Techniques de l'ingénieur. Traité Construction., vol. CD1, noC3052, pp. C3052.1-C3052.15, 2003*

[6] Chaker W.
Modélisation Multi-échelle d'Environnements Urbains Peuplés. Application aux Simulations Multi-agents des Déplacements Multimodaux
*Thèse de doctorat, Université Laval, Canada, Août 2009*

# - E -

# Approches de modélisation intégrée

# Couplage de simulations environnementales au sein d'une maquette numérique urbaine

Bruno Hilaire
Université Paris-Est, CSTB, Sophia-Antipolis
Ludovic Leclercq
Université de Lyon, IFSTTAR/ENTPE, LICIT
Julien Maillard, Julien Soula, Dirk Van-Maercke, et Kamel Zibouche
Université Paris-Est, CSTB, Sophia-Antipolis

**Les travaux présentés se placent dans le contexte de généralisation de l'usage de la maquette numérique dans l'accompagnement des projets urbains et du processus de prise de décision. La méthode permet la rationalisation des échanges en temps réel entre une simulation dynamique de trafic et des simulations « clientes » de pollution et d'acoustique afin d'obtenir une chaîne de modélisation pertinente. Un module de pilotage assure l'interopérabilité et la synchronisation de toutes les simulations. L'originalité réside dans le calcul instantané, autorisant la modification dynamique de certains paramètres du trafic afin d'étudier leur impact environnemental. Le prototype logiciel permet une navigation interactive dans le site en 3D, ainsi que la représentation des résultats de simulation sous forme visuelle ou sonore. Il a été expérimenté au sein de la Communauté d'Agglomération de Cergy Pontoise lors du projet TerraMagna.**

## Introduction

Dans le contexte induit par le Grenelle de l'Environnement, la simulation numérique doit aider à comprendre, maîtriser et soutenir un développement durable à l'échelle du quartier.

Le CSTB, à travers son activité de recherche et développement, travaille sur des outils de simulation et d'aide à la décision à l'échelle de la ville et de l'ouvrage. Fort de son expérience sur le format IFC à l'échelle de l'ouvrage, il participe actuellement à la promotion des futurs standards à l'échelle de la ville, notamment le City GML et les SIG 3D. Il se place au sein du Réseau Scientifique et Technique du MEDDE comme fédérateur et intégrateur des expertises techniques au sein de la maquette numérique (notamment à travers le projet structurant « Ville Numérique » du PST Paris-Est). L'objectif général est de généraliser l'usage de la maquette numérique dans l'accompagnement d'un projet urbain : à la fois porte d'entrée standardisée aux logiciels de simulation et d'aménagement urbain, et capable d'accueillir les résultats de ces mêmes logiciels à travers une visualisation 3D intégrée et facilement appréhendable destinée à la décision et à la communication. Dans ces travaux, nous nous plaçons en aval des problématiques de numérisation des territoires et de leurs ressources, dans une optique de valorisation des données. L'objectif est de développer des solutions innovantes pour lesquelles le 3D apporte une réelle valeur ajoutée dans le domaine de la conception et de la simulation de la ville et de ses activités en s'adressant aux collectivités locales, aux professionnels de l'aménagement, de l'urbanisme et de l'environnement. Nous avons étudié comment rationnaliser les échanges de données afin d'obtenir une chaîne de modélisation pertinente partant d'un modèle urbain unique (en CityGML, par exemple), et autorisant le couplage et l'interaction en temps réel entre différentes simulations environnementales. Nous avons plus spécifiquement étudié comment coupler une simulation dynamique de trafic à un moteur de simulation sonore temps réel et des résultats de calcul de pollution. Nous présentons ici la méthode de couplage entre ces simulations, permettant la visualisation et la modification en temps réel d'un trafic automobile et des simulations associées.

## Méthode

Le processus de travail nécessite plusieurs expertises différentes, dues à la diversité des domaines scientifiques rencontrés (informatique 3D, trafic, acoustique, qualité de l'air…). Après une mise en données du site depuis les SIG (CityGML, BDTOPO, etc) et les modèles 3D, il faut modèles 3D, il faut saisir les informations « métier » manquantes, rares dans les bases de données géométriques traditionnelles. Ces entrées spécifiques s'entendent à une échelle de travail liée au type de simulation (objets élémentaires différents).

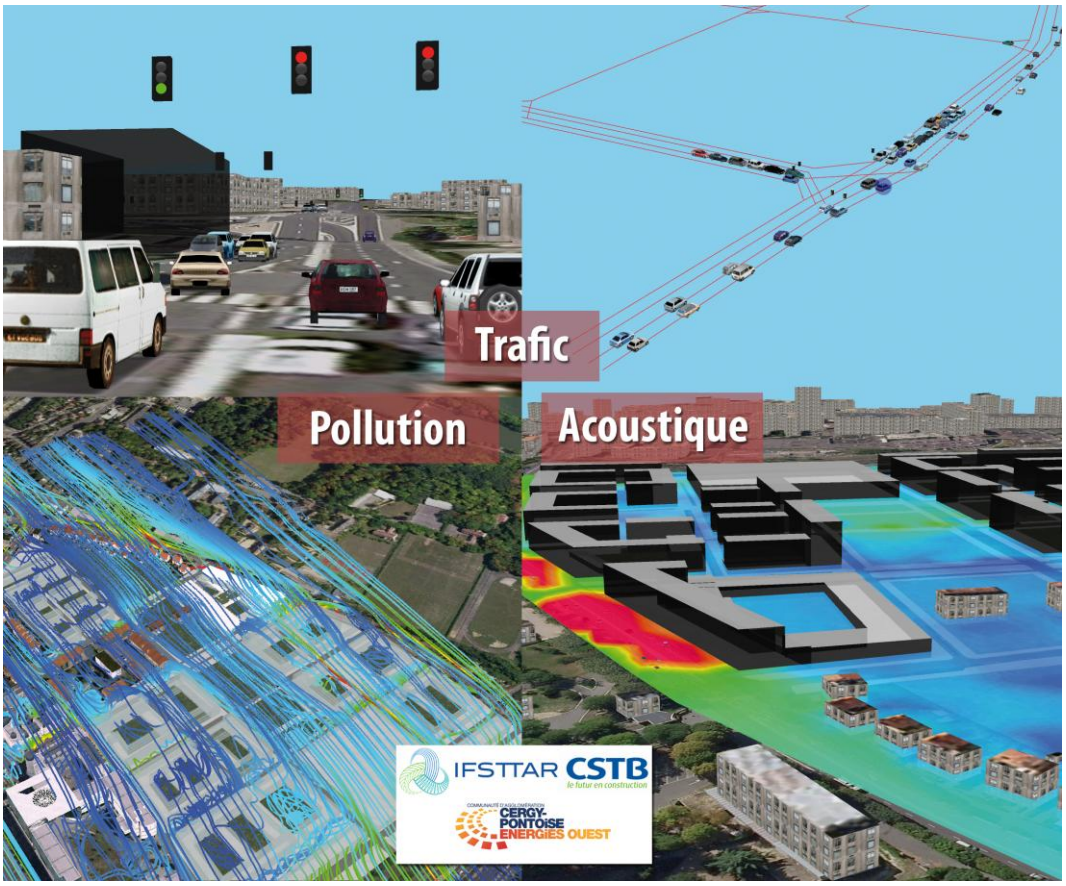
Les données trafic et le réseau routier sous forme de nœuds et de tronçons sont utilisées par le moteur de simulation de trafic SYMUVIA [1], développé par l'IFSTTAR/LICIT et l'ENTPE, pour fournir l'état du trafic à chaque instant. Le module SYMUBRUIT [2] intégré fournit de plus les intensités acoustiques Lw par tiers d'octave de chaque type de véhicule présent sur le réseau. Ce moteur a été validé dans le cadre de plusieurs expérimentations dont notamment les références suivantes : [3] [4] [5].

Le module audio utilise ensuite les données de position, vitesse, accélération calculées par SYMUVIA et une subdivision plus fine des segments de route. Il implémente des algorithmes spécifiques issus de plus de 10 ans de travaux en acoustique virtuelle [6] [7] [8] destinés à l'auralisation [9] dynamique (auditeur mobile) de sources sonores en mouvement. Un moteur de génération de cartes de bruits dynamiques permet en plus de visualiser des niveaux de bruit en fonction de l'évolution du trafic.

Quant au module de qualité de l'air, le domaine de calcul correspond au maillage 3D volumique du compartiment atmosphérique (volume d'air) entourant le bâti. A partir des conditions météo (vitesse et direction du vent, température de l'air, rayonnement solaire), un précalcul CFD permet d'obtenir des champs de vitesses thermo-aéraulique, puis de calculer la dispersion des différents polluants. Les résultats obtenus sont ensuite sélectionnés et représentés en fonction de l'état du trafic courant.

Un **module de pilotage** assure l'interopérabilité et la synchronisation de toutes les simulations. Il transmet en temps réel les sorties du moteur de trafic aux modules de simulation et de représentation. L'utilisateur peut ainsi modifier interactivement les paramètres de la simulation et en mesurer les conséquences.

