



HAL
open science

Modéliser la ville. Formes urbaines et politiques de transport

Jean-Philippe Antoni, Catherine Morency, Aurore Cambien, Gilles Vuidel, Dany Nguyen-Luong, Jean-Pierre Nicolas, Vincent Piron, Jean Delons, Alain Bonnafous, Yves Crozet, et al.

► **To cite this version:**

Jean-Philippe Antoni, Catherine Morency, Aurore Cambien, Gilles Vuidel, Dany Nguyen-Luong, et al. (Dir.). Modéliser la ville. Formes urbaines et politiques de transport. Jean-Philippe Antoni. *Economica*, 438 p., 2011, Méthodes et Approches, Gérard Brun, 978-2-7178-5971-3. halshs-00860300

HAL Id: halshs-00860300

<https://shs.hal.science/halshs-00860300v1>

Submitted on 23 May 2018

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Pour de nombreux acteurs, impliqués professionnellement ou politiquement dans les problématiques de la ville et de son aménagement, il est devenu clair que la planification de l'urbanisation ne peut être déconnectée des politiques de transport : elles interagissent l'une sur l'autre et doivent être considérées ensemble, ce qui nécessite de les formaliser sous la forme d'un système. Dans ce contexte, c'est véritablement à la question de la modélisation du système-ville, envisagé à travers sa forme et ses politiques de transport, que cet ouvrage souhaite apporter une contribution : celle de la recherche française actuelle dans ce domaine.

L'ouvrage présente douze modèles de la ville, issus du monde de la recherche académique, de bureaux d'études ou d'organismes privés impliqués dans les questions d'aménagement du territoire, regroupés en deux parties. La première présente une série de modèles qui prennent en compte de manière combinée la question des déplacements quotidiens et des localisations résidentielles et d'entreprises, selon des échelles et des temporalités différentes, dans une philosophie qui peut s'assimiler à celle des modèles LUTI (*Land-Use and Transportation Integrated models*), dont ils offrent une adaptation au cas français sur plusieurs terrains d'étude. La deuxième partie regroupe des modèles fondés sur l'analyse des transports et de l'urbanisation : ils prennent en compte les interactions de ces deux dynamiques, mais se distinguent par une approche centrée sur des questions plus particulières, souvent innovantes, parfois très théoriques, qui offrent autant d'ouvertures pour de nombreux développements futurs. Ainsi, chacun de ces modèles s'attache à la question des mobilités ou de l'évolution de l'occupation du sol en ouvrant de nouvelles voies, tant sur le plan formel, que sur celui des thématiques qu'ils explorent et de leurs implications en matière d'aide à la décision pour la planification urbaine et les politiques de transport.

Les questionnements auxquels cet ouvrage tente de faire face, les méthodes qu'il apporte à la simulation de processus complexes, les résultats prometteurs qui s'y esquissent, les domaines nouveaux qui y sont explorés, tant d'un point de vue pratique que théorique, montrent que la recherche ouvre des voies et des chemins qui se croisent et permettent de mieux considérer la question de l'urbanisation et des politiques de transports qui s'y associent, proposant des solutions pour envisager plus concrètement la mise en place d'un développement durable des territoires et des systèmes urbains.

*
**

Jean-Philippe Antoni, docteur en géographie, est maître de conférences en aménagement de l'espace et en urbanisme. Ses principaux travaux concernent l'étude et la qualification des espaces urbains, tant sur le plan de leur forme que sur celui des mobilités quotidiennes et résidentielles qu'ils engendrent.



9 782717 859713

ISBN 978-2-7178-5971-3

49 €

Sous la direction de
Jean-Philippe ANTONI

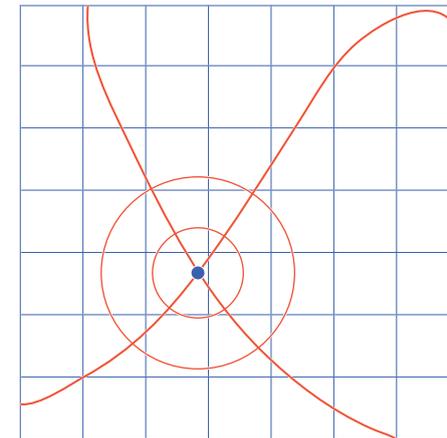
MODÉLISER LA VILLE

Collection « Méthodes et Approches »
dirigée par Gérard Brun

MODÉLISER LA VILLE

Formes urbaines et politiques de transport

Sous la direction de
Jean-Philippe ANTONI



ECONOMICA



MODÉLISER LA VILLE



Collection “Méthodes et Approches”
dirigée par Gérard BRUN

Cette collection axée sur la recherche en transport et en urbanisme a pour ambition de publier des ouvrages contribuant à un renouveau conceptuel dans le domaine des sciences humaines, par le recours à des méthodes nouvelles et à des approches transversales.

Ouvrages déjà parus :

L'environnement dans la décision publique – Refonder l'évaluation socio-économique pour des politiques de transport plus durables,
CHANEL Olivier et FABUREL Guillaume (sous la direction de)

Le calcul économique dans le processus de choix collectif des investissements de transport, MAURICE Joël et CROZET Yves (sous la direction de)



Collection « Méthodes et Approches »
dirigée par Gérard Brun

MODÉLISER LA VILLE

Formes urbaines et politiques de transport

Sous la direction de
Jean-Philippe ANTONI

*Ouvrage publié avec le soutien de la Direction de la recherche et de l'innovation
(service de la recherche) du Commissariat général au développement durable
(ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de la Mer),
en liaison avec le Programme de recherche et d'innovation dans les transports
terrestres – PREDIT 4*

 **ECONOMICA**

49, rue Héricart, 75015 Paris





REMERCIEMENTS

L'ensemble des auteurs tient à remercier les doctorants du laboratoire Théma (Besançon) pour leur dernière lecture des textes, et particulièrement Marion Lamiral pour la mise en page et la composition des figures.

© Ed. ECONOMICA, 2011

Tous droits de reproduction, de traduction, d'adaptation et d'exécution réservés pour tous les pays.



SOMMAIRE

Préface	VII
Catherine Morency	
Introduction	
Des éclairages pour modéliser la ville	1

Première partie

De la modélisation à la simulation urbanisation/transport

Introduction.....	15
Chapitre 1	
La modélisation urbaine : une approche historique	19
Aurore Cambien	
Chapitre 2	
MOBISIM : un modèle multi-agents et multi-scalaire pour simuler les mobilités urbaines	50
Jean-Philippe Antoni et Gilles Vuidel	
Chapitre 3	
SIMAUURIF : un modèle dynamique de simulation de l'interAction transport-Urbanisation en région Ile-de-France	78
Dany Nguyen-Luong	
Chapitre 4	
SIMBAD : un outil pour intégrer le développement durable dans les politiques publiques	119
Jean-Pierre Nicolas	
Chapitre 5	
PIRANDELLO® : un modèle d'équilibre urbain	165
Vincent Piron et Jean Delons	
Chapitre 6	
MOSART et le projet PLAINSSUD : une plate-forme de modélisation et de simulation de l'accessibilité pour l'aide à la décision et l'aménagement du territoire	186
Alain Bonnafous, Yves Crozet, Aurélie Mercier, Nicolas Ovtracht, Pierre-Yves Péguy et Florence Puech	

Deuxième partie
**Comprendre les mobilités urbaines
et anticiper une urbanisation durable**

Introduction.....	213
Chapitre 7 MIRO : des trajectoires individuelles à la ville en mouvement	216
Arnaud Banos, Anabelle Boffet-Mas, Sonia Chardonnel, Christophe Lang, Nicolas Marilleau et Thomas Thévenin	
Chapitre 8 FRETURB : simuler la logistique urbaine	246
Jean-Louis Routhier et Florence Toilier	
Chapitre 9 CWS : un modèle prospectif des dynamiques spatiales et de l'étalement urbain	284
Jean-Philippe Antoni, Joanne Hirtzel et Pauline Joannès	
Chapitre 10 MUP-CITY : une approche multi-échelle pour un développement résidentiel des nouveaux espaces urbains	306
Pierre Frankhauser, Cécile Tannier, Gilles Vuidel et Hélène Houot	
Chapitre 11 ILOT : un modèle multi-agents de structuration sociale de la ville	333
Remi Lemoy, Charles Raux et Pablo Jensen	
Chapitre 12 S-GHOST : un modèle d'auto-organisation de l'étalement urbain et du réseau de transport	365
Geoffrey Caruso, Jean Cavaillès, Pierre Frankhauser, Dominique Peeters, Isabelle Thomas et Gilles Vuidel	
Chapitre 13 DYNACITÉ : simulation des jeux d'acteurs par la dynamique des systèmes	392
Valérie Gacogne	
Conclusion générale Des modèles pour éclairer l'action	423
Postface Gérard Brun	431
Glossaire	435

PRÉFACE

Catherine Morency

École polytechnique de Montréal

1. DU BON USAGE DE LA MODÉLISATION

Quiconque prend le temps de s'observer un peu dans son quotidien, parfois aléatoire parfois réglé au quart de tour, et dans ses décisions, spontanées ou planifiées, à court, moyen et long termes, réalise toute la complexité des comportements individuels et collectifs qui doivent être pris en compte lors de la modélisation des acteurs et composants d'une société, qui interagissent au sein d'un système urbain, soumis à de multiples fluctuations contextuelles. Nous sommes bien loin d'un laboratoire expérimental où chaque élément est minutieusement dosé et où l'environnement est strictement contrôlé. Pourtant, les attentes et besoins de compréhension sont similaires voire plus critiques lorsqu'il s'agit de comprendre les interactions entre urbanisation et transport, les impacts des décisions affectant l'un ou l'autre, et leurs conséquences sur l'environnement, l'économie ou la société.

Historiquement de grossières simplifications de la réalité, les modèles comportementaux, grâce aux avancées conceptuelles et technologiques, s'approchent de plus en plus de la complexité réelle du monde urbain. D'ailleurs, cet ouvrage est un des témoignages de l'évolution importante qui s'est opérée dans le domaine de la modélisation des interactions urbanisation-transport. Il confirme le rôle et la richesse pragmatique des groupes de R&D de la francophonie européenne qui bénéficient d'un soutien efficace du gouvernement. Vu de l'autre côté de l'Atlantique, cet ouvrage apparaît comme le premier condensé des expériences les plus déterminantes menées en modélisation transport-urbanisation par le milieu de la recherche francophone.

2. UNE ADÉQUATION CONCEPTUELLE ASSURÉE ENTRE MODÈLE ET RÉALITÉ

Malgré la venue plus tardive des modèles intégrés dans la culture franco-européenne, les modèles et applications décrites dans cet

VIII / Modéliser la ville - Formes urbaines et politiques de transport

ouvrage sont tout à fait en phase avec l'état de la pratique et de la recherche en Amérique du Nord. On n'a qu'à penser aux outils comme TRANUS, IMULATE ou URBANSIM – outils qui sont parfois eux-mêmes partie intégrante des applications décrites dans cet ouvrage –, à leur cadre conceptuel et aux mécanismes inhérents pour réaliser les similitudes. Et ils découlent des mêmes enjeux collectifs, directement liés à la prise de conscience officielle de mieux assurer la durabilité et la cohérence des décisions prises en milieu urbain, tant en matière d'urbanisation que de transport.

Par ailleurs, le passage de modèles agrégés aux modèles basés sur les objets déterminants (l'individu, le ménage, le véhicule, la cellule) se traduit par une meilleure adéquation entre le monde réel, tel que perçu par les techniciens ou décideurs, ainsi que des capacités de simulation nettement améliorées. Ce cadre conceptuel se porte aussi très bien à l'abandon de différentes hypothèses simplificatrices, omniprésentes dans les approches agrégées et la procédure séquentielle classique. Malgré la complexité supérieure des calculs et processus qui permettent de simuler des scénarios, le tout semble néanmoins plus transparent, de par la logique des agents impliqués, et donc plus facilement accepté par les preneurs de décisions.

3. DES CONTRIBUTIONS PRAGMATIQUES ET PERTINENTES

Aujourd'hui, et ce de part et d'autre de l'Atlantique, la nécessité de confirmer la durabilité des projets urbains est déterminante dans le développement des modèles transport-urbanisation et dans leur opérationnalisation pour répondre à des demandes criantes d'accompagnement du processus de prise de décision. Tant pour assurer le développement des plans de transport, des plans stratégiques de développement des réseaux de transport en commun ou pour répondre aux nouvelles obligations amenées par les différentes lois obligeant l'évaluation des contributions des projets ou politiques au développement durable, la modélisation des interactions urbaines devient un incontournable. Cet ouvrage exemplifie d'ailleurs très bien la fusion essentielle entre les mondes de la recherche et de la gestion opérationnelle urbaine ; on y trouve en effet différents témoignages des contributions pragmatiques des modèles récents à une meilleure compréhension des incidences des décisions urbaines, contributions qui s'expriment surtout en capacités nouvelles de simuler des scénarios pour mieux comprendre les avenir possibles qui se développeront suite aux interventions choisies.

Les modèles agissent comme des outils qui accompagnent la décision. Ils permettent en effet d'entrevoir là où certains choix peuvent mener, à la lumière des interactions que nous arrivons à cerner aujourd'hui. C'est sans doute là le principal rôle des modèles : faire en sorte que le processus de décision soit moins impressionniste et lié aux acteurs du moment.

4. UN SOUTIEN JUDICIEUX DE L'ÉTAT

Autre fait saillant de cet ouvrage : son soutien évident de l'Etat. Une confirmation que la R&D a une valeur éminemment opérationnelle, un tant soit peu on la laisse s'émanciper en toute liberté avant d'en attendre des applications concrètes. On y voit aussi une collaboration essentielle et souhaitée des acteurs du milieu, qui témoigne du rôle fondamental des groupes de recherche. D'un côté, des acteurs trop souvent interpellés d'urgence pour répondre à des requêtes pressantes et qui n'ont d'autre choix que d'appliquer des modèles déjà rodés ou des outils parfois mal adaptés. De l'autre côté, des chercheurs et développeurs qui s'activent à enrichir les processus de modélisation, à raffiner les modèles conceptuels, à traduire les informations en nouvelles connaissances. Entre les deux, un lien essentiel à assurer, une collaboration dont chacun des acteurs retire des bénéfices, le tout chapeauté par des actions de soutien.

5. DES ORIENTATIONS ET UN RÔLE UNIVERSEL ÉVIDENT

Cet ouvrage laisse penser que la recherche française se porte bien, qu'un bassin intéressant et diversifié de chercheurs s'active à mieux outiller le processus de décisions liées au transport et à l'urbanisation. Les contributions sont multiples : une visée générale de mieux appréhender les interactions entre transport et urbanisation qui se traduit par de multiples outils, chacun ayant ses particularités (individu-centré, modélisation désagrégée, multi-agents, etc.) et ses applications particulières (évaluation socio-économique, indicateurs de développement durable, attractivité résidentielle, etc.). On s'attend à de plus nombreuses applications concrètes des modèles agents, des démonstrations de simulations basées sur des automates cellulaires et toute autre approche basée sur des objets discrets. On s'attend aussi à une disparition progressive du recours aux approches agrégées, derniers legs des années 1960, malgré la complexité qui en découle et les besoins en données. En conséquence, il est fort probable que la

X / Modéliser la ville - Formes urbaines et politiques de transport

demande en information fine, en microdonnées de toutes sortes, augmente et devient essentielle pour assurer le calage pertinent des modèles fins à la réalité. Il se pourrait aussi que le déploiement tous azimuts des modèles intégrés dans toutes les agglomérations exige des réflexions sur la transférabilité spatiale et temporelle des modèles, dans une démarche de démocratisation des outils, ainsi que sur les standards nationaux à respecter. Ceci assurera la possibilité de rehausser la réflexion quant à l'avenir de la société à un stade plus national et d'évaluer les impacts globaux des décisions, projets et politiques, voire même de faire des arbitrages à ce niveau.

Pour le moment, les besoins sont grands et les acteurs du milieu sont prêts à collaborer pour assurer des mondes urbains plus compatibles avec les nouveaux enjeux de développement durable. Tout est en place pour assurer des contributions importantes et assumer un rôle local et universel dans le domaine.

INTRODUCTION

DES ÉCLAIRAGES POUR MODÉLISER LA VILLE

La notion de développement durable, les nouveaux principes de l'urbanisme et de la gestion des territoires urbains, initiés en France par la loi SRU¹, la LOADDT² ou les Plans de prévention des risques, insistent tous sur l'idée de projet. Se projeter dans l'avenir, imaginer nos villes dans le futur, est devenu un préalable nécessaire à la planification et à l'aménagement des territoires : c'est en connaissant ce vers quoi l'on veut tendre demain que l'on peut aujourd'hui prévoir, réglementer et expérimenter de nouvelles solutions. Cependant, l'exercice n'est pas facile. Il est très délicat de tenter une prévision du futur, et de nombreuses expériences, de nombreux échecs dans les projets architecturaux et les politiques de la ville ou du transport, montrent que, souvent, le simple prolongement d'une tendance ne fournit qu'une extrapolation médiocre des processus à l'œuvre, déconnectée des réalités du terrain et des objectifs de départ.