**Figure 1 :** Exemple de représentation des résultats de simulation




*Source : Prototype logiciel « eveCity », projet TERRAMAGNA. Communauté d'Agglomération de Cergy Pontoise.*

## Validation sur projet pilote

La méthode est implémentée au sein d'un prototype logiciel « eveCity » permettant à un expérimentateur de visualiser en 3D le site pilote et les résultats de simulation couplés au trafic : cartes de bruit (ou auralisation) et de pollution. Il permet également de mesurer l'évolution des impacts suite à la modification de certains paramètres (cycle des feux tricolores, flux des véhicules).

Dans le cadre du projet TerraMagna, le prototype a été installé dans les locaux de la Communauté d'Agglomération de Cergy Pontoise, pour une phase d'expérimentation. Les retours soulignent l'intérêt d'un tel outil comme dispositif intégré d'aide à la décision pour les différents acteurs.

## Perspectives

Nous évaluons les possibilités de raccorder d'autres moteurs de simulation au trafic routier : consommation énergétique, indicateurs environnementaux intégrés… Nous envisageons également de proposer des modifications au CityGML afin d'intégrer plus finement la sémantique nécessaire en entrée de simulation (notamment les réseaux), et ainsi de faciliter et de réduire les phases de saisie.

## Bibliographie


[1] Laval J. et Leclercq L.
Microscopic modeling of the relaxation phenomenon using a macroscopic lane-changing model
*Transportation Research Part B, 42(6), 2008, 511-522*

[2] Can A.., Leclercq L., Lelong J., Defrance J.
Accounting for traffic dynamics improves noise assessment: experimental evidence
*Applied Acoustics 70(6), 2009, 821-829*

[3] Cana., Leclercq L., Lelong J et Botteldoren D.
Traffic noise spectrum analysis: dynamic modeling vs. experimental observations
*Applied Acoustics 71(8), 2010, 764-770*

[4] Chevallier E., Leclercq L., Lelong J., Chatagnon R.
Dynamic noise modelling at roundabouts
*Applied Acoustics 70(5), 2009,761-770*

[5] Chevallier E. et Leclercq L.
A microscopic dual-regime model for single-lane roundabouts
*Journal of Transportation Engineering 135(6), 2009, 386-394*

[6] Loyet R., Maillard J., Iehl J.-C. et Péroche B.
Graphe des réflexions dans les volumes complexes: construction, simplifications perceptives et auralisation
*In 10ième Congrès Français d'Acoustique, Lyon, 12-16 Avril 2010*

[7] Loyet R., Maillard J., Iehl J.-C. et Péroche B.
Perceptual clustering for ray based auralization
*EURONOISE 2009, October 26-28, Edinburgh, Scotland, 2009*

[8] Deille O., Maillard J., Noe N., Bouatouch K. et Martin J.
Real Time Acoustic Rendering of Complex Environments Including Diffraction and Curved Surfaces
*In procedings of 120th Audio Enginneering Society Convetion Paper (AES), 2006*

[9] Maillard J.
Prediction and auralization of construction site noise Edinburgh, Scotland
*EURONOISE 2009, October 26-28, 2009*

# Une méthode de diagnostic et de conception pour l'aménagement d'interfaces villes-ports intérieurs, basée sur l'analyse spatiale

Kristel Mazy
BATir, Construction, Architecture et urbanisme, Université Libre de Bruxelles
TVES, Territoires, Villes, Environnement et Société, Université Lille1

**Les voies d'eau européennes et les territoires qu'elles traversent présentent aujourd'hui des enjeux majeurs en terme de développement soutenable. D'une part, les friches portuaires et industrielles péricentrales constituent des réserves foncières pour favoriser la densité urbaine. D'autre part, le transport fluvial de marchandises est le mode qui produit le moins d'externalités environnementales négatives. Quels outils méthodologiques, quels supports d'analyse et de dialogue peuvent aider les différents acteurs à concilier ces différents usages ? L'outil d'aide à la décision proposé consiste en une méthode de diagnostic et de conception, basée sur l'analyse spatiale. L'objectif est d'améliorer, au travers de cette méthode, la conciliation des différents usages polarisant la voie d'eau par la reconnaissance des processus de mutations et des lieux potentiels de conflits d'usages. Deux applications seront réalisées sur des interfaces villes-ports intérieurs, l'une liée à la zone du Canal à Bruxelles, l'autre liée à la Deûle à Lille.**

## Un territoire fragilisé par la désindustrialisation face à deux enjeux globaux

Le réseau hydrographique a conditionné, avec l'essor du réseau ferroviaire, la concentration industrielle et urbaine au 19ème siècle. La régression du secteur secondaire laisse encore sur les territoires du nord-ouest européen de nombreuses friches. Constituant d'importantes réserves foncières, elles représentent aujourd'hui des leviers de développement territorial pour répondre aux enjeux croissants émanant à la fois des domaines urbain et portuaire. Un nombre important de friches industrielles et portuaires péricentrales sont convoitées par les acteurs urbains pour densifier les centres urbains de manière à lutter contre le phénomène d'étalement. Les conséquences sociales, environnementales et économiques ont, en effet, montré les limites de ce mode de développement qualifié d'« insoutenable » [1]. Dans nombre de cas, la reconversion de ces zones abandonnées constitue également une opportunité pour les acteurs urbains de fabriquer une image de marque régionale ou nationale, voire internationale, s'appuyant sur la valeur paysagère offerte par les plans d'eau [2]. Enfin, ces sites délaissés rencontrent l'intérêt des acteurs portuaires pour le du fret fluvial encouragé par le soutien européen d'initiatives intermodales, fournissant une alternative durable au réseau routier [3].

## Les spécificités des interfaces villes-ports intérieurs

La difficulté d'organiser ces territoires relève aussi de leurs spécificités.

- Territoires à caractère multi échelles (spatiales et temporelles). D'une part, ces espaces de transition relèvent du domaine portuaire, tourné vers le réseau hydrographique dans lequel ils s'inscrivent. D'autre part, ils s'intègrent dans le domaine urbain desservi par la voie navigable, relevant d'une échelle territoriale inférieure. Or les enjeux globaux liés à ces différentes échelles ne correspondent pas aux domaines d'actions limités des aménageurs portuaires ou urbains. Les temps d'action se différencient aussi : le long terme est une constante de l'aménagement portuaire tandis que le moyen et le court terme sont davantage spécifiques aux développements urbains [2].
- Un milieu sensible. Ces sites sont exposés aux risques d'inondations et de pollutions, et, en ce sens, jouent un rôle régulateur au niveau des crues et de la filtration de la pollution.
- Une gestion territoriale fragmentée. Les deux approches urbaines et portuaires

convergent sur des territoires dont la gestion actuelle, héritée de la logique fonctionnelle de l'ère industrielle, tend à créer des confrontations, qui se spatialisent en conflits d'usages et d'aménagement [4].

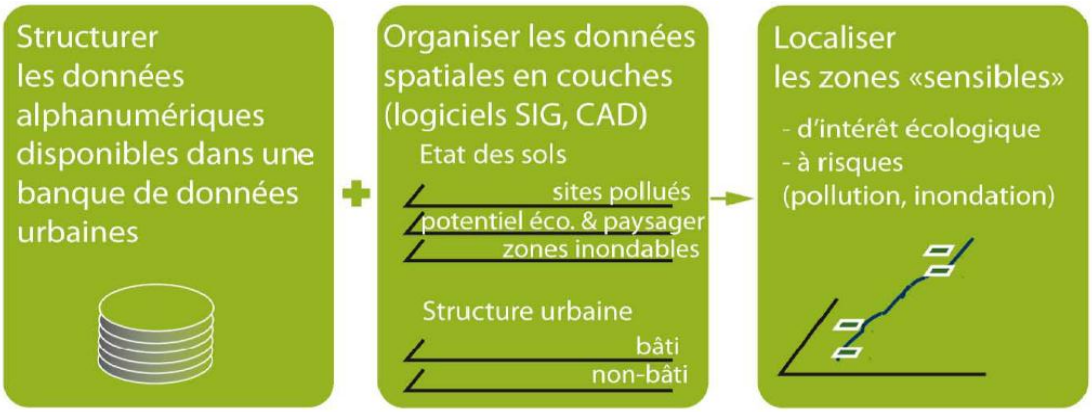
## Une méthode de diagnostic et de conception pour l'aménagement d'interfaces villes-ports intérieurs, basée sur l'analyse spatiale

S'il existe des plans stratégiques de développement urbain et portuaire, les acteurs ne disposent que de peu de méthodes pour obtenir une représentation globale et objective du territoire et des usages qui permettrait d'améliorer la conciliation des usages et d'éviter les erreurs d'appréciation sur l'opportunité des décisions et la focalisation sur les jeux d'acteurs. La recherche des faits organisateurs de l'espace et leur restitution sous forme synthétique demeurent une trop rare exception [5]. Si l'objectif est d'aller vers une gestion plus cohérente du territoire, quels outils méthodologiques peuvent aider les acteurs à élaborer un diagnostic territorial et des pistes prospectives en regard de celui-ci ? Compte tenu des spécificités propres à ces territoires, le projet de recherche vise à élaborer un outil d'aide à la décision pour l'aménagement des interfaces villes-ports intérieurs, consistant en l'élaboration d'une méthode de diagnostic et de conception, basée sur l'analyse spatiale. L'itinéraire méthodologique proposé intègre progressivement quatre strates.

### *Analyse du milieu : le territoire en tant que support des ressources*

Ce premier volet aborde la question du rôle environnemental des berges et du bassin versant, notamment vis-à-vis des crues et de la pollution. Aujourd'hui, la création de zones humides, de prairies inondables et de bassins de retenue, la réhabilitation ou la « renaturation » des berges sont des pratiques de gestion de l'eau couramment mises en œuvre pour permettre la régulation de l'étiage et des crues, l'épuration naturelle de l'eau et le maintien de la vie aquatique [6]. Par le biais d'un système d'information géographique, nous localiserons les zones naturelles d'intérêt écologique et les zones présentant un risque en raison de leur caractère pollué ou inondable.

**Figure 1 :** Schéma de la méthodologie - volet 1

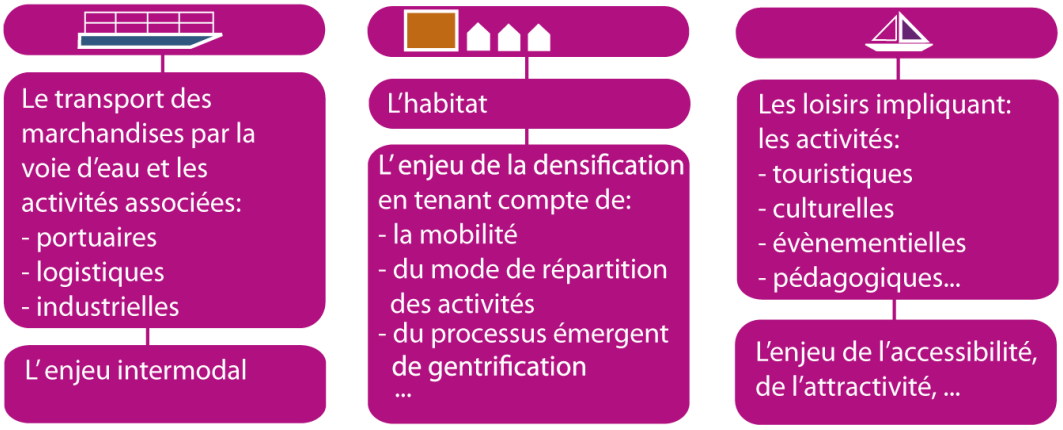



### *Analyse des usages, fonctions, enjeux par thème : définir les usages et fonctions et leurs enjeux sociaux, économiques et environnementaux*

Pour chacun des usages, il s'agit de questionner les enjeux auxquels font face les acteurs du domaine urbain et portuaire, les réponses qu'ils y apportent ainsi que les risques et les limites que celles-ci comportent. On considérera le niveau spatial auquel ces problématiques se posent, passant du global à leurs déclinaisons particulières au niveau régional puis à l'échelle plus restreinte du quartier. Par exemple, concernant l'habitat, globalement, une plus grande densité permettrait de répondre à la nécessité d'économiser les ressources et l'énergie [7]. Tandis qu'à l'échelle régionale, le cas bruxellois, par exemple, montre que la question de la densification est davantage liée aux questions de la démographie et de la lutte contre l'exode urbain [8]. Au niveau local, compte tenu de la structure naturelle, bâtie et

socio-économique, une densification non maîtrisée pourrait entraîner différents risques tels que celui de l'inondation ou encore celui de l'effet d'éviction des populations plus fragilisées suite au processus de gentrification[1] émergent.

**Figure 2 :** Schéma de la méthodologie - volet 2

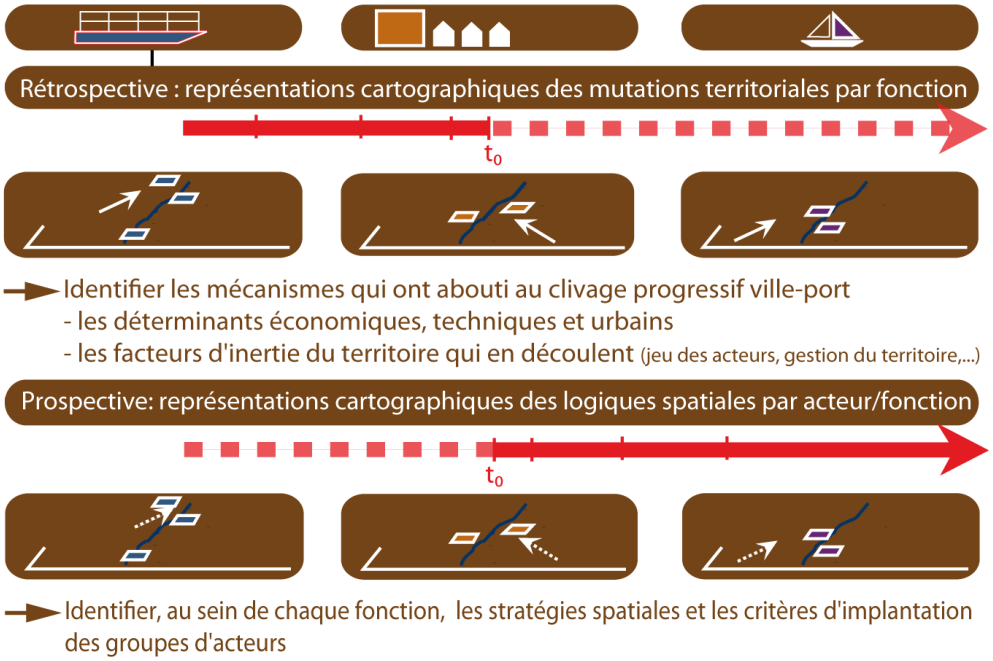



### *Analyse des mutations territoriales par thème : anticiper les évolutions du développement territorial*

Ce volet a principalement comme objectif de mettre en évidence, au travers d'une lecture historique, les conditions héritées de l'histoire (le contexte institutionnel, le jeu des acteurs, les domaines et temps d'action) qui influencent les mutations urbaines actuelles.

Par exemple, à Bruxelles, la complexité du contexte institutionnel associée à une maîtrise foncière publique limitée entravent l'élaboration d'une vision politique globale et cohérente. Profitant de cette situation, des initiatives privées dessinent l'ébauche d'un renouvellement fragmentaire, spéculatif, en totale rupture avec les fonctions traditionnelles et le contexte local, accompagné d'une gentrification du front d'eau.

**Figure 3 :** Schéma de la méthodologie : volet 3

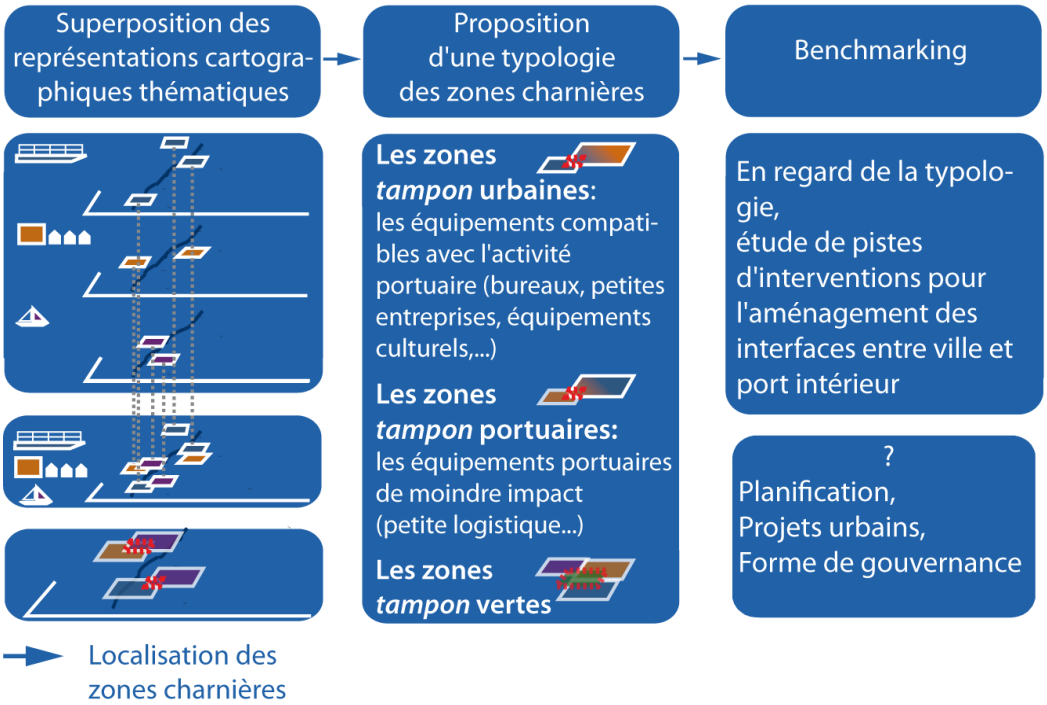



[1] La gentrification, dans la définition devenue canonique donnée par la sociologue Ruth Glass (1964), désigne, d'une part, un processus de déplacement et de remplacement de populations dans des secteurs urbains centraux par des catégories plus aisées et, d'autre part, la réhabilitation physique de ces mêmes secteurs. Cette réhabilitation implique la transformation par des membres des classes moyennes supérieures de logements qui présentent souvent un caractère patrimonial et qui sont situés dans des quartiers populaires [9].