Pour dépasser ce stade, la recherche urbaine tente aujourd'hui d'intégrer une complexité de plus en plus grande pour qualifier les processus qui se croisent au sein des milieux urbains, et qui en composent la dynamique ; elle s'efforce de ne pas raisonner dans un cadre absolu, mais de réfléchir en termes de scénarios, souvent contrastés, afin de brasser un panel plus large de devenirs possibles, et de vérifier l'adage désormais célèbre du philosophe M. Blondel : « l'avenir ne se prévoit pas, il se prépare ».

La mise en œuvre d'une telle démarche, fondée sur la prospective et encore relativement neuve en urbanisme et dans l'ingénierie des transports, nécessite l'utilisation d'outils adaptés, afin de prendre en compte, de gérer et d'analyser la complexité et l'enchevêtrement des

1. La loi SRU (Solidarité et renouvellement urbain), adoptée en 2000, apparaît comme la modification la plus récente et la plus significative en ce qui concerne le droit et les pratiques de l'urbanisme.

2. La LOADDT (Loi d'orientation pour l'aménagement et le développement durable du territoire), adoptée en 1999, présente des objectifs et des concepts renouvelés en ce qui concerne la démocratie participative et le développement durable.

dynamiques urbaines, avant de les projeter dans le futur. Parmi ces outils, la modélisation offre aujourd'hui des perspectives importantes pour l'aide à la décision.

En urbanisme, en aménagement ou en transport, la modélisation consiste en effet souvent à simplifier la réalité du monde, de manière à mieux comprendre comment les décisions et les événements y interagissent les uns avec les autres. Elle permet alors également de les reproduire ou de les modifier *in vitro*, afin de tester des solutions qui permettraient d'influencer ou d'orienter leurs conséquences, de décider à l'avance des politiques et des stratégies qui peuvent conduire à un futur souhaitable. La modélisation tente d'offrir une réponse à des questions du type : « que se passerait-il si je faisais cela ? » ou bien « que deviendrait ceci si je faisais cela » ? L'ensemble des démarches et des modèles proposés dans cet ouvrage reprennent et adaptent cette idée de départ, en l'appliquant spécifiquement à une question, à un cas particulier ou à une ville spécifique. Tous visent à mieux prendre en compte les objectifs du développement durable, et à proposer des solutions viables, à long terme, pour l'urbanisme et le transport urbain.

1. LE DÉVELOPPEMENT URBAIN DURABLE

Omniprésente, parfois à l'origine même des modèles rassemblés dans ces pages, l'idée de développement durable part du principe très général que la conquête humaine du monde, l'urbanisation et la multiplication des déplacements en particulier, peut devenir une menace pour la nature et pour l'homme lui-même, résultant souvent de l'ignorance qu'il a des conséquences de ses actions. Dans le rapport fondateur de G.H. Brundtland (1987), on lit que « le développement durable est le développement qui satisfait les besoins de la génération actuelle sans priver les générations futures de satisfaire leurs propres besoins ». Partant de cette base, l'ICLEI (*International Council for Local Environmental Initiatives*) a rapidement proposé une définition plus pratique et plus applicable, en définissant le développement durable comme celui « qui procure des services économiques, sociaux et environnementaux fondamentaux à tous les habitants d'une commune sans compromettre la viabilité des systèmes naturels, immobiliers et sociaux dont dépend la fourniture des services ».

Polyvalent, presque universel, l'objectif consiste ainsi à mettre en garde contre des conséquences que nous ne connaissons pas. Il s'appuie sur trois sphères interconnectées : le développement économique qui organise la production des richesses et crée les conditions de la prospérité, la cohésion sociale établie sur une répartition équitable

des richesses produites, et la protection de l'environnement qui permet de ménager les ressources dont nous disposons afin d'assurer leur pérennité. Dans ce contexte, deux axes se répondent, dans l'espace et dans le temps : il s'agit à la fois d'articuler le local (échelle de la ville ou de la région) avec le global (échelle du monde), et le court terme (politiques immédiates et modes de vie quotidiens) avec le long terme (évaluation des conséquences et poursuite d'objectifs souhaitables), afin de mieux anticiper et d'innover dans des domaines très diversifiés : l'efficacité économique, la solidarité sociale et territoriale, les effets de l'urbanisation et de la vitesse, la production et la consommation énergétiques, la gestion des ressources, la protection du climat, etc.

Au niveau français, la Commission française de développement durable (créée en 2003), qui a fait le lien entre les orientations correspondant aux objectifs pris dans les conférences internationales et les acteurs territoriaux locaux, a dès lors proposé une définition de la « ville durable » : celle « dont les habitants disposent des moyens d'agir pour qu'elle soit organisée et fonctionne dans des conditions politiques, institutionnelles, sociales et culturelles satisfaisantes pour eux et équitables pour tous ; dont le fonctionnement et la dynamique satisfont à des objectifs de sécurité, des conditions biologiques de vie, de qualité des milieux et de limitation des consommations de ressources ; qui ne compromet ni le renouvellement des ressources naturelles alentours, ni le fonctionnement, les relations et la dynamique des écosystèmes microrégionaux englobant, ni enfin les grands équilibres régionaux et planétaires indispensables au développement durable des autres communautés ; et qui s'attache à préserver les capacités de vie et les potentialités de choix des générations futures ».

Toutefois, si ces grandes lignes ont été débattues, parfois avec controverse, au niveau international durant les conférences de Rio (1992), d'Aalborg (1994) ou plus récemment de Copenhague (2009), elles posent aujourd'hui souvent plus de questions qu'elles n'apportent de réponse aux acteurs qui se préoccupent pratiquement du niveau local, en particulier quand il s'agit d'aménager ou de construire une politique de transport cohérente. Dans l'espace, le développement durable n'apparaît véritablement que comme consigne, une idée livrée sans mode d'emploi, qui ne se traduit pas directement dans la pratique, et que l'on peut encore interpréter et manipuler à souhait (Le Goff, 2009). Dans le temps, le développement durable demande d'évaluer les conséquences lointaines des tactiques d'aujourd'hui, et donc de connaître le futur : un jeu d'incertitudes, un pari qui contribue à complexifier sa prise en compte dans les politiques concrètes de l'urbanisme et des transports, et rendent son intégration très délicate.

La prise en compte du développement durable dans les politiques urbaines apparaît donc comme une totalité, mais également comme une gageure, un défi qu'il est difficile de relever sans opérer avec prudence et transversalité : elle oblige à solliciter de nombreuses compétences, réparties dans des champs disciplinaires distincts (économie, sociologie, ingénierie, géographie, etc.), à dépasser leurs logiques sectorielles, parfois complexes, voire discutées par chaque spécialité. Il ne s'agit donc plus d'étudier les villes et les aires urbaines morceau par morceau (le centre historique, les banlieues, les expansions périurbaines, les espaces « néo-ruraux », etc.), ni thème par thème (l'urbanisation, le transport, la mixité et la cohésion, les impacts environnementaux, etc.), indépendamment les uns des autres. Il s'agit au contraire de « traverser » ces ensembles de manière transversale, au sein d'un cadre conceptuel et d'une définition renouvelés de la ville, que les théories de la complexité et des systèmes permettent d'explorer.

2. COMPLEXITÉ, SYSTÈME-VILLE ET ÉMERGENCE

Il n'est pas facile de définir ce qu'est une ville, notamment dans le contexte actuel d'étalement et de dilution des espaces urbains dans les anciens paysages de la ruralité. On peut toutefois faire la proposition suivante : une agglomération importante dont le fonctionnement organique révèle un milieu géographique et social particulier, basé sur des économies d'agglomération permettant l'émergence de fonctions spécifiques et rares. La ville ne se distingue donc pas uniquement par sa taille, mais également par la nature des fonctions qui s'y développent, la complexité des relations qui s'y nouent, qui « émergent », en quelque sorte, du fonctionnement de l'ensemble. Pour les prendre en compte, l'approche systémique proposée par L. von Bertalanffy (1968) apparaît pertinente : elle rend mieux compte de la complexité des villes et de leur auto-organisation (Pumain *et al.*, 1989). Dès lors, la ville s'assimile à un système urbain, un système-ville dont le fonctionnement complexe, si on veut le comprendre en totalité, échappe à l'analyse sectorielle.

Face aux objectifs transversaux du développement durable, l'approche analytique et sectorielle à partir de laquelle les villes ont longtemps été étudiées et décomposées en autant de champs que possible (économie, habitat, transport, etc.), nécessairement réductionniste, montre d'importantes limites. Pour comprendre le fonctionnement d'une machine à vapeur, on peut en effet s'intéresser d'abord à l'étude de la production thermique, puis à celle des pistons qui permettent d'actionner la machine : leur étude séparée apparaît

plus simple de prime abord. Mais, dans le cas des villes, cette dissociation en parties distinctes et indépendantes ne nuit-elle pas à la compréhension du fonctionnement de l'ensemble ? N'est-ce pas justement en intervenant sur les transports que l'on modifie l'habitat ? Et en intervenant sur l'économie que l'on modifie les transports ? Face à cette possibilité, il importe avant tout d'identifier et de qualifier les relations qui existent entre chacun des champs, des processus et des dynamiques qui composent la ville, et qui, en un tout, déterminent son fonctionnement.

La systémique contribue aujourd'hui à une autre vision des choses, considérant l'espace urbain comme un système ou un ensemble de systèmes emboîtés les uns dans les autres, orientés dans une finalité commune, quel que soit le niveau de conscience que chaque élément possède de cette finalité (Koestler, 1968). Ainsi, le tout est nécessairement plus que la simple somme de ses parties, la totalité détermine la nature de chaque élément, et les parties ne peuvent être comprises si on les considère isolément : elles sont dynamiquement reliées entre elles dans une interaction et une interdépendance permanentes (Fondi, 1986). Quoique mal définie, les notions d'« urbanisme intégré » ou de « projet urbain », voire de gouvernance dans la gestion des problématiques urbaines, vont toutes dans le même sens : considérer la ville comme une totalité mue par des relations complexes, dont les éléments, les champs d'action et les acteurs ne sont pas indissociables les uns des autres, mais demandent à être étudiés et entendus de manière croisée et participative.

Parallèlement à la théorie des systèmes, l'idée d'émergence apparaît ici également comme l'une des notions les plus intéressantes que propose la théorie de la complexité. L'émergence apparaît quand les interactions entre des objets ou des éléments à un niveau influencent d'autres objets ou d'autres éléments à un autre niveau. Plus précisément, un phénomène est émergent s'il faut créer une nouvelle catégorie pour le décrire, catégorie qui n'est pas nécessaire pour caractériser les comportements des objets qui ont mené à son émergence. Par exemple, la température émerge du mouvement des atomes, qui, considérés individuellement, n'en ont pas. Au sein des systèmes urbains, les processus émergents ne sont pas toujours immédiatement visibles, mais peuvent expliquer une partie de ce qui n'est pas prévu ou pas compris, et révèlent parfois des effets contre-intuitifs : les paradoxes de Dows-Thompson et de Braess, par exemple, montrent que l'extension de certains réseaux routiers ne contribue pas toujours à fluidifier le trafic, mais apparaît contre-productivement comme une source possible de coût et de congestion.

En s'appuyant sur le cadre conceptuel qu'offre la systémique et la théorie de la complexité, il devient possible de mieux formaliser les liens qui existent entre les processus et les dynamiques urbaines, et de les caractériser par une série d'interactions et de rétroactions. C'est alors l'occasion de revisiter ce que l'on a longuement considéré comme autant de cercles vicieux, ou vertueux ; celui de M. Halbwachs (1928), par exemple, mis en exergue au début du 20^e siècle, à propos de l'explosion démographique et spatiale des villes industrielles du 19^e siècle : les résidents viennent s'agglomérer sur les rives des fleuves urbains en voie de constitution pendant que cet afflux pousse lui-même à l'élargissement des voies de communication et à l'intensification des débits. Cette interdépendance, qui constitue en fait une boucle de rétroaction positive entre les déplacements et l'urbanisation, pose la question de la formalisation des liens qui existent entre les mobilités urbaines, quotidiennes quand elles concernent le transport, résidentielles et économiques quand elles concernent l'urbanisation et l'étalement urbain.

3. PROBLÉMATIQUE DES MOBILITÉS URBAINES (TRANSPORT ET URBANISATION)

Pour de nombreux acteurs, impliqués professionnellement ou politiquement dans les problématiques de la ville et de son aménagement, il est devenu clair, depuis les années 1990, que la planification de l'urbanisation ne peut être déconnectée des politiques de transport : elles interagissent l'une sur l'autre et doivent être considérées ensemble, ce qui nécessite de les formaliser sous la forme d'un système. Au sein de ce système, l'identification des liens, des interactions et des rétroactions, constitue un problème largement étudié, à l'échelle internationale, par les modèles LUTI (*Land-Use Transport Interaction*), auxquels de nombreux auteurs de cet ouvrage font référence, et auxquels plusieurs modèles présentés ici peuvent s'assimiler.

Nés aux Etats-Unis, arrivés plus tardivement en France, les modèles LUTI sont une réponse scientifique désormais classique pour prendre en compte les mobilités quotidiennes et résidentielles d'une aire urbaine. Aujourd'hui mis au point et appliqués dans l'ensemble des pays développés et dans certains pays émergents (on en dénombre pas moins d'une vingtaine dans le monde³), ces modèles proposent tous

3. On peut citer par exemple : URBANSIM (*Microeconomic model of location choice of households and firms* ; Etats-Unis), TRESIS (*Transportation and Environment Strategy Impact*

des approches différentes du même problème, parmi lesquelles M. Wegener (2004) note quelques caractéristiques communes : les modèles LUTI offrent une approche prédictive ou prospective sur le futur des infrastructures de transport et leur utilisation, en lien avec la forme et l'expansion de l'habitat et des activités humaines qui en découlent, et vice-versa ; ils évaluent ces projections au regard des objectifs concrets du développement durable (émissions de polluants, qualité et mixité du voisinage résidentiel, impacts environnementaux, etc.) ; ils vont jouer à l'avenir un rôle croissant dans la concertation et la prise de décision en matière d'investissements économiques, sociaux ou environnementaux. Chacun pose toutefois un certain nombre de questions sur la manière avec laquelle les transports et l'urbanisation doivent être considérés.

Sur le plan des transports, d'abord, la réalité des mobilités quotidiennes ou des déplacements liés au fret commercial apparaît extrêmement complexe, presque impossible à cartographier de manière fine et détaillée. De ce fait, par simplification, de nombreux travaux choisissent de ne traiter que des déplacements les plus contraints, notamment les migrations pendulaires domicile-travail, plus faciles d'accès en termes de données. Mais même dans ce cas, l'approche reste délicate ; elle se confronte à des réseaux de transports aux logiques de fonctionnement et d'utilisation très différentes : l'automobile et les transports en commun ne mènent pas toujours aux mêmes endroits, s'adaptent mieux à certaines exigences individuelles ou familiales qu'à d'autres, n'impliquent pas le même investissement budgétaire ni le même confort, etc. Ce à quoi, pour être le plus complet possible, il faudrait ajouter la marche à pied et la bicyclette, tous deux particuliers quant aux vitesses, aux commodités et aux possibilités de stationnement qu'ils offrent. Concernant les transports de marchandises, enfin, leur distribution s'organise principalement en tournées et s'ordonne selon des contraintes de circulation particulières, des horaires d'ouverture des magasins, des stratégies propres aux chauffeurs, etc.

Sur le plan de l'urbanisation, ensuite, la considération de l'espace géographique des villes pose également une série de questions. Quelle est l'échelle pertinente pour considérer l'ouverture de nouveaux espaces à la construction de quartiers résidentiels ou de zones d'activités ? Faut-il considérer l'ensemble des communes de l'aire urbaine étudiée,

Simulator ; Australie), TRANUS (*Transport and land-use model* ; Venezuela), ILUTE (*Integrated Land Use, Transportation, Environment modelling* ; Canada), STASA (*Master-equation based transport and urban/regional model* ; Allemagne), ITLUP (*Integrated Transportation and Land Use Package* ; Etats-Unis), LILT (*Leeds Integrated Land-Use/Transport model*, Royaume-Uni), MARS (*Metropolitan Activity Relocation Simulator*, Autriche), etc.

ou bien les regrouper en couronnes successives ? *A contrario*, n'est-il pas préférable de distinguer l'urbanisation à un niveau infra-communal (celui du quartier, de l'îlot, du bâtiment), afin de mieux caractériser la structure du bâti et ses aménités, dont on sait qu'elles sont possiblement génératrices de déplacements ? Ici, chaque chapitre de l'ouvrage propose des solutions différentes, appuyées sur des choix justifiés par leur problématique et leur but respectifs. Certains se concentrent sur l'espace communal, qui apparaît comme une unité de référence, alors que d'autres construisent un carroyage et raisonnent dans un espace cellulaire, dont la taille des mailles est très variable. Dans la majorité des cas, les réseaux de communication s'y superposent sous la forme de graphes qui schématisent l'organisation des routes et des voies de transport en commun.