### *Analyse holistique, articulation des thèmes : localiser les zones charnières[2], étudier des pistes d'interventions pour l'aménagement des interfaces villes-ports intérieurs*

Ce dernier volet propose une identification et une typologie des zones charnières par la superposition des stratégies (volet 2) et mutations (volet 3) identifiées par thème et la mise en évidence des conflits d'usages (dans le temps et l'espace). En regard de ces typologies, nous étudierons des pistes d'aménagement par l'étude comparative d'opérations volontaristes. Celles-ci relèveront de la planification, d'opérations urbanistiques et architecturales et questionneront la conciliation des fonctions urbano-portuaires dans l'espace et dans le temps, et leur adéquation aux différents éléments du contexte (milieu naturel et bâti, données socioéconomiques, contexte juridique et institutionnel).

**Figure 4 :** Schéma de la méthodologie - volet 4




## Remerciements

Cette recherche est effectuée dans le cadre d'une thèse de doctorat co-dirigée par Jean-Luc Quoistiaux, Yves Rammer (BATir, Université Libre de Bruxelles) et Philippe Menerault (TVES, Université Lille 1), financée par INNOV$^{IRIS}$, l'Institut Bruxellois pour la Recherche et l'Innovation.

[2] Les zones charnières révèlent les lieux d'articulation de plusieurs logiques, qui constituent un enjeu pour le développement des territoires [10].

## Bibliographie


[1] Rammer Y., Mazy K., Dechamps Y.
Densification de la ville et construction durable
*Bruxelles : Presses universitaires de Bruxelles, 2009*

[2] Charlier J.
Le caractère protéiforme des interfaces urbano-portuaires
*Faire la ville avec le port, quelles stratégies pour le redéveloppement des espaces de liaison ville/port ? Guide des bonnes pratiques*, Projet *Plan the City with the Port, Fonds Européen de Développement Régional Interreg IIIc, Zone Ouest, Programme cadre régional Hanse Passage, Le Havre : Ville du Havre, 2007, pp.7-11*

[3] Commission Européenne
Livre Blanc – La politique européenne des transports à l'horizon 2010 : l'heure des choix
*Luxembourg : Office des publications officielles des communautés européennes, 2001*

[4] Baudouin T., Collin M.
L'après friches portuaires
*Urbanisme*, n°291, novembre-décembre 1996, pp.24-32

[5] Cairol D., Piveteau V.
Les relations chercheurs-acteurs: place des représentations spatiales
*Représentations spatiales et développement territorial, de Sylvie Lardon, Pierre Maurel et Vincent Piveteau. Paris: Hermès Science Publications, 2001, pp. 57-73.*

[6] Lechner G.
Le fleuve en ville. La valorisation des berges en milieu urbain
*Paris : Direction générale de l'Urbanisme, de l'Habitat et de la Construction, octobre 2006*

[7] Steemers K.
Energy and the city : density, buildings and transport
*Energy and buildings 35, 2003, pp. 3-14*

[8] Declève B., Ananian P., Anaya M., Lescieux A.
Densités bruxelloises et formes d'habiter
Belgique : Ministère de la Région de Bruxelles-Capitale, 2009

[9] Rérat P. et *al.*
Une gentrification émergente et diversifiée : le cas des villes suisses
*Espaces et sociétés 1/2008, n°132-133, pp.39-56*

[10] Lardon S., Piveteau V.
Méthodologie de diagnostic pour le projet de territoire : une approche par les modèles Spatiaux
*Géocarrefour, vol. 80/2 I 2005, mise en ligne le 01 décembre 2008, URL :*
http://geocarrefour.revues.org/index980.html

# Le projet de recherche URSULA : un exemple d'approche intégrée de la modélisation urbaine

Laurence Pattacini
Université de Sheffield, Royaume Uni

**Cet article présente un exemple d'utilisation de modèles informatiques pour développer un projet urbain : la régénération d'un quartier au centre de Sheffield en Angleterre. Ce projet fait partie du projet de recherche URSULA : Urban River Corridors and Sustainable Living Agenda[1] et illustre le travail de l'équipe multidisciplinaire au sein de l'Université de Sheffield dont l'auteur fait partie. Le projet financé par l'EPSRC (Engineering & Physical Sciences Research Council) en collaboration avec la municipalité étudie différentes formes urbaines soutenues par des données scientifiques pour créer des espaces urbains le long des rivières qui contribueront au développement durable de la ville. L'évaluation des différentes options qui est en cours se fera au moyen des modèles informatiques et en consultant des experts dans les différents domaines d'intervention. Ceci permettra d'établir les facteurs déterminants qui ont un impact sur la qualité et la performance des formes urbaines proposées pour établir un schéma synoptique sous la forme d'un réseau Bayésien qui contribuera au développement du projet final.**

## Contexte

Suite aux changements d'usage et de perception des rivières urbaines et des espaces environnants, les couloirs des rivières sont devenus des lieux privilégiés pour la régénération urbaine et jouent un rôle primordial dans la politique de la ville. Sheffield s'est développée le long du Sheaf, une des cinq rivières qui prennent leurs sources dans les collines du parc national du Peak District à l'ouest et convergent vers les plaines de Doncaster, formant cinq vallées entre les sept collines qui entourent le centre de la ville. Ces cinq rivières urbaines ont joué un rôle très important pour le développement industriel du XIXème siècle et offrent maintenant des liens naturels avec la campagne environnante mais elles augmentent aussi les risques d'inondation qui ont été particulièrement dramatiques en juin 2007. Sheffield est donc un lieu privilégié pour étudier les rivières urbaines en relation avec la politique pour le développement durable qui est le but du projet de recherche URSULA (Figure 1).

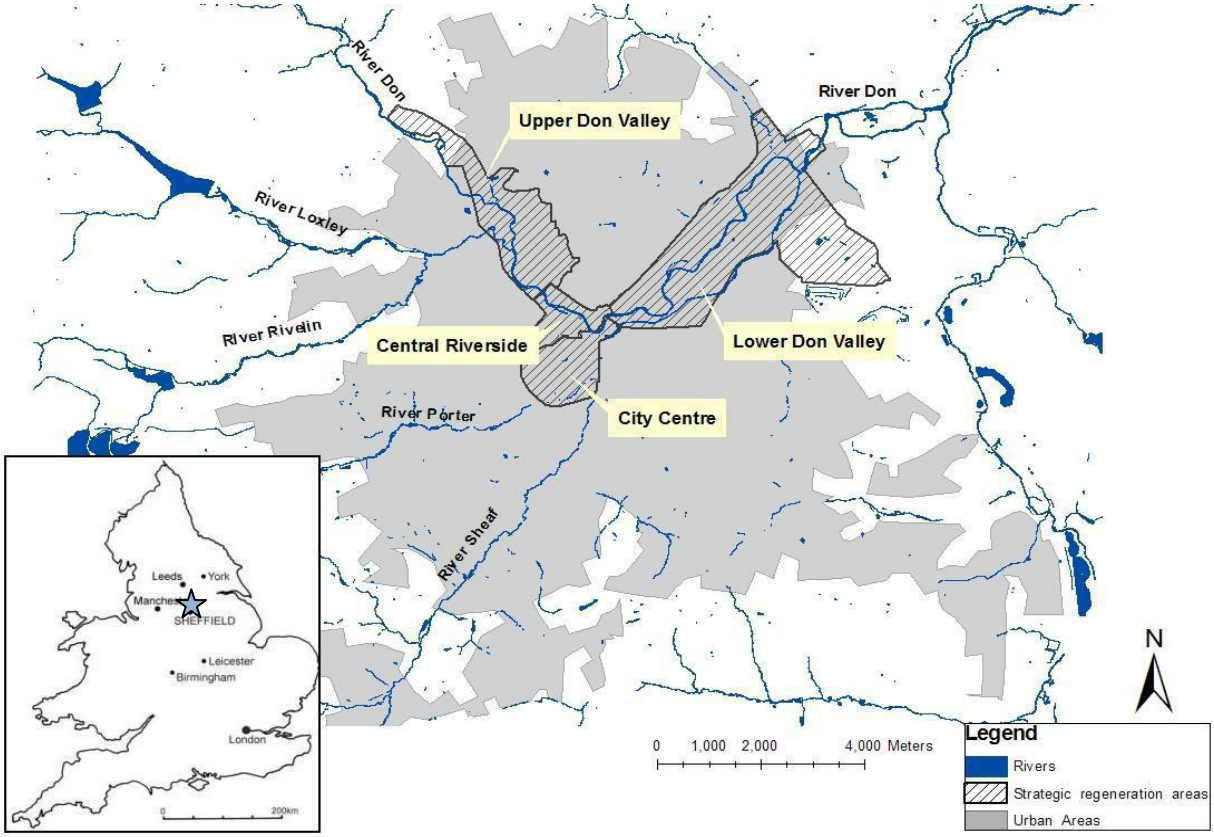
### *Objectifs*

L'objectif principal du projet de recherche est de produire un portfolio de méthodes, données et solutions urbaines innovantes prenant en considération les aspects sociaux, économiques et environnementaux. Les interventions seront multiples et variées comprenant :

- l'amélioration de l'accès à la rivière pour des activités de loisirs telles que la promenade, la pêche, le canoë, etc.;
- l'enlèvement ou la modification de certains barrages pour restaurer la sinuosité du lit de la rivière et faciliter le passage des poissons ;
- la modification de la nature et du profil des berges pour augmenter la richesse écologique ;
- la création de nouveaux quartiers qui prennent en compte la proximité de la rivière et les effets microclimatiques et environnementaux ;
- l'exploration de la possibilité d'utiliser des espaces verts pour remédier aux risques d'inondation en permettant à l'eau d'occasionnellement envahir l'espace urbain sans affecter l'espace bâti.