Considérées simultanément, la problématique des transports et celle de l'urbanisation nécessitent donc de faire des choix, qui conditionnent la description formelle du système-ville que chacun aura défini et décidé d'étudier. A partir de cette base, il est alors possible de mobiliser un certain nombre de techniques, de méthodes et d'algorithmes, dont certains apparaissent désormais comme des classiques pour ces problématiques : les modèles de choix discrets permettent de considérer les décisions d'acteurs ou de groupes d'agents, les modèles dits gravitaires simulent les interactions spatiales entre des origines et des destinations de déplacement, souvent selon une logique à quatre étapes (génération et distribution du trafic, choix modal, affectation sur le réseau), l'algorithme de Dijkstra permet de calculer les chemins les plus courts, en distance ou en temps, etc. L'ensemble s'inscrit parfois dans un corpus théorique plus vaste, contraint par l'hypothèse de *l'homo economicus*, de l'équilibre général, de Nash, par l'équation de Wardrop, etc. Autant d'éléments, de possibilités et de solutions qu'il s'agit souvent de juxtaposer ou de combiner dans une logique rigoureuse, afin de répondre aux questions posées par l'interaction transport/urbanisation, et d'évaluer son impact futur dans les trois sphères du développement durable.

4. SIMULATION, MODÉLISATION ET AMÉNAGEMENT URBAIN

On en revient donc à la question de départ : « quel est le résultat que j'obtiens si j'exerce telle action sur un élément ? ». Pour un urbaniste, un aménageur ou un ingénieur, elle consiste à savoir, ou plutôt à prévoir, ce que provoquerait la construction d'une route sur la croissance démographique d'une commune, à considérer l'ouverture de son urbanisation et ses conséquences sur le plan de déplacement, et à

terme, sur sa politique de transport, à anticiper l'impact de ces infrastructures ou de ces développements sur l'économie, et à comprendre comment celle-ci les contraint ou les favorise. Le moyen le plus simple pour le savoir serait bien sûr de tenter l'expérience : construire, urbaniser, observer les conséquences. Mais c'est pratiquement impossible, parce que les opérations d'aménagement se font sur le temps long et apparaissent souvent irréversibles, parce que leur coût est souvent faramineux, parce que ce serait probablement contraire à l'éthique. Une solution crédible consiste alors à recourir à la simulation, c'est-à-dire à la construction d'un modèle qui réagit d'une manière semblable à ce que l'on veut étudier et qui permettra de déduire des résultats.

Dans la grande majorité des cas, les simulations de ce type sont des solutions virtuelles, fondées sur la puissance de calcul des ordinateurs. En sciences sociales, elles se sont d'ailleurs généralisées dans les années 1990, à l'issue de la diffusion importante de machines individuelles performantes. Elles ont alors été influencées par la physique et les mathématiques (théorie des automates cellulaires) ou les sciences informatiques (intelligence artificielle et technologie agents) qui leur ont apporté des concepts, des outils et des méthodes directement applicables. Toutefois, comme le rappellent J.R. Emshoff (1970) ou A. Dauphiné (1987), la simulation est généralement indissociable de la modélisation sur laquelle elle s'appuie, elle n'en est qu'une étape. La démarche complète consiste d'abord à construire un modèle, puis à l'utiliser pour simuler le comportement d'un système, éventuellement à tester la modification de certains paramètres, afin de multiplier les résultats, qui correspondent alors à autant de scénarios liés à l'introduction d'une idée ou d'un processus original au sein du système modélisé. Considérée dans ce sens, la modélisation apparaît véritablement comme une phase à part entière de la démarche scientifique expérimentale (Popper, 1968).

Mais si la simulation doit s'appuyer sur un modèle, qu'est-ce qu'un modèle ? Employé dans de nombreux cas, le mot paraît fortement polysémique et son sens diverge suivant qu'on l'entend dans le langage courant ou dans le langage scientifique. On l'utilise par exemple comme un nom pour désigner une représentation, ou comme un adjectif pour qualifier un degré de perfection, ou encore comme un verbe qui signifie démontrer, ou montrer comment le monde s'organise (Ackoff et al., 1962) ; H. Skilling (1964) conçoit un modèle comme une théorie, comme une sorte de loi, ou encore une hypothèse, voire même une simple idée plus ou moins structurée ; pour d'autres, il apparaît comme une relation ou plus formellement comme une équation, plus ou moins complexes. Les modèles possèdent probablement chacune

de ces propriétés. Dans ce contexte riche et diversifié, la définition la plus générale que l'on puisse en donner, du moins pour qualifier les modèles appliqués à l'urbanisation et au transport que nous présentons ici, se fonde sur celle de P. Haggett (1967) : une représentation simplifiée d'une réalité, qui lui donne du sens et permet de mieux la comprendre.

Ainsi, chaque modèle possède sa propre échelle, à partir de laquelle il propose d'étudier la réalité dans un « état d'esprit » qui lui est propre, avec un certain objectif : ce qui n'affecte pas directement cet objectif peut être éliminé de l'étude, alors que les éléments qui permettent de l'atteindre se trouvent souvent artificiellement exagérés. Au cœur des modèles, le monde n'existe donc plus comme une réalité tangible, mais comme une connexité formelle et limitée, que l'on explore par l'intermédiaire de symboles, de règles et de processus simplifiés (Meadows, 1957). Un modèle n'est donc rien d'autre qu'une structuration simplifiée de la réalité, qui présente des caractéristiques ou des relations supposées significatives, dans une forme généralisée, une approximation très subjective qui ne tient pas compte de toutes les observations et de toutes les mesures. Et c'est justement la raison de leur intérêt : ils masquent les détails et permettent de mieux focaliser sur les aspects fondamentaux de la réalité, du moins ceux que l'on cherche à mieux comprendre ou à simuler.

Dans ce contexte, chaque modèle éclaire une partie du monde comme un projecteur éclaire une scène, plongeant automatiquement d'autres parties dans l'obscurité (Bambrough, 1964). Et cette sélection implique naturellement qu'ils diffèrent souvent grandement de la réalité, qu'ils n'en soient que des approximations parfois caricaturales, mais suffisamment simples pour être correctement manipulées et comprises par ceux qui les utilisent, suffisamment représentatives pour qualifier correctement le monde auquel elles veulent correspondre, et suffisamment complexes pour caractériser avec une certaine exactitude le système qu'elles étudient (Chorafas, 1965). Finalement, chaque modèle se présente comme une sorte de compromis : il possède son champ de conditions, à l'intérieur duquel il est valable, et en dehors duquel il ne correspond plus à rien (Skillings, 1964).

Dans ce contexte, c'est véritablement sur la question de la modélisation de la ville, envisagée à travers sa forme et ses politiques de transport, que cet ouvrage souhaite apporter une contribution, celle de la recherche française actuelle dans ce domaine. La première partie, intitulée « De la modélisation à la simulation Urbanisation/Transport », présente cinq essais de modélisation qui combinent la question des déplacements et des mobilités quotidiennes à celle de

l'urbanisation et de la localisation des espaces de résidence et des zones d'activités. La seconde partie, « Comprendre les mobilités urbaines et anticiper une urbanisation durable », en regroupe sept, centrés sur des questions plus spécifiques quant aux mobilités et aux formes qui en découlent, auxquelles ils apportent des réponses parfois plus théoriques, et souvent très innovantes. Au total, c'est une somme d'éclairages qui se fondent sur la simulation pour mieux appréhender la dynamique des systèmes urbains, et anticiper une urbanisation et des mobilités plus durables.

Références bibliographiques

- Ackoff R.L., Gupta S.K., Minas, J.S., 1962, *Scientific method : optimizing research decisions*, 464 p.
- Bambrough R., 1964, Principia metaphysica, *Philosophy*, 39, pp. 97-109.
- Bertalanffy (von) L., 1968, 1996, *Théorie générale des systèmes*, Dunod, 308 p.
- Dauphiné A., 1987, *Les modèles de simulation en géographie*, *Economica*, 187 p.
- Emshoff J.R., Sisson R.L., 1970, *Design and use of computer simulation models*, Mac Millan.
- Fondi R., 1986, *La révolution organiciste*, Labyrinthe, 288 p.
- Haggett P., Chorley R.J., 1967, Models, paradigms and the new geography. In : Haggett P., Chorley R.J., 1967, *Models in geography*, The Trinity Press, pp. 19-41.
- Halbwachs M., 1928, *La population et les tracés de voies à Paris depuis un siècle*, Presses Universitaires de France.
- Koestler A., 1968, *Le cheval dans la locomotive*, Calmann-Lévy, 345 p.
- Le Goff, 2009, Au nom du développement durable, *Le Débat*, 156, pp. 80-98.
- Meadows P., 1957, Models, systems and science, *American sociological review*, 22, pp. 3-9.
- Popper R.K., 1968, 1989, *La logique de la découverte scientifique*, Payot, 480 p.
- Pumain D., Sanders L., Saint-Julien T., 1989, *Villes et auto-organistaion*, *Economica*, 191 p.
- Skilling H., 1964, An operational view, *American scientist*, 52, pp. 388-396.
- Wegener M., 2004, Overview of land-use transport models. In : David A. Hensher, Button K. (ed.), *Transport geography and spatial systems*, Handbook in transport, 5, Pergamon/Elsevier, 127-146.

┌

┌

└

└

Première partie

**De la modélisation
à la simulation
urbanisation/transport**

┌

┌

└

└

Cette partie regroupe une première série de modèles, qui s'attachent à prendre en compte de manière combinée la question des déplacements quotidiens et des localisations résidentielles et d'entreprises en milieu urbain, et à formaliser les liens et les relations qui unissent ces deux problématiques, selon des échelles et des temporalités différentes. Ils envisagent leur modélisation simultanée de manière complémentaire et itérative, dans une philosophie qui peut s'assimiler à celle, plus générale, des modèles LUTI (*Land-Use and Transportation Integrated models*), dont ils offrent une adaptation au cas français sur plusieurs terrains d'étude : l'Ile-de-France, l'agglomération lyonnaise et celle de Besançon.

Afin de bien saisir les enjeux, les contraintes et les limites de ce genre de modélisation, A. Cambien introduit quelques éléments de définition dans le premier chapitre, et présente un historique, nécessairement trop bref, des théories scientifiques et urbaines qui sont à l'origine des possibilités de modélisation actuelles : les premiers modèles de l'économie spatiale, ceux de l'école de Chicago, l'apport de la systémique et de l'approche centrée sur l'individu, etc. Elle rappelle ainsi qu'il existe désormais un panel relativement large de modèles applicables aux problématiques des mobilités urbaines, et que chacun s'associe à certaines spécificités, qui les rendent particulièrement pertinents pour répondre à une question précise ou éclairer un point particulier, montrant que la modélisation ne peut se concevoir indépendamment de la manière avec laquelle la ville et la société sont conçues.

Dans le deuxième chapitre, le modèle MOBISIM offre un premier exemple. Il s'appuie sur une approche cellulaire de l'espace géographique, comme SIMAURIF (Chapitre 3) et PLAINSUDD (Chapitre 6), mais celle-ci est multi-scalaire, considérant des mailles de taille variable, liées entre elles par des algorithmes d'agrégation ou de ventilation, au sein desquels les processus et les impacts de l'urbanisation et des transports peuvent être considérés à l'échelle la plus appropriée. Dans ce cadre, la modélisation effectuée sur l'agglomération de Besançon se fonde sur la théorie des systèmes multi-agents et des automates cellulaires. Elle prend en compte les comportements individuels des acteurs et des usagers des transports, mais intègre également l'évolution de l'occupation du sol et des densités de population, considérant la ville à une échelle proche de celle des bâtiments.

Plus avancés sur le plan technique et opérationnel, les modèles SIMAURIF et SIMBAD, présentés par D. Nguyen-Luong et J.P. Nicolas dans les chapitres 3 et 4 sont tous les deux basés sur la plateforme américaine URBANSIM, couplée avec l'outil DAVISUM pour une prise en compte multimodale des transports et du trafic. Ils en proposent des développements et des adaptations, parfois délicates quand il s'agit de transposer un modèle construit à partir de données recueillies aux Etats-Unis (et peu disponibles en France), à partir de l'exemple de l'Ile-de-France et de l'aire urbaine de Lyon. SIMAURIF construit ses simulations sur un calibrage rigoureux obtenu à partir de deux dates passées et connues (1990 et 1999), privilégiant les aspects prédictifs des résultats plutôt que les possibilités explicatives du modèle ; l'exemple de scénario concerne le projet de tangentielle Nord dont la mise en service est prévue entre 2014 et 2017 (rocade ferroviaire au Nord de l'Ile-de-France), et dont les impacts sont évalués en termes de gain d'accessibilité, de développement économique local et démographique. Le modèle SIMBAD propose quant à lui une simulation désagrégée des mobilités, fondée sur une reconstitution des comportements individuels observés, et interfacée avec le modèle FRETURB (Chapitre 8) pour prendre en compte le transport de marchandises ; la modélisation des mouvements de localisation des ménages et des établissements s'appuie sur la théorie des choix discrets, et offre une évaluation du caractère durable des conséquences de l'interaction urbanisation/transport.

Le chapitre de V. Piron et J. Delons présente ensuite le modèle PIRANDELLO® (Chapitre 5), appliqué à l'Ile-de-France. PIRANDELLO® est un modèle agrégé et statique (à l'inverse de l'approche dynamique des précédents modèles), qui se fonde sur la notion d'équilibre général pour appréhender la question du trafic comme celle de l'urbanisation en général, résultant de forces centripètes (la recherche de la meilleure accessibilité conduit les acteurs à se regrouper au centre) et centrifuges (la recherche de surfaces habitables conduit à déconcentrer les habitants). Plusieurs scénarios sont simulés : une continuation « au fil de l'eau » des tendances passées, une dégradation des conditions de transport, l'augmentation du parc de logement, et la mise en place d'un péage cordon autour de Paris.

Enfin, le projet PLAINSUDD, présenté par A. Bonnafous et Y. Crozet dans le chapitre 6, apparaît comme un enrichissement de l'outil MOSART (Modélisation et simulation de l'accessibilité aux réseaux et aux territoires), conçu pour étudier l'accessibilité des personnes aux services et aux emplois par différents moyens de transport (automobile, transport en commun, système Velo'v). Il associe les

technologies des Systèmes d'information géographique (SIG), de géolocalisation et de dissémination par géo-portails, dans l'objectif de diffuser les résultats de simulation via Internet, avec des degrés de sophistication plus ou moins élaborés selon les utilisateurs. Visualisables sous la forme de cartes isochrones, les résultats produits pour l'agglomération lyonnaise permettent de comparer les coûts généralisés des différents modes de transports, et constituent une aide à la décision pour la planification urbaine.

┌

┌

└

└

CHAPITRE 1

LA MODÉLISATION URBAINE : UNE APPROCHE HISTORIQUE

Aurore Cambien

CERTU/URB

9 rue Juliette Récamier – 69456 Lyon Cedex 06
aurore.cambien@developpement-durable.gouv.fr

Le contexte contemporain de l'aménagement du territoire, institué depuis une dizaine d'années par les « Trois lois » (Loi Chevènement, Loi Voynet, Loi SRU), insiste sur la notion de projet, préalable à l'action et à la réglementation des documents d'urbanisme. Il invite les gestionnaires et les acteurs des territoires à se projeter dans l'avenir et à mettre en place une démarche prospective permettant d'éclairer les possibles à l'horizon d'une dizaine ou d'une vingtaine d'années. C'est à partir de ce projet souhaité et réfléchi d'un commun accord, que doit se construire la stratégie d'aujourd'hui, afin d'éviter que ce futur ne prenne une forme contradictoire à la volonté de chacun et aux engagements du développement durable. L'objectif s'accompagne d'une obligation : simuler l'avenir de la ville afin d'anticiper son évolution, tant en termes de forme que de politiques de transport. Parmi les outils les plus novateurs pour y parvenir, la simulation peut s'appuyer sur une modélisation. Il est donc nécessaire de se familiariser avec cet outil – le modèle – qui permet d'y voir plus clair dans le fonctionnement de la « machine urbaine ». Ce chapitre vise à définir ce que l'on entend généralement par « modèle » et « modélisation ». Il revient ensuite sur l'historique de la modélisation urbaine en passant en revue les essais et les avancées majeures, issus de l'économie spatiale, de la sociologie urbaine et de la géographie quantitative et théorique, avant d'insister sur l'importance de la systémique et de l'approche centrée sur les individus, sur lesquelles de nombreux modèles se fondent aujourd'hui. Il montre en définitive que chaque modèle correspond en fait à une « interprétation » du système urbain, et ne peut être détaché de la manière avec laquelle la ville est conçue par ceux qui tentent de la modéliser, et qui s'inscrivent nécessairement dans leur époque, avec leurs théories, leurs outils et leurs méthodes.

1. QU'EST CE QUE LA MODÉLISATION ?

Pour définir les modèles, on peut commencer par une mise en garde quant aux divers sens que le terme peut prendre, dans le langage courant comme dans le langage scientifique. Le terme modèle s'emploie effectivement dans de nombreux cas. On l'utilise par exemple comme un nom pour désigner une représentation, ou comme un adjectif pour qualifier un degré de perfection, ou encore comme un verbe, qui signifie démontrer, ou montrer « comment les choses sont ».

1.1. La notion de modèle

Le mot modèle désigne des notions multiples. Le modèle est d'abord « ce qui sert ou doit servir d'objet d'imitation pour faire ou reproduire quelque chose »¹. Il peut s'agir ici d'une attitude à imiter, d'une référence ou d'un paradigme. La notion de modèle peut renvoyer aussi à une personne, un fait ou un objet « possédant au plus haut point certaines qualités ou caractéristiques qui en font le représentant d'une catégorie ». Chez Molière, Harpagon est par exemple le modèle de l'avare. Par extension, le modèle est aussi « ce qui représente sous une forme concrète ou restreinte une classe, une catégorie ». Le modèle est encore l'objet ou le type déterminé, selon lequel des objets semblables peuvent être reproduits à de multiples exemplaires (modèles de voitures par exemple). Le terme modèle renvoie également au modèle réduit défini comme « l'objet de même forme qu'un objet plus grand mais exécuté en réduction. » Enfin, il désigne la « représentation simplifiée d'un processus, d'un système » ; par extension, il inclut dans cette définition le modèle mathématique « formé par des expressions mathématiques et destiné à simuler un tel processus ».

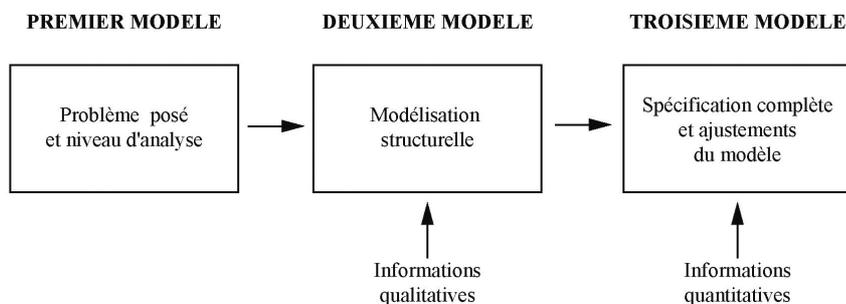
Au delà de la polysémie, la notion de modèle renvoie donc finalement soit à un objet réel dont on cherche à donner une représentation, soit à un concept qui est la représentation d'un objet à construire ou déjà existant. Le second sens dérive de la pratique des architectes et des ingénieurs consistant à élaborer d'abord un prototype, concret ou conceptuel, qui servira de « modèle » à une construction réelle. Les modèles dont nous traitons dans cet ouvrage renvoient bien à cette seconde définition : à chaque fois que la notion est évoquée, elle convoque d'autres idées, celle du réel modélisé, celle de l'action de construction du modèle, ou encore de simulation. Le couple modèle/modélisation est d'ailleurs inséparable dans le cadre de cette réflexion.

1. Définition du *Petit Robert*, Édition 2003.

Figure 1

Du modèle conceptuel au modèle de simulation

Auteur : C. Tannier

**1.2. La notion de modélisation**

Le terme modélisation, apparaît quant à lui plus tardivement, en 1975. Il est défini comme la « mise en équation d'un phénomène complexe permettant d'en prévoir les évolutions »². L'utilisation du mot renvoie d'abord au sens réduit de modèle. Il faut attendre quelques années avant qu'il soit utilisé pour désigner la programmation à fin de simulation d'un modèle. Il présente alors deux définitions : la modélisation comme application d'un modèle donné, et la modélisation comme processus d'élaboration du modèle en question.

Dans les deux cas, le terme implique d'une manière ou d'une autre la notion de simulation. Dans le premier, la modélisation est confondue avec la simulation. Dans le second, elle consiste en la construction du modèle à partir duquel la simulation est possible. La simulation s'entend ici comme un procédé selon lequel on exécute un programme informatique sur un ordinateur en vue de simuler par exemple un phénomène complexe ; elle permet la reproduction du comportement passé et a pour finalité l'exploration de futurs possibles.

Comme l'explique la Figure 1, il est possible de distinguer différentes étapes dans le processus de modélisation qui correspondent finalement à différentes manières de concevoir le travail de modélisation. Du premier modèle conceptuel, qui a pour finalité de problématiser l'objet d'analyse, on passe progressivement au modèle de simulation par l'introduction d'informations qualitatives d'abord, quantitatives ensuite.

2. Ibid.

La modélisation, telle que nous l'entendons dans ce chapitre, consiste donc bien en un travail d'élaboration, à l'aide de l'outil mathématique, d'un concept ou d'un objet – appelé modèle – qui est la représentation de la réalité. Elle est « une simplification de l'inaccessible réel » (Bouleau, 2006), capable de reproduire ou de simuler un processus ou un phénomène particulier. Le recours à cet exercice est relativement ancien dans les sciences dites dures, et le transfert de cette pratique dans le champ des sciences sociales s'est développé plus récemment.

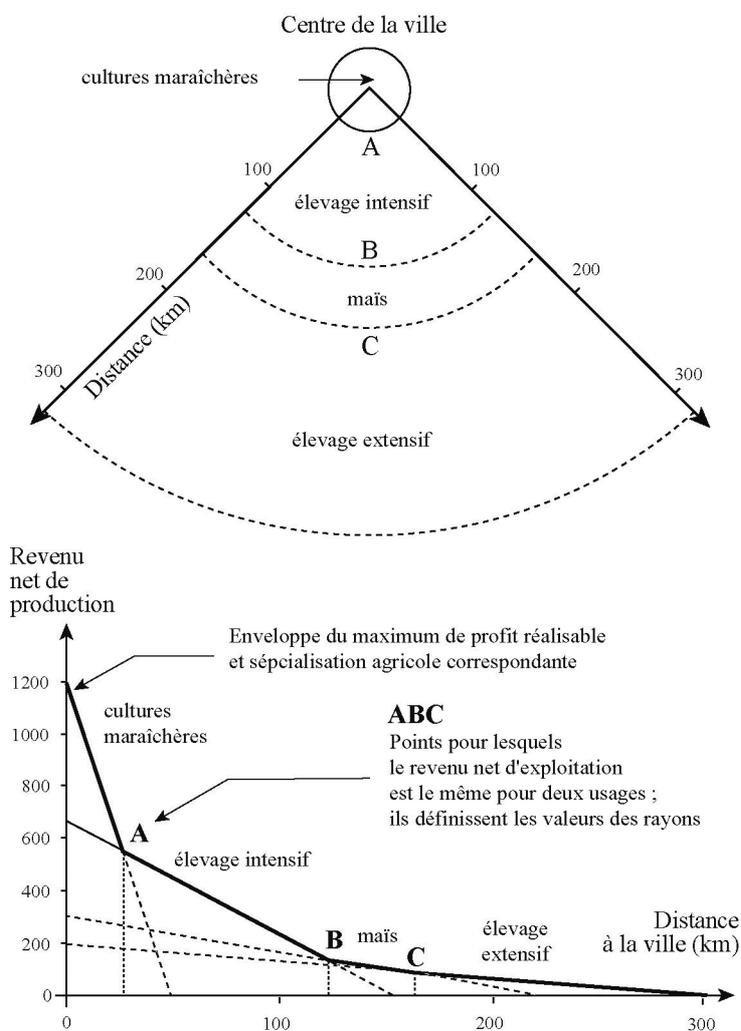
2. MODÉLISATION SPATIALE ET VILLE : FONDEMENTS HISTORIQUES

Si l'introduction du terme modélisation dans le dictionnaire est tardive, la notion de représentation ou de modélisation de la ville est plus ancienne. C'est de son histoire dont il est question dans cette deuxième partie. En effet, les modèles mis en place par les économistes pour considérer la ville comme un espace aux caractéristiques spécifiques sont nombreux. Ils partent généralement de l'idée que la proximité urbaine génère un certain nombre de profits qu'il est possible de maximiser en choisissant une localisation optimale pour chaque type d'activités, définie selon des critères qui lui sont propres. Le modèle de A. Weber (1929), par exemple, mis au point en 1909, montrait que le choix d'implantation d'une industrie devait dépendre du coût de transport des marchandises et des employés, et de l'acheminement des produits finis vers un marché. Les modèles de J. von Thünen (1826) ou de W. Alonso (1964) s'intéressent quant à eux aux rapports entre localisation et rente foncière en fonction de la distance au centre de la ville. Les modèles de W. Christaller (1933) et de A. Lösch (1940) étudient la répartition des villes et des activités au sein d'un espace régional plus vaste, etc.

2.1. Les modèles d'économie spatiale

Dès le 19^e siècle, les travaux dans le domaine de l'économie spatiale s'appuient sur un certain nombre de « modèles » théoriques. Ces modèles d'urbanisation visent à étudier et à prévoir l'occupation du sol entre différents types d'activités : activités résidentielles, activités économiques, équipements, etc. L'analyse théorique des phénomènes de localisation des agents économiques, des entreprises et des ménages, est donc relativement ancienne. L'un des modèles fondateurs dans ce domaine a été développé par Von Thünen. Dès 1820, il cherche en

Figure 2
Le modèle de Von Thünen



effet à expliquer la localisation des activités agricoles autour des villes de l'Allemagne préindustrielle (Figure 2).

Il a développé les bases mathématiques de la théorie de la productivité marginale, formalisées de la manière suivante :

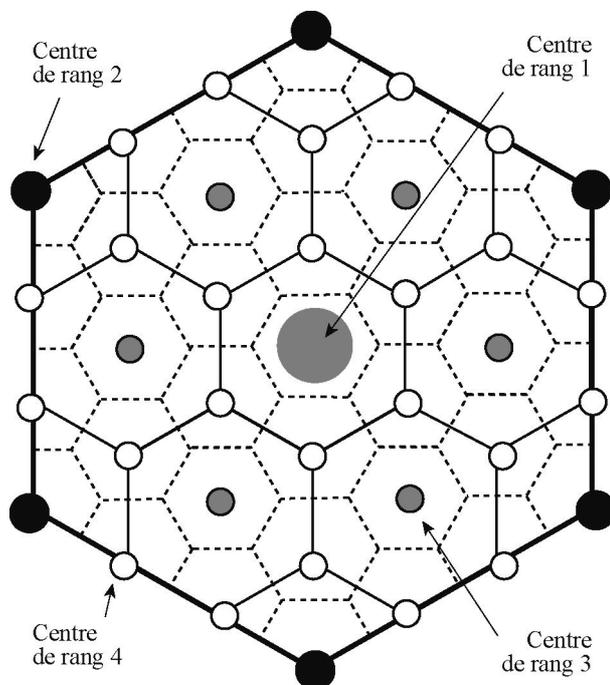
$$R = r(p - c) - r.T.m$$

où : R est la rente foncière, r le rendement par unité de surface, p le prix du marché par unité de produit, c les charges de fabrication par unité de produit, T le coût du transport en unité de compte par unité de produit et par unité de distance, et m la distance au marché.

Von Thünen est parti de l'idée selon laquelle le producteur cherchait à maximiser le profit de sa terre et que ce profit reposait sur l'utilisation optimale des surfaces et des coûts de transport. Il en conclut que la production d'une denrée n'est rentable qu'à une distance donnée du marché. Au delà de cette distance, soit le coût de la terre (la rente foncière) ou du transport devient trop élevé, soit une autre culture est plus intéressante à produire. Suivant cette logique, les produits ayant des coûts de transport élevés (comme par exemple les légumes ou le lait à cette époque) sont localisés à l'endroit où la rente foncière est la plus intéressante. A l'inverse, les produits ayant des coûts de transport plus faibles (comme le bétail par exemple) sont localisés dans les zones les plus éloignées du marché. Le modèle repose ainsi sur un certain nombre d'hypothèses associées à une ville théorique et un espace isotrope qu'on ne retrouve nulle part dans la réalité. Il a pu servir à de nombreuses interprétations, pour la ville de Chicago par exemple. Le modèle de Von Thünen, qui appartient au champ de l'économie spatiale, constitue bien une première tentative de modélisation d'un phénomène urbain.

Un siècle plus tard, les travaux de W. Christaller (1933) et la Théorie des lieux centraux proposent un modèle de hiérarchisation des réseaux urbains en fonction des services et des commerces qui se trouvent sur le territoire. Il s'agit d'un modèle théorique qui tente d'expliquer la taille, le nombre et la répartition hiérarchique et géographique des villes au sein d'un espace régional. A partir de l'exemple de l'Allemagne du Sud, il montre en effet que l'armature urbaine d'une région n'est pas issue uniquement des vicissitudes de l'histoire, mais s'organise hiérarchiquement en fonction de l'offre en biens qu'elle propose. En bas de la hiérarchie, les villages sont nombreux. Ils ne proposent qu'un petit nombre de commerces de base, dont le recours est souvent très fréquent (une boulangerie, un café, etc.) et se localisent à des distances égales et souvent proches. En haut de la hiérarchie, la métropole est seule à commander l'espace régionale et propose tous les types de biens, même ceux dont le recours est rare. Entre les deux, différents niveaux de villes (il y en a sept en tout dans la théorie de Christaller) proposent différents niveaux de services, dont le nombre est proportionnel à la distance qui les sépare. L'ensemble s'organise sous la forme d'hexagones emboîtés, qui couvrent régulièrement et hiérarchiquement l'espace régional (Figure 3).

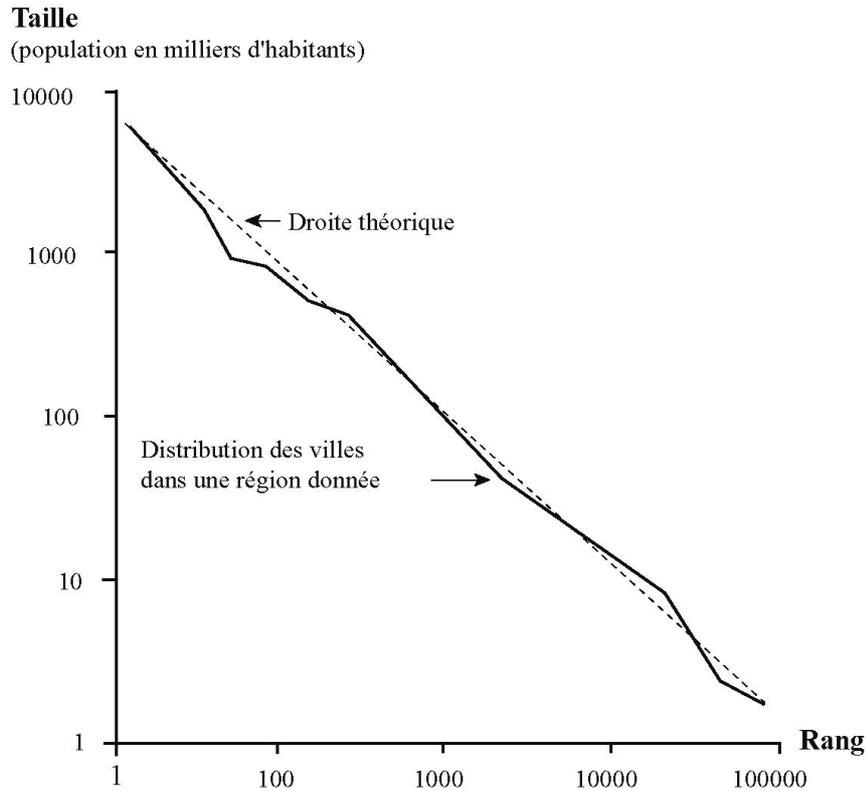
Figure 3
Le modèle de Christaller



Prenant pied sur des hypothèses simplistes (accessibilité et niveaux de revenus égaux en tous points, etc.), proches de celles de Von Thünen, le modèle de Christaller ne se retrouve dans aucun espace réel, et ne correspond plus aux réalités actuelles. Pour autant, il reste pertinent pour expliquer certaines configurations urbaines, et on peut y faire référence pour proposer des solutions d'aménagement du territoire (comme cela a été le cas pour la localisation des services publics en Suède par exemple).

A. Lösch (1940), démographe allemand, propose ensuite des méthodes de découpage de l'espace en zones homogènes qui permettent l'analyse spatiale des phénomènes urbains. Elles seront reprises par l'américain K.G. Zipf (1949) qui construit la loi rang-taille. La loi rang-taille est une généralisation empirique selon laquelle la taille des villes est distribuée de manière inverse à leur rang, indépendamment de l'espace et du temps. Elle peut être résumée par une figure (un graphique bilogarithmique) où la taille des villes (mesurée par leur population) apparaît sur l'ordonnée, et leur rang (la plus peuplée occupe le rang 1, la moins peuplée le dernier rang) sur l'abscisse

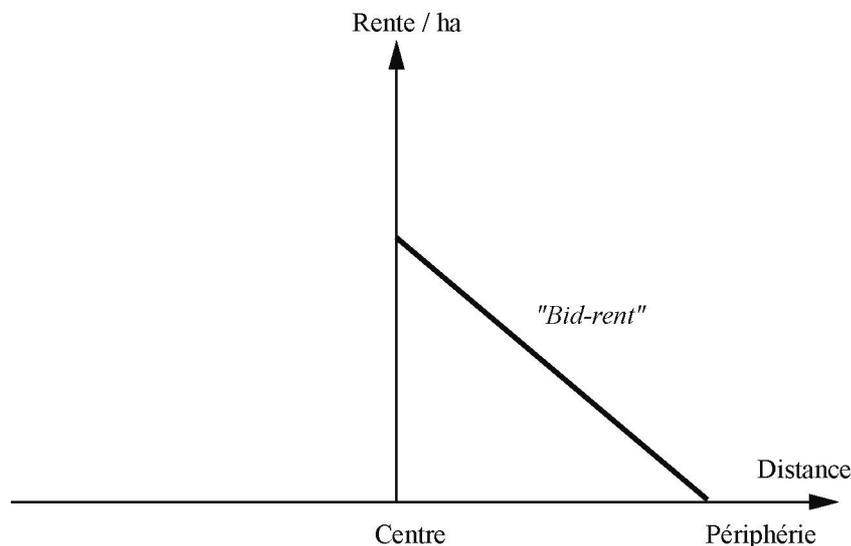
Figure 4
La loi rang taille



(Figure 4). La courbe en résultant prend globalement toujours la même forme, celle d'une droite, quelle que soit la région dans laquelle les villes ont été sélectionnées, et quelle que soit l'époque à laquelle on les considère. Ce constat empirique témoigne d'une certaine invariabilité dans la hiérarchie ou dans l'armature urbaine des régions et des pays : les villes semblent toujours s'organiser plus ou moins selon le même schéma. Il permet de comparer les réseaux de villes de différentes régions et de différentes époques, et de repérer les anomalies qui y prennent place, pour lesquelles il n'est pas toujours impossible de trouver une hypothèse explicative.