[1] Des informations supplémentaires sur ce projet peuvent être obtenues sur le site électronique : www.ursula.ac.uk.

**Figure 1 :** Sheffield et ses rivières, carte créée par Sarah Moore, URSULA, Université de Sheffield.




## *Méthodologie*

Pour atteindre ces objectifs, le projet utilise un certain nombre de programmes de modélisation urbaine pour guider le développement de méthodes et d'outils qui permettront de mieux comprendre les effets des rivières urbaines pour la ville durable et d'influencer la régénération et la gestion des espaces urbains. Ces modèles urbains ont été choisis pour leur performance mais aussi en relation avec les disciplines représentées au sein de l'équipe du projet de recherche et l'expertise des différents chercheurs.

Les modèles urbains utilisés pour étudier, comparer et évaluer les différentes alternatives de formes urbaines sont les suivants.

- Les différents scénarios sont testés en fonction des futures possibilités d'inondations tenant compte des changements climatiques et des données des inondations de 2007 à Sheffield. Le programme de simulation hydraulique utilisé est ISIS 2D. Ce programme hydrodynamique permet, en utilisant les données numériques obtenues grâce au système LIDAR (Light Detection And Ranging), de visualiser l'écoulement de l'eau dans l'espace urbain en simulant les risques prévisibles d'inondation.[2]
- L'une des interventions est liée à la gestion de l'eau pour le développement durable. Le programme de modélisation MUSIC est utilisé pour créer une simulation du débit des eaux pluviales et établir la performance de chaque forme urbaine proposée pour l'absorption des eaux de ruissellement.[3]
- Pour évaluer le niveau de confort au sein des différents scénarios de développement urbain, le programme ENVI-met est utilise pour illustrer une simulation climatologique. C'est un modèle microclimatique tridimensionnel qui représente les mouvements d'air et les fluctuations de température autour des bâtiments, prenant en compte les caractéristiques des types de bâtiments, la végétation et les matériaux de surface (Fahmy et *al*, 2011) [1].[4]

[2] Le chercheur responsable de cette étude est Sarah Moore.
[3] Le chercheur responsable de cette étude est Sarah Moore.
[4] Le chercheur responsable de cette étude est Mohammad Fahmy en collaboration avec Abigail Hathway.

- La mobilité au sein du quartier est analysée en appliquant les méthodes établies par le groupe de recherche Space Syntax qui étudie les tendances liées aux mouvements et comportements dans l'environnement urbain. Le programme utilise est Axwoman 4.0, une extension du logiciel ArcGIS (Geographic Information System ; Hillier, Hanson 1984 [4] ; Jiang, 2009) [5].
- D'un point de vue économique, un modèle innovant d'estimation financière est utilisé s'appuyant sur une représentation tridimensionnelle des formes urbaines proposées. Ce prototype développé au sein de l'équipe URSULA explore différents types de fonctions pour les bâtiments proposés et estime le profit financier (Henneberry et *al*, 2010)[5] [2].

## Etude de cas

Le projet de recherche est en cours et seul le travail préliminaire peut être présenté sous la forme d'un cas particulier de conception urbaine dans un quartier en bordure de rivière au centre de la ville de Sheffield pour lequel différentes formes urbaines sont étudiées, comparées et évaluées. Quatre scénarios sont utilisés, y compris la situation existante. Ces différentes propositions urbaines pour le même site sont illustrées en utilisant des visualisations digitales 3D permettant des promenades virtuelles en temps réel dans les espaces urbains créés.

L'évaluation de ces différentes options se fera au moyen des modèles informatiques mentionnés ci-dessus et en consultant des experts dans les différents domaines d'intervention. Les connaissances acquises seront représentées sous la forme de réseaux Bayésiens. Ceci permettra d'établir les facteurs déterminants qui ont un impact sur la qualité et la performance des formes urbaines proposées et informera une cinquième et dernière proposition urbaine qui sera présentée à la municipalité et aux différents acteurs liés à la régénération de ce quartier.

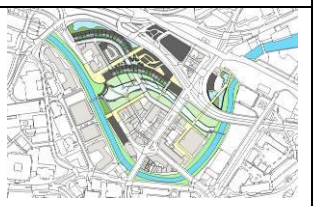
### *Les quatre options*

La situation existante sert de référence pour les trois propositions urbaines qui ont des partis urbanistiques très différents même si, dans tous les cas, les bâtiments classés ou remarquables ainsi que le réseau de transport de bus sont préservés. L'un des scénarios est conçu par la municipalité dans le cadre du plan de régénération de la ville ; les deux autres sont conçus par l'auteur en collaboration avec l'équipe multidisciplinaire d'URSULA.

Le projet de la municipalité a pour but d'optimiser le bénéfice économique du site en densifiant les blocs urbains existants tout en adressant les risques d'inondation en créant un parc linéaire le long de la rivière. Les deux scénarios URSULA se veulent novateurs et explorent deux approches très différentes en rapport avec la mobilité, l'hydrologie et le bâti pour créer des espaces urbains compatibles avec les exigences du développement durable. Les caractéristiques principales des quatre options sont résumées dans le tableau ci-dessous (Figure 2).

[5] Les chercheurs responsables de ce programme sont John Henneberry et Sarah Moore

**Figure 2 :** Résumé des caractéristiques principales des quatre options

| Situation existante / octobre 2009 | Projet municipal / Agence Environnementale | URSULA Option 'Rues' | URSULA Option 'Chenal d'écoulement' |
|---|---|---|---|
| | | *Formes urbaines conçues par Laurence Pattacini* | |
| | | |  |
| Les îlots formés par les rues orthogonales sont occupés par de petites industries, des bureaux ou des terrains vagues. La majorité des bâtiments qui ne sont pas classés sont de trois étages ou ont la forme de petit hangar. La nouvelle voie rapide a détruit en partie l'homogénéité du site.<br><br>La rivière est seulement visible des ponts et des espaces de circulation au niveau haut. Les activités de loisirs en relation avec la rivière sont donc très limitées.<br><br>La végétation est spontanée (saules, aulnes et sycomores) dans le lit de la rivière et dans les terrains vagues. | Le plan orthogonal des rues existantes est préservé ; les îlots sont densifiés avec des bâtiments de cinq étages qui abritent des activités mixtes telles que des bureaux, logements et commerces.<br><br>Le bord de la rivière est aménagé en parc avec des terrasses gazonnées permettant un meilleur accès à l'eau et encourageant les activités de loisirs. Le parc est bordé d'un mur de gabions et fait partie des aménagements pour la protection contre les inondations.<br><br>La végétation consiste en du gazon et quelques arbres. Certains bâtiments ont des toits végétalisés pour absorber une partie des eaux de ruissellement. | La morphologie urbaine des rues orthogonales et des îlots est respectée mais modifiée pour optimiser l'accès à la rivière et la mobilité des piétons au sein du site. Les bâtiments sont de hauteurs variables en relation avec les bâtiments classés environnants. Les activités sont mixtes.<br><br>Les quais hauts sont aménagés en places urbaines avec des terrasses pour des restaurants ou cafés. Les quais bas sont conçus comme des espaces de promenade et de loisir. Un mur bas le long des quais hauts et des matériaux de surface drainants contribuent à la protection contre les inondations.<br><br>Le pari végétal est de créer une forêt urbaine en plantant une grande quantité d'arbres dans les espaces publics. Les cœurs des îlots sont occupés par des jardins privés pour les groupes de logements et des espaces communautaires avec des jardins pluviaux pour les bureaux. Les toits sont végétalisés ou sont des toits jardins. | Le pari est de faire de la place pour l'eau. Les formes urbaines s'organisent autour d'un nouveau chenal d'écoulement pour permettre à l'eau d'envahir l'espace urbain sans endommager le bâti et contourner le goulet d'étranglement sous le pont. Les bâtiments prennent les formes de barres suivant la ligne du chenal et de tours pour compenser la perte de surface bâtie. Les activités sont mixtes.<br><br>L'expérience de la rivière est principalement visuelle à partir des ponts et des espaces de circulation hauts. L'interaction avec l'eau se fait au moyen de plans d'eau faisant partie des techniques alternatives pour la gestion des eaux de ruissellement urbain.<br><br>Le chenal d'écoulement est conçu comme une prairie fleurie avec des structures de renforcement en gabion. Le pari végétal est d'encourager les semences naturelles. Des plantes de zones humides sont intégrées dans les plans d'eau pour la gestion alternative des eaux de ruissellement. |

## *L'évaluation et l'utilisation de modèles urbains*

L'évaluation des différentes options est en cours et toutes les données ne sont pas encore disponibles. Seules les performances liées aux risques d'inondation, au confort thermique et à la mobilité peuvent être présentées.

***Les risques d'inondation***

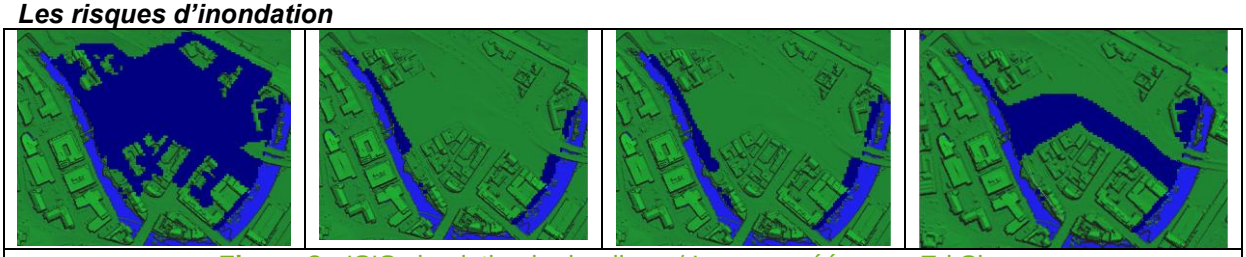


**Figure 3 :** ISIS simulation hydraulique / Images créées par Ed Shaw

Les protections contre les crues des trois propositions urbaines protègent le site pour des événements majeurs d'une période retour 100 ans. Le projet de la municipalité en relation avec l'agence environnementale qui a enlevé toute la ripisylve ou végétation dans le lit de la rivière, offre une plus grande protection pour des événements d'une période retour de 1000 ans. Le chenal d'écoulement proposé pour le second scénario URSULA joue un rôle important en diminuant le niveau des eaux durant des événements majeurs de période retour 200 ans en particulier dans le cas où des embâcles se forment sous le pont en aval.

***Le confort climatique***

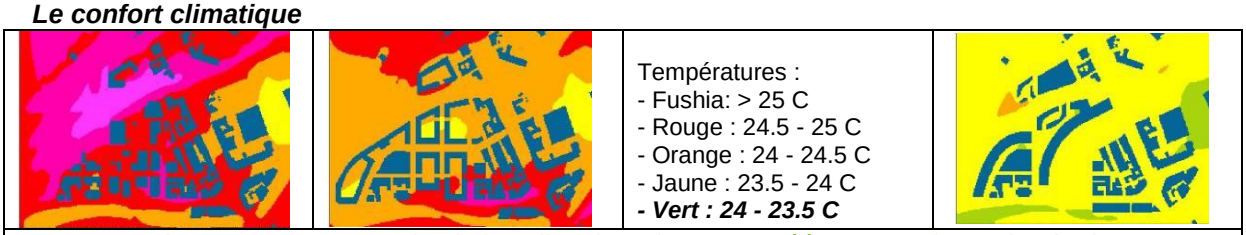



**Figure 4 :** ENVI-met simulation climatique / Images créées par Mohamad Fahmi

L'espace ouvert du chenal d'écoulement crée une circulation d'air plus importante au sein du développement urbain et donc un effet de rafraîchissement de l'air. La quantité d'arbres et les toits plantés dans l'option 'Rues' ont également un effet sur la température des espaces urbains mais moins important. En résumé, le confort climatique des options proposées par l'équipe d'URSULA est meilleur que la situation existante.

***La mobilité***

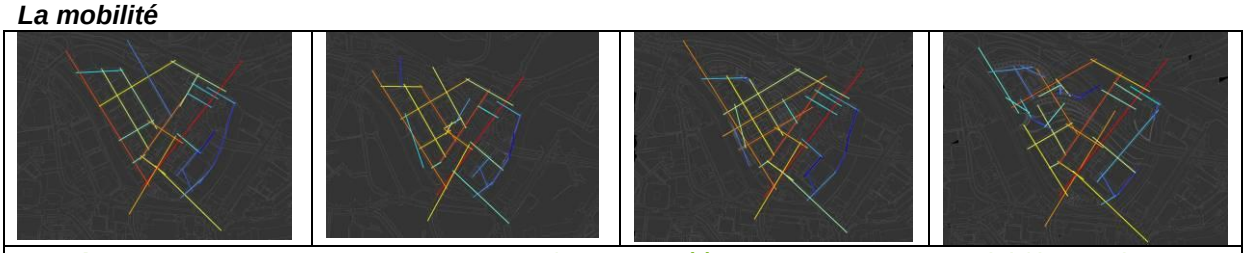


**Figure 5 :** Space Syntax - Axwoman 4.0 / Images créées par Laurence Pattacini / les couleurs chaudes représentent un niveau d'intégration des espaces de circulation plus élevé.

La mobilité dans l'option de la municipalité est semblable à la situation existante avec des ouvertures sur la voie rapide. Néanmoins, le parc et la rue piétonne le long de la rivière offrent une meilleure interaction avec l'eau. L'option 'Rues' offre une plus grande perméabilité du site en relation avec les espaces urbains environnants en offrant des liens physiques et visuels supplémentaires. Les possibilités d'accès à la rivière sont multipliées avec plusieurs rues orientées vers la rivière, dont une alignée avec le pont piéton. Les quais sont aménagés en places urbaines avec des relations directes physiques et visuelles avec l'eau. Le 'chenal d'écoulement' crée une barrière naturelle au centre du site et par là-même, la mobilité est plus restreinte. La circulation piétonne dans le chenal est autorisée mais informelle et donc non accessible à tous. Néanmoins, les voies d'accès principales sont préservées.

## *La cinquième option : une approche intégrée*

Du point de vue de l'urbaniste, ces données quantitatives sont très utiles mais les modèles ne considèrent que des phénomènes spécifiques et ne reflètent pas la complexité de la ville et du développement durable. Ces résultats ne peuvent pas être considérés indépendamment des données qualitatives des

analyses urbaines plus traditionnelles. Toutes ces informations devront donc être intégrées dans le réseau Bayésien en relation avec les données obtenues lors des entretiens avec les experts. Cela permettra d'établir les relations de cause à effet entre différents types de formes et d'interventions urbaines et les critères de performance pour le développement durable choisis par l'équipe de recherche en relation avec la municipalité qui sont :

- encourager le développement économique et les investissements,
- augmenter la valeur économique des terrains,
- optimiser la profitabilité des terrains,
- fournir des logements de qualité à tous,
- assurer la sécurité des personnes et des biens,
- minimiser le besoin de voyager et optimiser l'utilisation des transports à développement durable,
- utiliser de manière efficace terrains et bâtiments existants,
- veiller à la qualité de l'environnement construit,
- protéger et respecter l'héritage historique,
- préserver la qualité des espaces naturels et paysages par une gestion respon-sable,
- assurer la protection des éléments naturels et de la biodiversité,
- préserver les ressources en eau,
- minimiser les risques d'inondation,
- optimiser l'efficacité énergétique et l'adaptation aux changements climatiques.

## Discussion

Le projet URSULA, grâce à son équipe pluridisciplinaire, permet de considérer un grand nombre d'aspects importants pour le développement durable qui peuvent être évalués par différents types de modèles informatiques. Néanmoins, le choix est limité puisqu'il dépend des connaissances et de l'expertise des différents membres de l'équipe ainsi que des capacités informatiques. De plus, chaque programme utilisé a ses limitations et les logiciels ne sont pas toujours compatibles entre eux. L'entrée des données pour chaque programme prend beaucoup de temps et nécessite des connaissances informatiques spécifiques. Par exemple, le programme ENVI-met n'est pas compatible avec les programmes de dessin tels que « CAD » et « Sketch up » et nous avons donc dû faire appel à un expert extérieur, ce qui limite les possibilités de raffinement du modèle.

Pour l'urbaniste, c'est un grand avantage d'avoir accès à des données précises repré-sentées visuellement pour informer les formes urbaines. Cependant, pour une approche intégrée, il faut effectuer un travail de synthèse. Dans le cas d'étude présenté ci-dessus, le réseau Bayésien devrait permettre d'établir un schéma synoptique qui contribuera au développement du projet final.

### Remerciements

Cet article est inspiré du travail de recherche pour le projet URSULA. Ce projet est financé par l'EPSRC (Engineering & Physical Sciences Research Council), que l'auteur remercie pour son soutien. Les idées présentées dans cet article sont celles de l'auteur et ne sont pas nécessairement repré-sentatives de l'opinion de l'EPSRC ou des autres chercheurs impliqués dans ce projet. Toute erreur est également la responsabilité de l'auteur.