Une autre manière d'aborder la question de la forme des villes, de leur organisation et de leur répartition consiste à s'interroger sur la nature des activités qui s'implantent en des lieux donnés de ce territoire. Dès le 18^e siècle, des travaux importants ont porté sur l'étude des valeurs foncières. Les modèles basés sur la théorie de la croissance

Figure 5
Le modèle d'Alonso



urbaine s'inscrivent dans la continuité de ces travaux. Ils tentent d'expliquer le comportement des ménages et des activités économiques en cherchant un compromis entre la proximité (ou pénibilité du trajet), la disponibilité du terrain et son prix. En 1964, fondant ainsi l'économie urbaine, W. d'Alonso élabore un modèle mettant en lien migration et évolution de la distribution de la population.

D'après cette théorie, l'organisation spatiale de l'utilisation du sol est déterminée par la valeur foncière, elle-même liée aux coûts de transport. Chaque activité possède sa propre courbe de la rente qu'elle accepte de payer en fonction de la distance au centre. Le modèle d'Alonso « centre son analyse sur l'arbitrage entre accessibilité et consommation du sol auquel sont confrontés les ménages lors de leur choix résidentiels » (Fujita et Thisse, 2003). La différence principale avec le modèle de Von Thünen tient en ce que dans le modèle d'Alonso, les différentes localisations entre les activités sont interdépendantes.

Tous ces modèles précurseurs, ainsi que les travaux auxquels ils ont conduit par la suite, ont indéniablement permis d'identifier et de mieux comprendre certaines articulations à l'origine de la production de l'espace urbain et de son occupation du sol. Pour autant, l'échelle très abstraite à laquelle ils considèrent la ville n'apporte souvent que peu de matière opérationnelle au champ de l'urbanisme, si ce n'est sur le plan théorique.

2.2. Les modèles de l'écologie urbaine

De leur côté, les sociologues et les démographes se sont également préoccupés de l'analyse spatiale des distributions de la population en ville. Ainsi, la naissance de l'écologie urbaine dans les années 1920 va dans ce sens. L'écologie urbaine consiste en l'étude des interactions entre les êtres vivants et la ville. C'est l'école de Chicago qui est réputée être à l'origine du premier courant d'écologie urbaine : elle marque le début de l'application des sciences sociales à la ville, et plus généralement au phénomène urbain, en postulant une interdépendance entre le citadin et son environnement urbain, et propose à la fois des représentations de la ville et des modèles explicatifs de la répartition des populations en fonction de leurs caractéristiques sociales, familiales, ethniques, etc. La ville est alors décrite sous la forme d'aires plus ou moins « naturelles » dans trois modèles successifs et complémentaires (Figure 6) :

- le plus connu est certainement le modèle de Burgess (1925), qui a étudié sur le plan qualitatif les itinéraires résidentiels socio-spatiaux des populations de plusieurs villes américaines. Le modèle qu'il propose est celui d'un schéma concentrique d'organisation de l'espace urbain, qui s'applique plus spécifiquement à l'organisation des villes ;

- le modèle de Hoyt, en 1939, s'appuie sur l'idée que des conditions naturelles particulières ou des lignes de communication favorables ont un effet structurant sur les zones avoisinantes qu'elles rendent plus attractives. L'évolution de la ville ne s'effectue pas en cercles réguliers, mais en arcs de cercles ou en secteurs ;

- Ullman et Harris, en 1945, partent de l'hypothèse qu'il existe, dans une agglomération, différents noyaux caractérisés par leur fonction différente et articulés par des axes de transport. Ces différents noyaux sont liés les uns aux autres : certaines fonctions se repoussent, d'autres s'attirent, d'autres encore dépendent des caractéristiques du site. Ainsi, les activités bancaires et les sièges d'entreprise, par exemple, auront tendance à se localiser dans le même noyau, le même quartier.

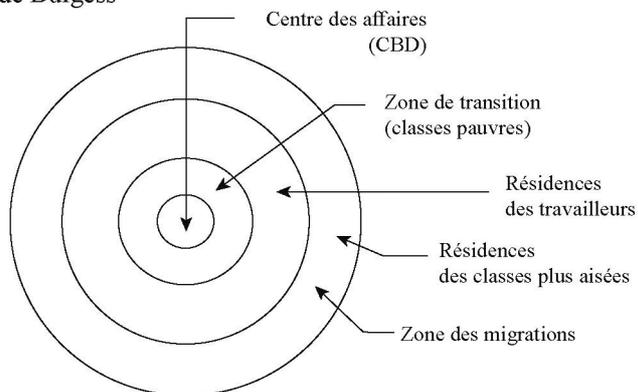
2.3. Les modèles d'interaction spatiale

Un autre type de modélisation des dynamiques spatiales est également développé à cette époque. Il s'agit des modèles d'interaction spatiale. La notion d'interaction spatiale est souvent définie, notamment dans la littérature anglo-saxonne, comme l'étude de la décroissance des flux avec la distance. L'observation des migrations à la fin du 19^e siècle a conduit très tôt différents auteurs à mettre en évidence des

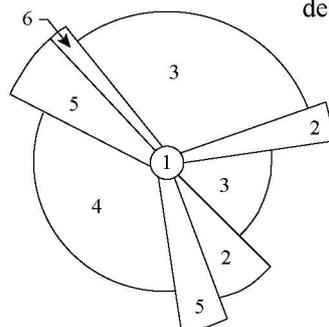
Figure 6

Les modèles de l'école de Chicago

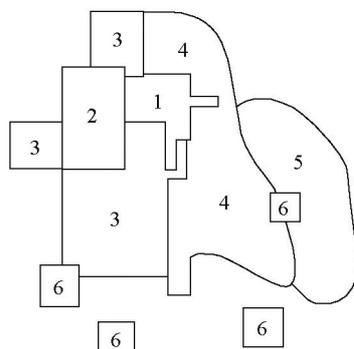
Modèle radioconcentrique
de Burgess



Modèle sectoriel
de Hoyt



Modèle
polynucléaire
de Harris et Ullmann



1. Centre des affaires
2. Industries légères et entrepôts
3. Résidences des classes pauvres
4. Résidences des classes moyennes
5. Résidences des classes aisées
6. Industries lourdes

lois empiriques qui ont ensuite été rapprochées par analogie des lois de la gravitation universelle. C'est le cas des modèles déterministes de E.G. Ravenstein (1885).

Les modèles gravitaires font généralement dépendre le volume d'interaction entre deux lieux de la masse des lieux émetteurs et récepteurs ainsi que de l'inverse du carré de la distance qui les sépare. Ils peuvent être considérés comme les précurseurs de formalisations théoriques plus générales des flux, rassemblées actuellement sous le terme de modèles d'interaction spatiale. Le modèle gravitaire classique de

Stewart et Zipf (1941-49) est analogue à celui de l'interaction en physique (théorie de Newton sur la gravité) : l'interaction entre deux unités géographiques y apparaît proportionnelle au produit de leurs masses respectives (leur population, leur richesse, etc.) et inversement proportionnelle à la distance les séparant. Ainsi, si les masses et les distances ne sont pas les éléments créateurs de l'interaction, ils sont empiriquement un excellent descripteur de leur importance.

Dans le même genre, le calcul du « potentiel » d'un lieu (modèle de potentiel) se fonde également sur la prise en compte d'une hypothèse d'interaction spatiale (forme de la décroissance de la probabilité de relation avec la distance), mais il s'agit fondamentalement d'une mesure d'accessibilité visant à évaluer la variation de la quantité d'opportunités de relation en fonction de la position.

Les modèles de Reilly et de Huff, qui visent à déterminer les aires de marché théoriques d'un ensemble de lieux centraux, se rattachent également à la catégorie des modèles d'interaction spatiale dits « de position » puisqu'ils visent à décrire les lieux (appartenance à une zone de marché) et non pas directement les relations entre les lieux.

De nombreux modèles théoriques permettant d'expliquer les processus urbains ont donc été élaborés depuis de plusieurs décennies. Les premiers travaux de modélisation urbaine s'attachaient à mieux comprendre, à travers la modélisation des mécanismes économiques, la question de l'occupation du sol. Les travaux de Von Thünen, Alonso, Burgess ou encore Hoyt vont dans ce sens. A partir d'une conception économique ou écologique du fonctionnement du système urbain, ils proposent des modèles schématisant la structure des usages du sol. Bien que, dans la majorité des cas, ces modèles n'apportent que de faibles justifications théoriques, souvent dépassées et limitées pour décrire la situation aujourd'hui, ils ont fourni une base solide pour les expériences de modélisation qui suivront. Ce n'est en effet qu'à partir de la deuxième moitié du 20^e siècle qu'un véritable tournant se produit, une rupture dans le domaine de la modélisation urbaine.

3. LA RÉVOLUTION SYSTÉMIQUE

Le développement de l'approche systémique va en effet contribuer au renouvellement des pratiques dans le champ de la modélisation urbaine.

3.1. Qu'est ce qu'un système ?

Au début du 20^e siècle, les découvertes de la mécanique quantique ou les travaux de S. Freud dans le domaine de la psychanalyse bouscu-

lent assez violemment certains fondements scientifiques considérés comme acquis. Cet ébranlement aurait ainsi favorisé la prise de conscience des limites de la pensée classique pour comprendre un monde qui apparaît de plus en plus dans toute sa complexité. La volonté de dépasser les limites de l'approche analytique héritée du cartésianisme va aboutir au développement d'un courant de pensée connu sous le nom de systémique. La portée philosophique de ce paradigme nouveau est aujourd'hui établie, les efforts de théorisation des concepts par des auteurs comme L. Von Bertalanffy (1950), ou J.L. Lemoigne (1970) en France, ayant fortement contribué à forger une véritable épistémologie. A l'origine, pourtant, c'est dans le champ scientifique et technique que les bases de cette approche vont se constituer à travers l'émergence de la notion de système.

Du grec *sustema* qui signifie « ensemble », le mot système renvoie à de nombreuses définitions selon le domaine considéré. Ainsi du point de vue de l'histoire des sciences, par exemple, un système est une construction théorique que l'esprit forme sur un sujet. Dans le cadre de la théorie des systèmes, le mot système signifie « ensemble d'éléments en interaction ». Cette définition, un peu trop générale, est complétée par J. de Rosnay (1975) qui propose de définir un système comme « un ensemble d'éléments en interaction dynamique, organisés en fonction d'un but ». Outre la caractérisation de l'interaction, dynamique (et donc non statique), cette définition introduit l'idée de finalité.

C. Tannier (2000) s'appuie sur l'exemple de la cellule pour expliciter les principes de fonctionnement d'un système : « Selon le paradigme systémique, le fonctionnement d'un système doit permettre le maintien de sa structure. Pour comprendre les tenants et aboutissants de cette affirmation, prenons l'exemple d'un système biologique représentant une cellule. Sa structure est constituée d'un ensemble de composants (membrane, noyau, composants de régulation, etc.) en interaction. Elle lui permet une bonne absorption de l'énergie et des apports nutritifs qui lui sont nécessaires pour vivre. La cellule meurt si :

- l'un des éléments essentiels de sa structure (le noyau par exemple) manque ;
- les interactions entre les éléments essentiels de la structure ne se font pas ;
- elle ne peut trouver dans son environnement³ suffisamment d'énergie ou d'éléments nutritifs ;
- les échanges avec son environnement ne sont pas possibles ».

3. « En termes systémiques, l'environnement désigne le milieu dans lequel le système évolue et avec lequel il entretient des échanges » (Le Berre, 1987).

La notion de système peut également être appréhendée à travers la description des principales caractéristiques et propriétés des systèmes. Quelque soit le niveau de complexité des systèmes, ceux-ci présentent un certain nombre de caractéristiques communes (De Rosnay, 1975) :

- tout d’abord, sous peine de disparaître, les systèmes sont en relation permanente (on parle de l’ouverture du système) et en interaction constante avec leur environnement, qu’ils modifient, et qui les modifie en retour ;

- ensuite, les systèmes peuvent être décrits par un certain nombre d’éléments tels que leurs composants, les relations entre ceux-ci, leur frontière, etc. Une méthode classique utilisée pour étudier un système est la double caractérisation par l’aspect structural et l’aspect fonctionnel. L’aspect structural correspond à la description des différents éléments du système, de la manière dont ils sont organisés, notamment les uns par rapport aux autres, à l’identification de la frontière du système, etc. A travers l’analyse fonctionnelle, il s’agit plus particulièrement de caractériser les phénomènes dépendant du temps : flux, échanges, transfert, etc. Ainsi, les principaux traits structuraux de tout système sont sa frontière, ses éléments constitutifs, les réservoirs (ou stocks), et les principaux réseaux de communications. Les traits fonctionnels du système, quant à eux, sont les flux d’énergie, de matière ou d’information, les vannes contrôlant les débits des différents flux, les délais et les boucles de rétroaction, etc. ;

- les systèmes sont ensuite caractérisés par le principe d’arborescence : leurs éléments sont hiérarchisés en niveaux d’organisation, ce qui légitime en particulier la décomposition d’un système en sous-systèmes ;

- les systèmes sont finalisés : la finalité qui détermine le comportement du système se manifeste par exemple par leur capacité à maintenir leur équilibre par des phénomènes de régulation ;

- les systèmes ont besoin de variété, condition *sine qua non* de leur capacité d’adaptation, et donc de leur survie ;

- enfin, les systèmes sont auto-organisés, c’est-à-dire qu’ils possèdent la double capacité d’adaptabilité et de maintien de leur cohérence interne en vue de la finalité qui est la leur. Cette capacité repose en grande partie sur l’équilibre assuré par la complémentarité des rôles amplificateur des boucles de rétroaction positives et régulateur des boucles de rétroaction négatives.

Ces définitions et ces caractéristiques permettent de mieux saisir l’apport théorique que représente l’introduction de la notion de système dans le champ scientifique. La plupart des problèmes qui se posent aujourd’hui peuvent en effet être considérés comme comple-

xes. Nous entendons par là qu'ils font intervenir un grand nombre de variables reliées entre elles, qu'ils sont difficiles à appréhender et qu'ils ne présentent pas de solution de représentation unique. L'approche systémique a notamment permis de mettre en évidence le rôle des boucles de rétroaction entre des systèmes de décision et des systèmes d'action, et l'existence de dynamiques non linéaires qui contribuent à cette complexité. Or, c'est précisément lorsque nous sommes confrontés à ce type de problèmes que l'apport de la systémique se révèle utile. En effet, ici, le réductionnisme analytique consistant à descendre au niveau des éléments montre rapidement ses limites. Il conduit à proposer des solutions partielles qui ne traitent qu'un aspect du problème et qui, par ailleurs, ont souvent des conséquences indirectes non maîtrisées sur un autre aspect de ce problème.

La démarche systémique, à l'inverse, consiste à envisager tout problème complexe comme un ensemble d'éléments faisant système. E. Morin (1990) insiste sur les apports de la systémique : elle a « mis au centre [...] non une unité élémentaire discrète, mais une unité complexe, un tout qui ne se réduit pas à la somme de ses parties constitutives ». Par ailleurs, elle invite à « se situer à un niveau transdisciplinaire, qui permet à la fois de concevoir l'unité de la science et la différenciation des sciences ». Ce faisant, elle permet une saisie beaucoup plus globale des problèmes, et elle encourage à la proposition de solutions globales, qui prennent en compte l'ensemble de ces effets.

3.2. La ville : un système complexe

La ville, ou de manière plus générale la question urbaine, peut être conçue comme un système complexe. Elle est faite de multiples composants, articulés entre eux au sein de sous systèmes urbains, et qui sont en interactions dynamiques. Ces interactions sont à l'origine du comportement du système dans le temps. Mais la définition du système étudié dépend des finalités du modélisateur et il existe autant de modèles ou de systèmes urbains qu'il existe de questions à son sujet. C'est le fondement de l'axiome constructiviste. D.T. Wegener (1994) par exemple, distingue huit types de sous systèmes urbains dont il propose une classification selon une échelle de temporalité, allant des processus les plus lents aux processus les plus rapides :

- changement très lent : les réseaux, l'occupation des sols. Le transport urbain et les réseaux de communication sont les éléments les plus permanents de la structure physique des villes. Les grands projets d'infrastructure se construisent en une décennie voire plus, et une fois en place, ils sont rarement abandonnés. La distribution de l'occupation

des sols est également stable : elle change uniquement de façon résiduelle ;

- changement lent : les lieux d'emplois, les logements. Les logements ont une durée de vie supérieure à un siècle et leur construction prend plusieurs années. Les lieux d'emplois (bureaux, usines, centre commerciaux, etc.) existent plus longtemps que les entreprises ou les institutions qui les occupent ;

- changement rapide : l'emploi, la population. Les entreprises s'établissent, se ferment, se délocalisent, etc., et par conséquent créent de nouveaux emplois ou bien affectent l'emploi existant. Les ménages, en fonction de leur cycle de vie, ajustent leur consommation de logement et leur motorisation, ce qui détermine la distribution de la population et des propriétaires de voitures individuelles ;

- changement immédiat : les biens, les transports, les déplacements. La localisation des activités dans l'espace donne lieu à une demande d'interaction spatiale sous la forme de biens de transport ou de déplacement. Ces interactions sont le phénomène le plus flexible du développement spatial urbain ; elles peuvent s'ajuster, à la minute ou à l'heure, aux changements de la congestion ou aux fluctuations dans la demande bien qu'en réalité les ajustements puissent être retardés par des habitudes, etc.

Cet exemple n'est qu'une illustration de la manière dont la notion de système peut être déclinée au niveau de l'urbain. En effet, il n'existe pas de définition *a priori* : selon la problématique qui intéresse plus spécifiquement le modélisateur, les disciplines focalisent leurs recherches et leurs projets sur tel ou tel sous-système, ou sur tel ou tel aspect d'un sous-système. Chacun des chapitres de cet ouvrage en offre un nouvel exemple.

3.3. Analyses systémiques de la ville

La ville peut donc être conçue comme un système complexe et invite à une saisie systémique de ses problématiques. Le développement de l'approche systémique a suscité un certain intérêt et de nombreux travaux dans différentes disciplines. Parmi ces travaux, quelques-uns se sont précisément intéressés à la question urbaine. Ainsi, à l'origine de la dynamique des systèmes, J. Forrester l'a d'abord appliquée, en même temps qu'il en définissait les concepts, au domaine de l'entreprise (d'où la dénomination originelle de « dynamique industrielle »). Cette discipline, depuis ses débuts, vers la fin des années 1950, est essentiellement utilisée pour étudier des problèmes complexes liés à la gestion de manière générale. Au milieu des années 1960,

conscient de l'enjeu de tester sa méthode dans d'autres domaines, J. Forrester s'emploie à élargir le champ de ses applications à un thème éloigné de ses préoccupations antérieures. Cette volonté se traduit par l'élaboration d'un modèle de comportement dynamique d'une aire urbaine, connu sous le nom de « dynamique urbaine ».

La publication de *Urban Dynamics* (Forrester, 1969) rompt délibérément avec les tentatives d'élaboration de modèles explicatifs généraux de la croissance urbaine qui s'étaient multipliés durant les années 1960 aux Etats-Unis. Son modèle, doté d'un langage informatique nouveau, sous-tendu par la Théorie générale des systèmes de L. Von Bertalanffy, est tourné vers l'exploration à long terme de l'avenir des grandes villes et l'étude des conséquences lointaines des décisions de politique urbaine. Le modèle de dynamique urbaine est destiné à la simulation du développement à très long terme et à explorer les conséquences de politiques alternatives :

- Sur le premier point, les projections ont été effectuées à l'horizon de 250 ans et conduisent généralement à des positions d'équilibre stable après des phases de croissance et de déclin des principaux indicateurs économiques. Mais les limites du modèle, qui concernent pour la plupart la question de la spatialisation, rendent difficile l'évaluation de telles conclusions ;

- Sur le deuxième point, l'apport du modèle est également intéressant. Il montre que les politiques classiques échouent le plus souvent et peuvent même aggraver la situation initiale.

J. Forrester tire deux conclusions de son étude sur le système urbain : c'est un système contre intuitif, et c'est un système extrêmement robuste, peu sensible à des modifications dans les valeurs des principaux paramètres ou des variables d'entrée. La réaction aux simulations de politiques urbaines est lente et évolutive. Le modèle DYNACITÉ (Chapitre 13 de cet ouvrage), constitue un exemple de prolongement actuel de ce type de modélisations.

3.4. Les apports de la géographie quantitative

Ces premières représentations systémiques de la ville, qui considèrent l'espace urbain comme un système relativement bien isolé de son environnement, vont considérablement évoluer au cours des vingt années suivantes. C'est dans le domaine de la géographie que vont émerger les travaux de modélisation urbaine les plus prometteurs d'un point de vue systémique. En effet, la période qui s'ouvre après la seconde guerre mondiale voit le développement de nombreux outils théoriques et méthodologiques. L'essor de la systémique d'une part, et

celle des sciences informatiques d'autre part, contribuent à produire les conditions d'une « révolution théorique et quantitative »⁴. La modélisation constitue ainsi un paradigme central, un outil quasi incontournable dès lors qu'il s'agit de comprendre la complexité des phénomènes étudiés.

Le développement de la systémique se caractérise par ailleurs par un dialogue riche et fécond entre différentes disciplines, qui aboutit rapidement au transfert de concepts et de méthodologies. La modélisation fait partie de ces outils qui ont profité d'un rapprochement interdisciplinaire, et son utilisation s'est largement diffusée dans de nombreux domaines. Ce mouvement s'accompagne d'une forte tendance à la « mathématisation » des sciences sociales. Le recours à l'outil statistique se généralise ainsi dans les travaux de sociologie ou d'anthropologie. L'essor de la modélisation urbaine a ainsi rapidement influencé l'évolution de la géographie, mais avec quelques difficultés particulières.

En effet, la géographie a longtemps été un domaine où les mathématiques n'étaient admis qu'avec beaucoup de réserve. La réticence de cette discipline envers la formalisation mathématique trouve par exemple l'une de ses expressions dans certaines critiques récurrentes contre la statistique, accusée de réduire la richesse des faits humains. Ainsi, le chiffre, s'il n'est pas absent des études géographiques, n'y apparaît longtemps que « sous forme de tableaux de valeurs brutes ou de pourcentages [...] attestant simplement, pour ainsi dire, de la réalité d'un fait géographique, comme le faisaient de leur côté les photographies ou autres documents. » (Pumain et Robic, 2002). L'usage du nombre y est essentiellement descriptif. Il n'est toutefois pas étonnant que, dans un contexte où les travaux de modélisation se généralisent, que la géographie finisse elle aussi par céder. A partir de ce moment, au début des années 1970, elle recourra pour une part à des outils et des concepts mathématiques relativement sophistiqués, souvent venus des Etats-Unis, qui transforment vivement ses pratiques.

Si l'on s'intéresse aux éléments qui ont déclenché la prise de conscience de la nécessité d'une transformation de la géographie et enclenché le mouvement théorique et quantitatif de la discipline, il faut reconnaître que la découverte des travaux anglo-saxons dans le domaine a joué un rôle important. La *New Geography*, née aux Etats Unis et dans les pays scandinaves dans les années 1950, est une révélation brutale pour les géographes français des années 1970. Cette géo-

4. C'est sous cette expression que D. Pumain et M.C Robic (2002) identifient le mouvement de réforme qui donnera naissance à la géographie moderne.

graphie quantitative est ancienne de quinze ans lorsque ces chercheurs la découvrent et réalisent le retard pris par la France. Quantification, modélisation, approche systémique, analyse spatiale sont autant de mots clés que les géographes français entendent bien s'approprier pour entrer dans l'ère de la nouvelle géographie.

En France, nombre d'historiens suivent alors ce qu'ils identifient comme une rencontre de cultures jusque là séparées dans de multiples disciplines : mathématiques et sciences sociales acceptent de se parler. Dans le domaine de la géographie, de jeunes chercheurs s'investissent dans la formation mathématique, statistique et informatique. Les formations se multiplient et s'enrichissent, pour accompagner et nourrir ce mouvement. Ainsi des stages nationaux et des formations continues se développent, encadrés par des mathématiciens. La formation des étudiants aux statistiques, à l'analyse de données et à la géographie quantitative est proposée à la même période, et les premiers manuels sont édités. En 1979, les premières thèses à forte assise mathématique sont soutenues. En 1984, un grand congrès international de géographie (*European Colloquium on theoretical and quantitative geography*) s'inaugure à Strasbourg, et voit une forte mobilisation du mouvement théorique et quantitatif. La vitalité de la géographie française y est affichée et la fécondité des nouvelles démarches de recherche affirmée. Le retard de la France dans le domaine semble rattrapé.

La géographie quantitative et théorique se distingue de la géographie « classique » par « le déplacement de la problématique des lieux vers la notion "d'espace", en parallèle, la substitution d'une interrogation sur l'organisation sociale de l'espace à la question de la relation entre groupes humains et milieu » (Pumain et Robic, 2002). Les concepts importants sont ceux d'espace, de système, de dynamique, etc. Par ailleurs, la démarche de la nouvelle géographie est celle des sciences nomothétiques, caractérisée par la recherche de lois universelles, expliquant les régularités observées dans le temps sur l'espace géographique. On assiste à un véritable tournant dans le domaine de la géographie qui « impliquait de savoir passer de l'observation des régularités à l'analyse des processus, de l'identification des 'combinaisons' ou de structures à l'étude du changement susceptible de les produire et de les transformer » (Pumain, 2003). Dans ce contexte, la modélisation apparaît comme l'outil privilégié de l'exploration de l'espace, de sa dynamique et de ses lois. Les progrès de l'informatique participent à son épanouissement. Le travail de modélisation apparaît dès lors comme un substitut à d'utopiques laboratoires d'expérimentation à taille humaine, permettant la construction de scénarios, la discussion et la confrontation des idées. En particulier, c'est autour de la modélisa-

tion que s'articulent les travaux portant sur les systèmes et leur dynamique. Dans les années 1990, le transfert vers la géographie de concepts issus de disciplines telles que la physique ou l'informatique est largement facilité par le recours aux modèles. Plus tard, le dépassement des limites de la modélisation urbaine pour le traitement des données spatialisées ouvre la voie à deux progrès : le couplage avec des Systèmes d'information géographique (SIG) d'une part, et le développement des modèles individu-centrés d'autre part.

La modélisation apparaît ainsi au centre d'un dialogue fructueux qui s'installe entre mathématiques et géographie. Elle semble cristalliser les avancées théoriques de la nouvelle géographie. D. Pumain (2003) écrit à ce sujet que « la simulation par les modèles permet en quelque sorte de sortir la géographie de son rôle de fille de l'histoire, condamnée à recourir au fil d'Ariane du récit biographique pour trouver du sens dans le labyrinthe causal des interactions sociales, écologiques et spatiales, en lui substituant une explication, certes réduite, "normalisée", sous forme d'une trajectoire dynamique dans un processus évolutif générique ».

3.5. La modélisation urbaine à partir des années 1970

La modélisation urbaine se développe alors dans de nombreux domaines. Dans celui des transports d'abord, les travaux consistaient originellement à étudier et à prévoir la demande de déplacements en milieu intra-urbain, puis à l'échelle inter-urbaine, afin de limiter les problèmes de congestion ou d'anticiper les besoins en infrastructures. Issue du monde de l'économie, la modélisation développée dans ce domaine s'appuie sur une modélisation classique à quatre étapes. Cette approche par la demande de déplacements conduisait néanmoins souvent à ignorer l'interaction entre les problématiques du transport et celle de l'occupation et de l'usage des sols. La mise en évidence des insuffisances induites par cette simplification conduira un peu plus tard au développement des modèles LUTI (*Land Use and Transport Interaction*) qui permettent de modéliser ces interactions. L'introduction générale de cet ouvrage revient sur l'héritage important que constitue ce type de modèles, et de nombreux chapitres y font largement référence.

Dans les années 1980, d'autres disciplines s'intéressent également à la question urbaine de manière systémique. A côté des approches développées dans le cadre de la dynamique des systèmes, plusieurs écoles développent des approches parallèles. Ainsi, l'école de Stuttgart propose des modèles de migration, des modèles de cycles économi-

ques, des modèles de périurbanisation ou encore des modèles de compétition entre les villes. Le modèle proposé par W. Weidlich et G. Haag (1988), par exemple, se fonde sur l'équation maîtresse⁵ pour formaliser le lien entre la probabilité individuelle de migrer et l'évolution de la répartition de la population dans un système régionale. Il est calibré à partir d'une ou de plusieurs matrices de migrations inter-régionales et a été appliqué de manière dynamique à un système de villes.

D'autres travaux encore, notamment les modèles de dynamique non linéaires, s'intéressent à la simulation de croissance ou de décroissance de population et d'activités au sein de l'espace géographique des villes : « Il s'agit de construire des systèmes dynamiques à base d'équations différentielles et de descripteurs macroscopiques des systèmes étudiés pour s'intéresser à l'articulation des interactions au niveau microscopique, par exemple pour simuler la dynamique d'un semis urbain dans son organisation spatiale et hiérarchique » (Bonnefoy *et al.*, 2001). On citera par exemple les modèles de P.M. Allen et M. Sanglier (1979) ou de L. Sanders (1992).

4. LA MODÉLISATION AUJOURD'HUI : PRÉÉMINENCE DE L'APPROCHE CENTRÉE SUR L'INDIVIDU ?

Plus récemment, le champ de la modélisation urbaine a été marqué par une nouvelle évolution : le développement des modèles centrés sur l'individu (ou individu-centrés). Il constitue un événement majeur dans l'histoire de la modélisation urbaine, que certains qualifient de rupture. On peut à ce sujet formuler l'hypothèse que le développement des techniques fondées sur la prise en compte des individus ne fait finalement qu'actualiser dans le champ de la modélisation urbaine une rupture plus ancienne et moins spectaculaire : celle d'une manière nouvelle de concevoir la ville. Dès le milieu du 20^e siècle, certains travaux dans le champ de la recherche urbaine octroient en effet une place non négligeable au concept d'individu, acteur du changement urbain, et à la notion de système.

5. La méthode des équations maîtresses s'intéresse non pas directement à l'évolution de la population $n(t)$ de chacune des villes du système, mais d'abord à la probabilité $P(n,t)$ pour qu'à un instant t donné, on ait une configuration particulière $n(t)$. L'équation maîtresse est l'équation qui décrit la dynamique $dP(n,t)/dt$ de la probabilité $P(n,t)$ ainsi définie.

4.1. Les prémices : *Time geography* et microsimulation

La notion d'individu occupe très tôt une place importante dans la pensée sur l'urbain. Ainsi, le géographe suédois T. Hägerstrand (1953) pose dès les années 1950 les principes de ce qui deviendra dans les années 1970 la *Time geography* : « Il s'agit d'appréhender les individus en tant qu'acteurs et de comprendre comment ils parviennent à réaliser leurs projets respectifs suivant leurs intentions, leurs devoirs, et différents niveaux de contraintes spatio-temporelles » (Sanders, 2007). Dès les années 1950, l'individu est ainsi envisagé comme un élément d'un système spatio-temporel complexe dont le comportement dépend largement de son immersion dans ce système. Ces hypothèses sont rapidement transposées dans le domaine des études urbaines où l'individu, considéré comme un « agent », est conçu comme une sorte de variable explicative, notamment dans les approches économiques de la croissance urbaine.

Au niveau méthodologique, certaines techniques évoquent alors la simulation « par agents ». Ainsi, nombre d'intuitions théoriques conduisent au développement de la microsimulation à la fin des années 1950, qui est parfois interprété comme la genèse des modèles actuellement basés sur les agents. Il s'agit de modèles utilisés en sciences sociales et formalisés au niveau de l'individu ou du ménage. S'inscrivant dans un questionnement d'ordre macro-économique, ces modèles de microsimulation s'intéressent généralement aux comportements individuels des consommateurs et des entreprises, et obtiennent des résultats par agrégation des données simulées en fonction de certaines caractéristiques.

A la même époque, cette approche innovante est sous tendue par l'idée qu'« il est plus intéressant de saisir un changement de niveau macroéconomique comme émergeant à partir de comportements individuels qu'en recherchant des lois opérant au niveau macroscopique » (Sanders, 2007). La microsimulation se distingue toutefois de la modélisation individu-centrée sur de nombreux points : elle est inscrite dans le champ de la recherche en sciences sociales, et donc fortement ancrée thématiquement, au contraire des modèles agents. En outre, elle apparaît *a posteriori* moins comme un outil de compréhension que comme un simple outil de prédiction, traitant des individus mais non de leurs interactions, et ne prenant pas en compte leurs motivations ou leurs intentions. Néanmoins, au delà de ces différences, le lien de filiation semble manifeste : la microsimulation peut s'assimiler à un « parent » de la modélisation par agents. Aujourd'hui, les avancées récentes dans ce courant (souvent resté circonscrit au domaine des sciences sociales)

prennent en considération des concepts tels ceux d'espace ou de dynamique qui en sont souvent au cœur. Cependant, le dialogue quasi inexistant entre ces deux communautés scientifiques contribue à la pauvreté de certains échanges, alors même que leurs complémentarités semblent prometteuses.