## Bibliographie

[1] Fahmy M. et *al*., 2011
Environmental thermal impact assessment of regenerated urban form: A case study in Sheffield
*Proceedings Wold Renewable Energy Congress 8-11 May 2011, Linkoping, Sweden (à venir)*

[2] Henneberry J. et *al.,* 2011
Physical-Financial Modelling as an Aid to Developers' Decision-making
*In Tiesdell, S. and Adams, D. (eds) Design and the Real Estate Development Process Wiley-Blackwell: Chichester (à venir)*

[3] Hildebrand F. and Bagaeen S., 2010
Adapting the City
*In Jenks M. and Jones C. (eds) Dimensions of sustainable City, Sprringer: London*

[4] Hillier B. and Hanson J., 1984
The Socio Logic of Space
*Cambridge University press: Cambridge*

[5] Jiang B. and Claramunt C., 2002
Integration of Space Syntax into GIS: New Perspectives for Urban Morphology
In *Transactions in GIS*, Vol. 6, n° 3, 2002, pp. 295-309

[6] Shaw E. et *al*., 2010
Bayesian Networks and Social Objectives: A Canoeing Case Study
*In Sawyne D,A. et al (eds) Proceedings of International Congress of Environmental Modelling and Softwares*
*International Environmental Modelling and Software Society: Ottawa, Canada, July 2010*

# Analyse de cycle de vie et aide à la décision : cas des bâtiments parisiens

Charlotte Tardieu
Ecole des Ingénieurs de la Ville de Paris
Cédissia About-de Chastenet
Ville de Paris
Morgane Colombert, Youssef Diab
Ecole des Ingénieurs de la Ville de Paris
Christophe Gobin
Vinci Construction
Grégory Herfray
Mines ParisTech
Thibaut Jarrin
Ecole des Ingénieurs de la Ville de Paris
Bruno Peuportier
Mines ParisTech
Maxime Trocmé
Vinci Construction

**L'étude exploratoire ci-après présente la possible utilisation de l'Analyse de Cycle de Vie (ACV) par la Ville de Paris pour accompagner les travaux de rénovation des bâtiments parisiens. A partir de la typologie des bâtiments proposée par l'Atelier Parisien d'Urbanisme (APUR), nous avons comparé les performances environnementales de quatre bâtiments types, puis étudié les impacts environnementaux d'éventuels travaux de rénovation d'un bâtiment datant du début des années 1970.**

## Contexte

La Ville de Paris, sensible aux enjeux climatiques mondiaux, a adopté son Plan Climat territorial en 2007 et s'est engagée pour 2020 à réduire de 25 % les émissions de gaz à effet de serre et les consommations énergétiques de son territoire, et à atteindre 25 % de sa consommation énergétique en provenance des énergies renouvelables. L'énergie n'est pas la seule problématique environnementale pour laquelle la Ville de Paris s'engage et parmi les nombreuses actions mises en œuvre, nous pouvons citer : le Plan Biodiversité, le référentiel « Un aménagement durable pour Paris» ou encore « Le cahier des recommandations environnementales ». Paris étant une ville très densément construite (seuls 10 % de son territoire font l'objet de travaux de rénovation urbaine), les actions pour une ville plus durable se feront majoritairement sur l'existant. D'ailleurs, un objectif ambitieux spécifique aux bâtiments existants a été formulé dans le Plan Climat : atteindre au minimum 80 kWh/m²/an pour toutes les rénovations lourdes.

Pour mettre en œuvre ces objectifs pluriels, la ville de Paris est en quête de nouveaux outils permettant de mesurer dans l'aménagement urbain, l'incidence de choix architecturaux et techniques sur l'environnement et ce, dès la phase de conception. Cependant, plus qu'évaluer un projet une fois finalisé, il s'agit désormais de développer des outils permettant d'identifier en amont les impacts du projet sur l'environnement. Ces outils devront ainsi être capables d'orienter les maîtres d'ouvrage dans leurs décisions successives, depuis l'émergence du projet jusqu'à sa mise en exploitation.

## Objectifs et méthode

Cette étude ayant été réalisée dans le cadre d'un partenariat de recherche entre la Ville de Paris, l'Ecole des Ingénieurs de la Ville de Paris (EIVP), la Chaire « Ecoconception des ensembles bâtis et des infrastructures » animée par le Centre Energétique et Procédés de MINES Paristech et Vinci Construction France, nous avons utilisé le logiciel d'ACV EQUER mis au point par ces deux derniers organismes. EQUER permet de représenter l'ACV d'un

bâtiment à travers 12 indicateurs d'impact environnemental et d'utilisation des ressources naturelles. Ces indicateurs sont calculés à chacune des phases du cycle de vie d'un bâtiment, c'est-à-dire dans les phases de construction, d'utilisation, de rénovation et de démolition. L'objectif est, d'une part, de comparer les performances environnementales des bâtiments résidentiels parisiens existants et, d'autre part, d'étudier l'amélioration du bilan environnemental résultant d'éventuels travaux de rénovation sur un immeuble caractéristique du début des années 1970.

A partir de l'étude de l'Atelier Parisien d'Urbanisme (APUR), réalisée en 2007, sur les consommations d'énergie et les émissions de gaz à effet de serre liées au chauffage des résidences principales parisiennes, quatre typologies de bâtiments ont été sélectionnées, représentatives des périodes suivantes : 1851-1914, 1918-1939, 1945-1967, et 1968-1974. Ces typologies ont été établies en fonction de la date de construction des bâtiments et de leurs caractéristiques thermiques. A chaque période de construction correspondent des matériaux spécifiques, des modes de conception et de construction, qui ont parfois été contraints par des politiques urbaines ou des réglementations. Les bâtiments types des différentes périodes ont été modélisés par l'APUR, afin de simuler le comportement thermique de ces bâtiments (avec les logiciels ALCYONE et COMFIE). Afin d'être les plus représentatifs possibles, les bâtiments modélisés sont des cas virtuels inspirés de bâtiments existants : chaque bâtiment est intégré à un environnement réel (orientation, masques solaires), les plans sont ceux du bâtiment existant mais les matériaux et équipements sont choisis pour représenter au mieux l'ensemble des bâtiments parisiens de cette période. L'ACV de ces quatre bâtiments types a pris en compte les phases utilisation, rénovation et démolition. Les bâtiments étudiés ayant été construits depuis plus de trente ans, nous n'avons pas intégré à notre calcul la phase construction, sur laquelle on ne peut plus agir.

Pour étudier le coût environnemental de travaux de rénovation, nous avons comparé l'ACV de différents scénarii de rénovation énergétique à l'ACV du bâtiment dit « Curial » représentatif de la période 1967-1974. A partir des données obtenues, nous avons calculé le temps de retour environnemental associé à chaque indicateur d'ACV pour les différents scénarii. Celui-ci correspond au temps nécessaire pour compenser l'impact environnemental de la rénovation. L'intérêt environnemental des travaux de rénovation énergétique peut ainsi être exprimé par le pourcentage de gain obtenu pour chaque indicateur par rapport au bâtiment avant rénovation.

## ACV des bâtiments parisiens construits entre 1851 et 1974

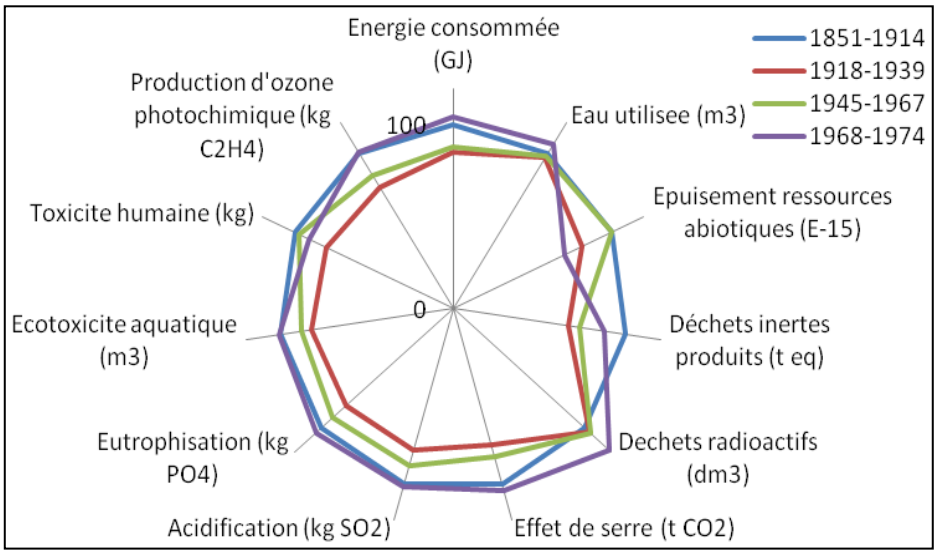
Nous avons considéré que tous les bâtiments étudiés étaient voués à des usages de logements (rez-de-chaussée compris). Afin de mettre en évidence les impacts environnementaux dus à la réalisation et au fonctionnement des bâtiments, nous avons appliqué le même système de chauffage et d'eau chaude à tous les bâtiments étudiés : une chaudière à gaz ancienne (puissance de 300 kW). Les matériaux de construction des bâtiments types modélisés sont récapitulés dans le tableau n°1 ci-après. Les ACV ont été calculées sur 160 ans, âge des bâtiments de la première période étudiée.