4.2. La modélisation centrée sur l'individu

Dès les années 1970, la modélisation urbaine connaît un tournant qui voit la montée en puissance du paradigme systémique ou interactionniste, caractérisé par le développement de concepts tels que celui de système, d'individu, d'interaction ou de dynamique. A la même époque, les progrès informatiques vont permettre l'actualisation de la systémique à travers la mise au point de modèles centrés sur les individus (automates cellulaires, systèmes multi-agents). C'est l'émergence de la géosimulation.

Le développement des modèles centrés sur l'individu permet en effet de dépasser les limites techniques qui bridaient l'imagination des modélisateurs. Les progrès informatiques, en particulier l'augmentation des puissances de calcul, multiplient les possibilités des modèles qui peuvent aujourd'hui prendre en compte des milliers, voire des millions d'individus. D'un point de vue technique, les apports de la modélisation basée sur les agents sont alors nombreux. Tout d'abord, les possibilités de couplage avec des SIG sont facilitées, favorisant ainsi le traitement de données spatialisées. Cet apport dans l'approche spatiale de la modélisation individu-centrée constitue une avancée remarquable dans un domaine longtemps confronté à cette limite. Ensuite, les modèles individu-centrés présentent des spécificités tout à fait intéressantes par rapport aux modèles classiques qui reposent sur des hypothèses souvent plus fortes.

Les modèles classiques, notamment les modèles économiques, supposent que les agents aient des comportements rationnels et homogènes. C'est le paradigme de l'*Homo œconomicus*, représentation théorique du comportement de l'être humain, qui est à la base du modèle néoclassique en économie. Or, l'homogénéité d'un côté, et la rationalité de l'autre, ont toutes deux fait l'objet de critiques qui dénoncent leurs limites. J.M. Keynes (1931) par exemple, considérait qu'il n'est pas certain que les agents individuels soient rationnels et encore moins que la combinaison des décisions individuelles conduise à une situation collective optimale : « il n'est nullement correct de déduire des principes de l'économie politique que l'intérêt personnel est en général éclairé ; il arrive bien plus souvent que les individus agissant isolément

en vue de leurs propres objectifs particuliers soient trop ignorants ou trop faibles atteindre seulement ceux-ci. L'expérience ne démontre nullement que les individus, une fois réunis en une unité sociale, sont toujours moins clairvoyants que lorsqu'ils agissent isolément ».

Les modèles centrés sur l'individu permettent ainsi de dépasser en partie ces hypothèses simplificatrices, souvent stipulées pour contourner des limites techniques, et de prendre en compte un grand nombre d'individus, en « désagrégeant » les comportements de chacun d'entre eux si nécessaire. Associée à la dimension stochastique qu'elle permet plus facilement d'introduire, cette technique enrichit nettement la modélisation. Le parti pris est alors celui de l'émergence : elle s'impose comme l'un des concepts les plus intéressants des modèles systémiques en général, et des modèles centrés sur l'individu en particulier. Une propriété émergente apparaît dans ce contexte comme une propriété qui résulte de l'interaction d'entités de plus bas niveau, mais que l'on ne peut pas observer directement à propos de ces entités. Par exemple, T. Schelling (1978) a mis en évidence, à l'aide d'automates cellulaires, l'émergence d'un état de ségrégation socio-spatial sur un territoire initialement constitué d'habitants qui présentent individuellement une tendance à l'entre-soi très faible. Les modèles basés sur les agents permettent ainsi la découverte de phénomènes contre intuitifs au regard des comportements individuels. La ville est alors conçue comme le produit des interactions entre les différents individus qui l'habitent plus que comme celui de la seule somme des comportements individuels, qui seraient conçus comme indépendants les uns des autres.

Les modèles individu-centrés constituent donc l'aboutissement logique de la convergence entre une évolution théorique et une révolution technique. Le succès de ce type de modélisation apparaît de ce fait à la fois comme le produit et le moteur d'un renversement dans la façon de concevoir le milieu urbain.

4.3. Différentes conceptions de la ville

La deuxième moitié du 20e siècle voit ainsi nos conceptions de la question urbaine se modifier durablement. C'est cette évolution théorique que nous tentons d'interpréter au travers de l'histoire de la modélisation urbaine de ces cinquante dernières années.

4.3.1. La ville : un système auto-régulé

Les premières réflexions qui s'engagent sur la question urbaine laissent apparaître une conception de la ville comme un système auto-

régulé qui tendrait vers un certain équilibre. Ainsi, les premières tentatives de modélisation urbaine, nous l'avons vu, renvoient à une explication économique du fonctionnement de la ville. La prééminence de la pensée économique du 19^e siècle, qui structure la manière d'envisager les sociétés et la ville, expliquerait ce parti pris par les « premiers modélisateurs ». Les sciences économiques sont caractérisées par l'idée que les systèmes tendent vers l'équilibre. La ville conçue comme un système régi par l'économie n'échappe pas à la règle et la forme de la ville est bien envisagée comme le résultat d'un équilibre entre les logiques économiques des différents acteurs. Ainsi les modèles de Von Thunen ou d'Alonso proposent-ils finalement une explication de l'organisation urbaine comme produit des comportements économiques et rationnels des producteurs, des industries ou des ménages.

Dans les années 1970, les modèles (notamment ceux qui se fondent sur la dynamique des systèmes) proposent également une vision de la ville conçue comme une entité auto-organisatrice qui tend vers un équilibre souhaitable. Ainsi, le modèle de dynamique urbaine développé par J. Forrester (1969), repris et décliné depuis par de nombreux modélisateurs, conçoit la ville comme un système autorégulé : la mise en évidence d'un cycle économique « développement / dégradation » y conduit à envisager l'équilibre urbain comme la solution à la crise qui touche la plupart des villes américaines à son époque. Il s'agit donc pour les villes de chercher à atteindre un équilibre dans chacun des trois sous systèmes envisagés : la population, les logements et l'industrie.

Ici, la ville est donc d'abord conçue comme un système auto-régulé, qui tend vers un équilibre. Une meilleure compréhension de son fonctionnement est alors supposée permettre de mieux diriger l'action urbaine. La logique qui accompagne cette conception urbaine est de ce fait plutôt une logique « Top-Down » (du haut vers le bas), qui donne toute son importance et tout son poids à l'action publique, à la planification comme participant à la construction des villes. Cette approche qui met en avant la prise de la planification sur le développement urbain tend aujourd'hui à laisser sa place à une vision qui inverse ces rapports au profit d'une conception de l'organisation urbaine entendue comme le résultat de processus qui se produisent au niveau élémentaire. Il s'agit de l'approche dite « Bottom-Up » (du bas vers le haut).

4.3.2. Du « Top-Down » au « Bottom-Up »

Ce renversement, comme l'ensemble des avancées techniques et méthodologiques qui en découle, n'est pas sans incidence sur la portée théorique des modèles basés sur les agents. Il vient actualiser les théories interactionnistes latentes. L'essor de l'approche individu-

centrée semble contribuer fortement à un glissement vers une autre conception de la ville. De l'application des théories de la complexité et de la systémique à la question urbaine émergerait ainsi une conception de la ville vue comme un système complexe, constituée de nombreux sous-systèmes en interaction les uns avec les autres. Et notamment, la ville ne serait plus pensée comme le seul produit de la planification urbaine : son émergence en tant que ville serait plus globalement le résultat de la somme des actions individuelles et collectives qui y prennent place.

En d'autres termes, l'idée qui s'exprime ici est celle que les villes en général et le développement urbain en particulier, entendu au sens de la croissance des villes, est moins le fait de la logique « Top-Down » de la planification urbaine que celle d'un mécanisme « Bottom-Up. » Les formes spatiales observées à des échelles agrégées peuvent être lues comme le résultat des actions des acteurs à des niveaux très désagrégés, voire individuels. Les phénomènes urbains ne sont plus conçus comme le seul produit de l'action planificatrice des services en charge de l'urbanisme. Désormais, ils sont envisagés comme le résultat des multiples interactions entre les mécanismes économiques, démographiques, juridiques, sociaux, etc. Finalement, le développement des modèles « agents » contribuerait à mettre en évidence l'idée que nous sommes passés d'un urbanisme de plan, d'équipement du territoire à un urbanisme de gestion d'un territoire en perpétuelle reconfiguration : « L'urbanisme n'est plus l'art de 'faire' l'urbanisation, mais l'art de "faire avec" » (Castel, 2007). Cet ébranlement de la pensée a deux types de conséquences :

- d'une part, il oriente la recherche vers l'identification de « lois » qui gouverneraient l'évolution des systèmes urbains. Ce caractère nomothétique de la recherche urbaine est d'ailleurs parfois vivement critiqué ;
- d'autre part, en même temps que l'essor de la modélisation par agents met à mal les pratiques urbanistiques actuelles, elle fournit de nouvelles pistes d'action.

Dans ce contexte, la mise en évidence des limites de l'action publique sur l'organisation des territoires, loin de sonner le glas de l'urbanisme, appelle au contraire à une action mieux comprise. Les réflexions menées sur l'existence d'une boucle de rétroaction entre l'homme et le territoire invitent à une meilleure évaluation *a priori* des impacts des politiques publiques et orientent l'action vers la mise en place de combinaisons de mesures plutôt que de mesures isolées. La modélisation par agents illustre avec force la nécessité et le caractère

primordial de l'articulation entre les différentes actions sur le système urbain.

Ces idées contribuent à la naissance des modèles basés sur les individus et les agents en même temps que ceux-ci, en retour, fournissent un moyen d'appliquer et de tester ces théories. Ainsi, les progrès en informatique permettent le développement des automates cellulaires et des systèmes multi-agents qui constituent les deux principaux types de modèles individu-centrés. Cette approche, qui fait finalement la part belle à l'individu et à sa liberté d'action, entre en résonance avec les paradigmes qui dominent aujourd'hui nos sociétés. Ce rapprochement suggère qu'il existe un lien entre la pensée du monde, la pensée de la ville, et par suite, sa modélisation. Ainsi, pour N. Bouleau (2006), « les modèles sont des représentations partisans, au bon sens du terme, c'est-à-dire qu'au sein de multiples possibilités d'expression et de représentation, ils sont le choix d'un parti. [...] [Le modélisateur] n'est plus un mauvais scientifique, il est un constructeur de représentations pour agir et décider ». Aujourd'hui des approches mixtes se développent, qui tendent à dépasser les « apories de l'opposition entre holisme et individualisme » (Pumain, 2003).

4.3.3. *Une conception alternative ?*

Une lecture rapide de l'évolution de la modélisation urbaine pourrait laisser penser que la modélisation « Bottom-Up » l'emporte aujourd'hui sur les autres formes de formalisation et qu'elle représente le présent comme l'avenir de ce champ. Pour autant, certains éléments invitent à une lecture plus nuancée de cette histoire. Il semble en effet qu'à plusieurs niveaux, certains modèles développés récemment s'emploient précisément à interroger les spécificités de chacune de ces deux options, pour mieux tirer profit de leur rapprochement. Ainsi, si le développement des modèles individu-centrés permet la pleine actualisation du paradigme interactionniste dans le champ de la modélisation urbaine, il semble important de dépasser l'opposition radicale entre les modèles centrés sur l'individu et les autres modèles systémiques. Au delà des différences fondamentales qui existent entre ces deux types de modélisation, chacun s'inscrit en réalité dans une même perspective systémique. Ce qui les distingue renvoie plus fondamentalement à l'existence de deux courants (Tannier, 2005) :

– l'analyse de systèmes vue sous l'angle de transfert de flux entre différents éléments, flux qui peuvent être très divers (matière, énergie, information, argent, etc.) : le système est alors le plus souvent considéré comme un ensemble de sous-systèmes interconnectés. Cette approche est essentiellement basée sur les notions de régulation, de

stabilisation et de fonctions de transfert. L'intérêt est marqué ici pour la définition de la structure des systèmes ;

– les approches centrées sur les systèmes définis comme des entités auto-organisatrices, dont le fonctionnement et l'évolution est le produit du comportement d'ensemble d'entités en interaction. Il s'agit d'une approche basée sur l'analyse du comportement d'agents interagissants, l'action et l'interaction étant considérées comme les éléments moteurs de la structuration d'un système dans son ensemble.

Comme le souligne L. Sanders (2007), l'utilisation de ces modèles n'implique pas *a priori* une modélisation au niveau des individus. Le recours à la modélisation par agents se justifie lorsque la problématique concerne un phénomène collectif dont on suppose qu'il émerge en fonction d'interactions opérant au niveau élémentaire. Mais « en aucun cas il n'implique de considérer l'agent comme représentant nécessairement un individu humain, même si toute la terminologie des SMA [Systèmes multi-agents] est largement anthropomorphe ». Des modèles récemment mis au point proposent de travailler au niveau de groupes d'individus présentant des caractéristiques similaires, ces groupes étant considérés comme les « agents » de la simulation. La modélisation individu-centrée apparaît donc finalement comme un simple outil complémentaire offrant de nouvelles possibilités de simulations à un niveau agrégé.

Les allers-retours sont ainsi de plus en plus fréquents entre les différents niveaux de modélisation. En d'autres termes, le niveau de l'individu reste aujourd'hui le niveau privilégié de la modélisation, mais il est de plus en plus pensé en relation avec des niveaux plus globaux (celui du groupe d'agents par exemple) qui semblent plus pertinents pour l'étude de certaines problématiques. Le modèle SIMBOGOTA, par exemple, s'intéresse à l'étude des relations entre les dynamiques du système urbain et l'organisation spatiale qui en découle et les méthodes d'analyse de ces relations. Ce qui intéresse plus particulièrement les modélisateurs ici est « de repérer, d'identifier et d'expliquer les liens qui existent entre le niveau micro de l'individu (son comportement, ses caractéristiques, ses motivations...) et le niveau macro, qui révèle une configuration générale de la ville, avec ses territoires en constante constitution. » L'objectif de la démarche est bien l'explicitation des relations entre les différents niveaux de perception de l'espace et d'action dans l'espace.

En second lieu, la prise en compte croissante des interactions entre espace et société est caractéristique des modèles les plus récents. La démarche mise en œuvre dans ces modèles ne consiste plus « simplement » à faire émerger la configuration spatiale à partir de l'ensemble

des comportements individuels. Ils s'attachent désormais à prendre en compte les boucles de rétroaction qui existent entre l'espace et la société : les comportements individuels contribuent alors à organiser l'espace, et en retour, la configuration spatiale influence ces comportements. A. Ourednik (2007) s'intéresse précisément à cette question dans un modèle qu'il développe pour mieux comprendre les mécanismes de ségrégation socio-spatiale.

Enfin, on voit également se développer de plus en plus de modèles qui intègrent des comportements stochastiques et qui laissent une place importante à l'aléa et au hasard. Paradoxalement, ils donnent de plus en plus de place à l'action publique et à l'impact de la planification. C'est donc bien au développement de modèles qui croisent les approches « Top-Down » et « Bottom-Up » que nous assistons aujourd'hui.

CONCLUSION

La modélisation, en tant que représentation simplifiée de la ville et de son fonctionnement, est finalement une notion relativement ancienne, même si sa théorisation et sa mise en pratique ne s'affirment que plus tardivement. Les modèles se distinguent selon leurs finalités et selon les disciplines au sein desquelles ils situent leurs réflexions. Dans ce trop bref historique de la modélisation urbaine, l'émergence de la systémique constitue le fait marquant de la deuxième moitié du 20^e siècle. Tant par les concepts qu'elle développe et qu'elle diffuse que par les pratiques qu'elle contribue à renouveler, appelant notamment les chercheurs à l'interdisciplinarité, la pensée systémique provoque un véritable tournant dans le domaine de la modélisation de la ville et de ses politiques de transport. A l'heure actuelle, la multiplicité des types de modèles et des courants dans le domaine de la modélisation systémique de la ville est remarquable. Elle reflète différentes conceptions du fonctionnement des systèmes urbains. Finalement, il apparaît que la modélisation, conçue comme un « produit mixte » (Bouleau, 2006), est largement influencée par la pensée dominante d'une époque. L'histoire de la modélisation urbaine est bien inscrite dans un contexte plus large, avec lequel elle est nécessairement partie prenante.