**Tableau 1 :** Caractéristiques variables de la modélisation des 5 types de bâtiments résidentiels

| Période | 1851-1914 | 1918-1939 | 1945-1967 | 1968-1974 |
|---|---|---|---|---|
| Enveloppe | Murs pierre, Plancher terre cuite, Toiture zinc | Murs brique, Plancher à hourdis béton, Toiture zinc | Murs parpaing et béton, Plancher béton, Toiture zinc | Murs béton, Plancher béton, Toiture terrasse |
| Isolation façade | Aucune | Aucune | Aucune | Aucune |
| Isolation plancher bas | Chanvre | Aucune | Aucune | Aucune |
| Isolation toiture | Aucune | Aucune | Aucune | Aucune |
| Ouvertures | Dble vitrage cadre bois | Sple vitrage cadre bois | Dble vitrage cadre PVC | Dble vitrage cadre PVC |
| Ventilation | Naturelle | Naturelle | Naturelle | Naturelle |
| Besoins en chauffage kWh/m²/an | 164 | 114 | 129 | 150 |

Les résultats de l'ACV, présentés sur le diagramme radar (Figure 1), présentent les résultats d'un bâtiment de la période « 1851-1914 » servant ici de référence. Les bâtiments ayant été modélisés avec la même énergie de chauffage, les différences de résultats sont liées au comportement thermique des différentes typologies de bâtiments. Les besoins en énergie pour le chauffage (tableau 1) sont issus de la simulation thermique dynamique des bâtiments types (logiciel COMFIE). Ce sont donc des résultats théoriques et non des consommations réelles. Les valeurs obtenues pour la majorité des indicateurs d'ACV semblent corrélées avec leurs besoins en énergie. L'impact environnemental du bâtiment de type haussmannien (1851-1914) est important comparé aux bâtiments d'après guerre (1945-1974). Dans une étude comparable, B. Peuportier et J.-P Traisnel montraient qu'un bâtiment haussmannien était globalement plus performant qu'un bâtiment des années 1960 et consommait moins pour son chauffage (150 contre 170 kWh/m²/an). Il est donc nécessaire d'être prudent avec l'interprétation des résultats de cette ACV comparative : les résultats peuvent dépendre de la morphologie du bâti et pas seulement de sa structure.

**Figure 1 :** Diagramme radar des résultats de l'ACV comparative des m² de bâtiments résidentiels




## ACV de scénarii de rénovation pour un bâtiment typique de la période 1967-1974

Les scénarii de rénovation, formulés avec l'aide de l'APUR, comprennent l'isolation des façades par l'extérieur avec 10 cm de différents matériaux (polystyrène, laine de verre ou cellulose), l'installation d'une ventilation mécanique contrôlée simple flux hygroréglable, et le remplacement (scénarii S2) ou non (scénarii S1) des menuiseries double-vitrage avec cadre en PVC par des double-vitrages avec cadre en bois. L'unité fonctionnelle retenue pour ces comparaisons est le bâtiment entier, sur une durée de 80 ans. La résistance thermique de ces trois isolants étant quasiment égale, on peut estimer que les travaux apportent des économies d'énergie équivalentes. Les diffé-rences entre les résultats de l'ACV de chaque scénario ne peuvent être expliquées par des variations de consommation énergétique.

**Tableau 2 :** Temps de retour environnemental (Tre en années) et gains environnementaux (en %) liés aux différents scénarii de rénovation

| | S1 LdRoche | | S1 Cellulose | | S1 polyst | | S2 LdRoche | | S2 Cellulose | | S2 polyst | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Energie consommée** | 1,52 | 24% | 1,38 | 24% | 1,96 | 24% | 1,99 | 24% | 2,08 | 24% | 2,46 | 24% |
| **Eau utilisée** | 5,2 | 2% | 4,53 | 2% | 5,31 | 2% | 4,98 | 2% | 5,5 | 2% | 5,55 | 2% |
| **Epuisement ressources abiotiques** | 2,65 | 10% | 2,33 | 10% | 2,53 | 10% | 8,33 | 9% | 8,35 | 9% | 8,39 | 9% |
| **Déchets inertes produits** | 0 | 49% | 0 | 48% | 0,01 | 49% | 0,01 | 48% | 5,6 | 41% | 0,01 | 48% |
| **Déchets radioactifs** | 0,27 | 18% | 0,27 | 18% | 1,64 | 17% | 0,17 | 18% | 0,17 | 18% | 1,55 | 17% |
| **Effet de serre** | 0,74 | 51% | 0,7 | 51% | 0,83 | 51% | 0,61 | 51% | 0,48 | 51% | 0,68 | 51% |
| **Acidification** | 2,49 | 49% | 2,36 | 49% | 2,5 | 49% | 2,66 | 48% | 2,55 | 48% | 2,65 | 48% |
| **Eutrophisation** | 4,51 | 44% | 4,3 | 44% | 4,67 | 44% | 4,77 | 43% | 4,61 | 44% | 4,84 | 44% |
| **Écotoxicité aquatique** | 1,25 | 51% | 1,19 | 50% | 1,18 | 51% | 1,28 | 50% | 1,28 | 50% | 1,27 | 50% |
| **Toxicité humaine** | 2,63 | 48% | 2,54 | 48% | 3,43 | 47% | 2,92 | 47% | 2,99 | 47% | 3,53 | 47% |
| **Production d'ozone photochimique** | 4,31 | 46% | 4,11 | 46% | 4,43 | 46% | 4,3 | 46% | 4,29 | 46% | 4,61 | 45% |

Les résultats des ACV ne montrent que peu de différences entre les scénarii. Le calcul du temps de retour environnemental (Tableau 2) montre un amortissement rapide du coût environnemental des travaux pour l'ensemble des scénarii S1 d'isolation (Tre ≤ 5,31 ans), et légèrement plus long pour les scenarii S2 combinant isolation et remplacement des vitrages (Tre ≤ 5,6 ans sauf pour l'indicateur épuisement des ressources abiotiques où Tre ≈ 8,3 ans). Le calcul du gain environnemental dû à la rénovation (tableau 2) montre également que le changement des double-vitrages avec cadre en PVC par des double-vitrages avec cadre en bois a peu d'influence sur le bilan environnemental global.

## Conclusion

L'ACV semble être un outil pertinent pour aider un maître d'ouvrage à prendre des décisions dans le cadre d'un projet de rénovation de bâtiments. Toutefois, il serait utile d'affiner certaines données concernant le bâti ancien, en particulier les propriétés physiques des matériaux, les ponts thermiques et les infiltrations d'air. En matière de choix de scénarii de rénovation, l'ACV serait probablement plus explicite si les scénarii étudiés étaient plus contrastés (variation des hauteurs des bâtiments plus importante, modes de construction différents,…). Enfin, l'ACV étant un outil de modélisation, il ne peut être utilisé que comme un élément d'aide à la décision parmi d'autres.

## Bibliographie

[1] Atelier Parisien d'Urbanisme
Consommations d'énergie et émissions de gaz à effet de serre liées au chauffage des résidences principales parisiennes
*Décembre 2007*

[2] Peuportier B., Traisnel J.-P.
Analyse comparative de morphologies urbaines par simulation du cycle de vie du bâtiment et de la voirie
*2ème Conférence Internationale sur l'aide à la décision dans le domaine du génie civil et urbain, Lyon novembre 2000*

**Commissariat général au développement durable**
Direction de la recherche et de l'innovation
Tour Voltaire
92055 La Défense cedex
Tél : 01.40.81.21.22

Retrouver cette publication sur le site :
http://www.developpement-durable.gouv.fr/developpement-durable/

# Modélisation urbaine : de la représentation au projet

## Résumé

Quelque deux cents chercheurs et acteurs du projet urbain se sont réunis les 23 et 24 février 2011 à l'École des Ponts ParisTech, pour établir, dans le cadre d'un colloque intitulé « La modélisation de la ville : du modèle au projet urbain », un premier bilan des connaissances et des pratiques scientifiques françaises dans le domaine de la modélisation de la ville.

Les exposés relatifs à l'état de l'art, les présentations de recherches en cours et les réactions de « grands témoins » ont nourri des discussions fécondes entre les participants. Cet événement, qui a mobilisé les représentants d'un large spectre de disciplines (sciences de l'environnement, géographie, ingénierie de la construction, urbanisme, sociologie, économie), a constitué l'acte fondateur d'un groupement d'intérêt scientifique (GIS) portant sur la « Modélisation urbaine ».

Ce nouveau GIS entend fédérer des chercheurs et des praticiens autour d'une ambition majeure : inventorier les interrogations et faire converger les réponses aux questions posées, qu'elles émanent des mondes de la recherche, de l'ingénierie, de la maîtrise d'ouvrage ou de la maîtrise d'œuvre, dans le champ de la modélisation urbaine, depuis la conception des villes jusqu'à leur exploitation.

Le présent ouvrage restitue les éléments les plus saillants des interventions et des échanges qui ont marqué le colloque de 2011, synthétisant et interrogeant les acquis constatés, les besoins recensés et les perspectives ouvertes en matière de modélisation, à des fins de planification, de conception, de construction et de gestion de la ville.

Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

Ministère
de l'Écologie,
du Développement
durable
et de l'Énergie

Dépôt légal : septembre 2012
ISSN : 2102-474X

Direction de la recherche et de l'innovation
www.developpement-durable.gouv.fr