Références bibliographiques

- Allen P.M., Sanglier M., 1979, A dynamic model of growth in a central place system, *Geographical Analysis*, 11, pp. 256-272.
- Antoni J.P., 2009, *Lexique de la ville*, Ellipses.
- Aracil J., 1984, *Introduction à la dynamique des systèmes*, Presses Universitaires de Lyon.
- Ascher F., 2001, *Nouveaux principes de l'urbanisme*, Ed. de l'Aube.
- Batty M., 2005, *Cities and complexity*, MIT Press.
- Bouleau N., 2006, *Philosophie des mathématiques et de la modélisation : du chercheur à l'ingénieur*, L'Harmattan.
- Castel J.C., 2007, *Quand la mobilité oblige à repenser l'urbanisme*, Conseil Français des Urbanistes, 17 p.
- Christaller W., 1933, 1977, *Central places in Southern Germany*, Prentice Hall, 229 p.
- Donnadieu G., Karsky M., 2002, *La systémique, penser et agir dans la complexité*, Liaisons.
- Dubois-Taine G., Chalas Y., 1997, *La ville émergente*, Ed. de l'Aube.
- Forrester J., 1979, *Dynamique urbaine*, Economica.
- Frankhauser P., 1994, *La fractalité des structures urbaine*, Anthropos.
- Fujita M., 1989, *Urban economic theory. Land use and city size*, Cambridge University Press.
- Fujita M., Thisse J.F., 2003, Globalization and the evolution of the supply chain : who gains and who loses ?, *Working Paper*, 571, Institute of Economic Research, Kyoto University.
- Hägerstrand T., 1953, *Innovation diffusion as a spatial process*, University of Chicago Press.
- Keynes J.M., 1931, *Essais sur la monnaie et l'économie. Les cris de Cassandre*, Payot.
- Le Berre M., 1987, *De l'induction à la modélisation systémique en géographie*, Thèse d'Etat, Université de Franche-Comté, 560 p.
- Le Moigne J.L., 1979, *La théorie du système général*, Presses Universitaires de France.
- Morin E., 1990, *Introduction à la pensée complexe*, Seuil.
- Ourednik A., 2007, Mécanismes rétroactifs de ségrégation entre une société urbaine et son espace : un modèle basé agents, *Revue internationale de géomatique*, 17, 2, pp. 183-206.
- Pumain D., Robic M.C., 2002, Le rôle des mathématiques dans une « révolution » théorique et quantitative : la géographie française depuis les années, *Revue d'histoire des Sciences Humaines*, 6, pp. 123-144.
- Pumain D., Sanders L., Saint-Jumien T., 1989, *Villes et auto-organisation*, Economica.
- Pumain D., 2003, *Une approche de la complexité en géographie*, *Géocarrefour*, 78, 1, mis en ligne le 23 mai 2007. URL : <http://geocarrefour.revues.org/index75.html>, consulté le 08 avril 2010.
- Ravenstein E.G., 1885, 1989, The laws of migration, *Journal of the Royal Statistical Society*, 48.
- De Rosnay J., 1975, *Le macroscope, vers une vision globale*, Seuil.
- Sanders L., 1992, *Systèmes de villes et synergétique*, Anthropos.

- Sanders L., 2007, Objets géographiques et simulation agents, entre thématique et méthodologie, *Revue internationale de géomatique*, 17, pp. 135-160.
- Schelling T.C., 1978, *Micromotives and macrobehaviour*, Norton and Co.
- Sieverts T., 2001, *Entre-ville, une lecture de la Zwischenstadt*, Parenthèses.
- Simon H., 1974, *La science des systèmes, science de l'artificiel*, EPI Editeurs.
- Tannier C., 2000, *La dynamique des localisations commerciales de détail en milieu urbain*, Thèse de doctorat en géographie, Université de Franche-Comté, 334 p.
- Vilmin T., 1999, *L'aménagement urbain en France, une approche systémique*, CERTU.
- Von Bertalanffy L., 1950, *Théorie générale des systèmes*, Dunod.
- Weber A., 1929, *Theory of location of industries*, University of Chicago Press.
- Wegener D.T., 1994, Operational urban models : state of the art, *Journal of the American Planning Association*, 60, 1, pp. 17-30.
- Weidlich W., Haag G. (ed.), 1988, *Interregional migration. Dynamic Theory and Comparative Analysis*, Springer. White R., Engelen G., 1993, Cellular automata and fractal urban form : a cellular modelling approach to the evolution of urban land-use patterns, *Environment and Planning A*, 25, 8, pp. 1175-1199.

CHAPITRE 2

MOBISIM : UN MODÈLE MULTI-AGENTS ET MULTI-SCALAIRE POUR SIMULER LES MOBILITÉS URBAINES

Jean-Philippe Antoni
Gilles Vuidel

Laboratoire ThéMA
UMR 6049 CNRS – Université de Franche-Comté
32 rue Mégevand – F25000 Besançon
jean-philippe.antoniuniv-fcomte.fr

Le projet MOBISIM (simulation des mobilités) vise à modéliser différentes dynamiques à différentes échelles pour simuler la complexité des mobilités quotidiennes et résidentielles, sur l'espace d'une aire urbaine. MOBISIM apparaît ainsi comme une plateforme de simulation pour l'étude prospective des mobilités dans les agglomérations françaises et européennes, en lien avec leur développement et leur aménagement. Cette plateforme prend concrètement la forme d'un programme informatique qui se base sur plusieurs modèles. Elle permet ainsi de coupler une approche centrée sur les choix et les comportements individuels à une évaluation de ces comportements sur le trafic et les déplacements quotidiens, et à la création de logements, l'expansion ou l'étalement urbain qui peuvent s'y associer. Les différents champs de développement identifiés aujourd'hui concernent ainsi avant tout les problématiques de l'étalement urbain, de la gestion du trafic et des déplacements, des nuisances et des pollutions engendrées, de la consommation énergétique urbaine, des stratégies des acteurs et des choix modaux de déplacements, pour lesquels MOBISIM apparaît comme un outil collaboratif d'aide à la décision.

Le présent article ne vise pas à décrire formellement le modèle MOBISIM et son fonctionnement, mais à rappeler l'origine de ce projet en précisant les principes originaux de la modélisation proposée. Dans une première partie, nous rappelons l'historique et les choix de modélisation spécifiques à MOBISIM pour simuler les

mobilités urbaines, avant d'insister sur la prise en compte nécessairement multiscalaire des processus modélisés (partie 2), puis sur le couplage de modèles mis en œuvre pour y parvenir (partie 3). Dans la deuxième et la troisième partie, des exemples portant sur la Communauté d'agglomération de Besançon (qui constitue le terrain d'étude privilégié du modèle) illustrent les possibilités concrètes de MOBISIM, et présentent un certain nombre de résultats indiquant successivement comment l'espace et les populations sont pris en compte avec leurs différentes caractéristiques, comment les mobilités quotidiennes sont modélisées (à travers l'exemple de la population active et des migrations domicile-travail), et comment la question des mobilités résidentielles et de l'étalement urbain, fortement appuyée sur la logique des automates cellulaires, est abordée.

1. HISTORIQUE ET OBJECTIFS DU MODÈLE

Les modèles de simulation informatique permettent aujourd'hui une approche renouvelée pour la prise en compte des systèmes et des processus complexes en sciences sociales (Gilbert et Troitzsch, 2005). Ils s'appuient généralement sur la théorie de la complexité, qui leur fournit un cadre théorique relativement neuf (Morin, 1990). En particulier, les modèles issus de l'intelligence artificielle distribuée, notamment les Systèmes multi-agents (SMA) et les Automates cellulaires (AC), permettent désormais de visualiser *in vitro* tout ou partie des conséquences d'interactions multiples menées par des acteurs et des agents qui collaborent virtuellement à la mise en œuvre de politiques dont les conséquences ne sont pas identifiables *a priori*.

1.1. Historique de MOBISIM

Au regard du système complexe que constitue une agglomération ou une aire urbaine, les modèles de simulation présentent aujourd'hui un intérêt majeur dans le domaine de l'urbanisme et de l'aménagement du territoire, comme en témoigne l'émergence des modèles LUTI (*Land-Use and Transport Integrated models*) (Wegener, 2004). Ils permettent en effet la « mise en mouvement » des processus de décision complexes, associés à des acteurs de la ville très différents (édiles, techniciens, habitants, usagers), dans une situation d'incertitude importante. Au travers de la modélisation des décisions prises par ces acteurs, ils s'apparentent à un outil d'aide à la décision qui, de plus en plus, peut s'associer

à une démarche prospective d'accompagnement¹ : les simulations permettent de visualiser les conséquences d'actions menées sur les territoires et par rétroaction, de faire réagir les acteurs locaux quant à la portée des décisions qu'ils prennent. Dès son origine en 2000², le projet MOBISIM a été associé à cette démarche prospective d'aide à la décision. D'abord influencé par les apports remarquables de la dynamique des systèmes, le programme s'est rapidement enrichi des nouvelles possibilités offertes par les SMA, en particulier par l'approche individu-centrée que ces systèmes permettent de mieux simuler.

Depuis sa création, la plate-forme MOBISIM a également fait l'objet de différents types de financements, associant des partenaires porteurs d'innovations dans le domaine de l'urbanisme, des mobilités et de l'énergie. Les subventions de la DRAST, puis de la Direction de la Recherche et de l'Innovation (DRI, MEDDMM)³ et de l'Ademe (Agence pour le développement et la maîtrise de l'énergie), les deux acteurs institutionnels phares du projet MOBISIM qui font actuellement toujours partie des principaux partenaires, ont constitué un apport majeur. Parallèlement à ces financements institutionnels, plusieurs études, concernant notamment les champs de la mobilité quotidienne et de la dynamique de la population, ont permis des développements plus spécifiques, en collaboration avec des acteurs du territoire. De par les thématiques qu'elles questionnent quotidiennement, les agences d'urbanisme (notamment celle de Rennes et de Brest) ont ici joué un rôle tout à fait central, et sont rapidement apparues comme des partenaires privilégiés des développements du programme, tant par les problématiques de recherche qu'elles ont pu initier, que par les données qu'elles ont pu apporter, dont la confrontation aux réalités du terrain a permis de valider, au moins partiellement, certains aspects de la modélisation, ou à l'inverse d'ouvrir de nouveaux champs de recherche. C'est sur cette base que le programme est développé par le laboratoire ThéMA⁴ depuis 2008.

1. L'approche de modélisation dite d'accompagnement est, par exemple, décrite dans la charte ComMod et traduit « une certaine éthique du processus de modélisation ». Voir le site : <http://cormas.cirad.fr/ComMod>.

2. De 2000 à 2007, MOBISIM a été développé par l'entreprise française ATN (Application des Techniques Nouvelles) dirigée par Philippe Casanova.

3. La DRI (Direction de la Recherche et de l'Innovation) a pour mission, au sein du Ministère, de promouvoir et de définir les orientations de l'Etat concernant la recherche et de l'innovation, notamment dans le champ de l'aménagement du territoire.

4. En plus des partenaires institutionnels, le développement de MOBISIM est aujourd'hui également encadré par un comité de pilotage et un réseau d'experts regroupant des chercheurs et des techniciens du CERTU (Centre d'études sur les réseaux, les transports, l'urbanisme et les constructions publiques), de l'INRETS (Institut national de recherche sur les transports et leur sécurité), et du LET (Laboratoire d'économie des transports, Université de Lyon). Voir le site : www.MOBISIM.org

Toutefois, ces développements successifs ont conduit au développement d'un modèle opérationnel, dont le fonctionnement, la prise en main et le paramétrage se sont avérés de plus en plus complexes, et se sont accompagnés de temps de calcul de plus en plus longs, réduisant au fur et à mesure les possibilités de simulations concrètes. Dans ce contexte, une simplification du programme s'est avérée nécessaire ; elle a conduit à sa refonte quasiment complète dans une nouvelle architecture logicielle (permettant notamment le calcul parallèle), et un langage de programmation plus souple et plus adapté (Java). Cela étant, cette refonte n'a pas porté que sur les acquis du modèle ; elle en reprend certes les grandes lignes, mais ajoute une dimension théorique supplémentaire en implémentant dans le programme une prise en compte cellulaire et multi-scalaire de l'espace géographique, fortement appuyée sur la logique des automates cellulaires, ce qui constitue une nouveauté et une évolution originale du programme, influençant naturellement les possibilités de modélisations auxquelles il peut conduire.

1.2. Contexte

Le territoire urbain constitue un système complexe par excellence (Batty, 2005). Plus particulièrement, les interactions entre le territoire d'un côté (conçu comme un ensemble de structures et de potentiels sur lesquels se localisent des réseaux et des moyens de transport), les actions et les comportements des acteurs de l'aménagement de l'autre côté (ménages, entreprises, acteurs institutionnels, etc.) forment un système dont la complexité n'a de cesse de poser des défis aux chercheurs. Les interactions entre la modification de la structure territoriale et les comportements dont elle est la toile de fond sont au cœur des questions de mobilité urbaine. Dans ce contexte, il importe de concevoir l'espace géographique des villes comme un système à la fois organisé et organisant, qui s'inscrit dans le schéma systémique d'une géographie mettant en évidence les interactions complexes entre éléments spatiaux et éléments anthropiques, considérant réciproquement non seulement le rôle exercé par l'espace sur l'action de la société, mais également les processus de transformation territoriale que la société produit. Cette conception de l'espace présente alors la planification et l'aménagement du territoire simultanément comme un acte réfléchi de production d'espace, mais aussi comme le résultat de l'utilisation collective qu'en font les usagers (Ascher, 2001). C'est dans ce contexte réflexif que les aménageurs et les urbanistes sont amenés à prendre des décisions, sur la base de ce qu'ils comprennent du territoire et de la manière dont il fonctionne.

Afin de tenir compte de cette complexité et du caractère réflexif des processus à modéliser, les modèles « classiques », même parmi les plus sophistiqués, n'apportent souvent que des réponses partielles : l'excellence qu'offre chacun dans un domaine s'accompagne souvent d'une carence dans un autre. Pour pallier ce problème, certains auteurs (Antoni, 2006 ; He, 2006) ont proposé de coupler plusieurs modèles, chacun répondant à une question spécifique du champ urbain modélisé. Pour des raisons identiques, MOBISIM se base sur trois modèles offrant des fonctionnalités très spécifiques, en l'occurrence un modèle d'agents, couplé à un automate cellulaire et à un modèle de transport à quatre étapes. La principale difficulté de ce type de modélisation « emboîtée » ou « combinée » réside dans la cohérence qui doit être mise en place entre les modèles, à la fois sur le plan théorique (que signifie cette association au regard de la problématique envisagée et des concepts qu'elle met en œuvre ?) et sur le plan technique (comment faire cohabiter les modèles dans une même logique informatique ?). Logiquement, ce n'est donc qu'après que les processus à modéliser ont été clarifiés que les modèles requis peuvent être identifiés, et leur cohérence assumée, d'une manière ou d'une autre. Cette logique contribue toutefois à positionner la modélisation comme le dernier jalon d'une chaîne plus complète et à la faire apparaître comme l'aboutissement technique et formalisé d'une réflexion théorique préalable sur les concepts et les notions qu'il s'agit à la fois d'identifier, de hiérarchiser et de relier.

1.3. Hypothèses et spécificités du programme MOBISIM

Dans le domaine scientifique, les modèles de simulations auxquels MOBISIM peut s'assimiler (on peut par exemple citer les modèles UrbanSim⁵ et Miro⁶, ou encore le projet européen Propolis⁷ qui s'en rapproche en plusieurs points) connaissent un certain succès, dans la mesure où la représentation du monde qu'ils proposent tend à s'approcher de plus en plus de la réalité de la mobilité ou du fonctionnement

5. URBANSIM est un programme de simulation implémentant un modèle intégré de transport et d'occupation du sol. Les prédictions qu'il propose dépassent ainsi le simple champ de l'analyse de transport, pour donner des résultats concernant l'expansion et l'évolution de la forme de la ville. Voir le site : www.urbansim.org

6. Le projet MIRO (Modélisation Intra-urbaine des Rythmes quOtidien) a fait l'objet d'une recherche Predit (Programme National de Recherche et d'Innovation dans les Transports Terrestres) de 2004 à 2007 ; il est présenté dans le chapitre 7 de cet ouvrage.

7. Le projet PROPOLIS (*Planning and Research of Policies for Land Use and Transport for Increasing Urban Sustainability*) a été financé par le 5e programme cadre de l'Union européenne. Il a consisté à développer et tester des politiques intégrées de planification spatiale et de transport, de manière à évaluer leurs effets sur la durabilité des grandes aires urbaines européennes.

des systèmes urbains, du moins telle qu'elle est observée. L'originalité de la démarche initiée par le projet MOBISIM semble toutefois résider dans la prise en considération, en matière de mobilités, des facteurs clés des comportements des individus, considérés au niveau élémentaire de la personne ou du ménage. En particulier, la modélisation basée sur les SMA autorise une prise en compte de plus en plus fine des comportements individuels, à un niveau micro.

Par ailleurs, le caractère dynamique de ce type de modélisation permet d'en observer l'évolution dans le temps et donc de construire un certain nombre de simulations et de scénarios prospectifs, basés sur une connaissance approfondie des choix et des décisions dans l'usage des espaces urbains et périurbains. De ce fait, la problématique du projet MOBISIM est indissociable du projet ANR ECDESUP⁸, également porté par le laboratoire Théma de Besançon. L'objectif du projet pluridisciplinaire ECDESUP consiste en effet d'une part à mieux connaître les critères qui incitent des ménages à choisir un quartier pour y vivre ou, au contraire, à le quitter, mais également à mieux appréhender les pratiques spatiales quotidiennes qui influencent le choix résidentiel (quand et pour quelles raisons certains lieux sont-ils fréquentés ou évités ?), et finalement à développer une approche théorique interdisciplinaire du choix et de la décision. Le projet ECDESUP se compose de trois phases : le recueil d'information sur les comportements, les perceptions et les attitudes des individus ; la modélisation de l'évaluation, du choix et de la décision ; la simulation de l'émergence des tissus périurbains à travers un modèle comportemental. Ainsi, si Ecdesup apporte des bases théoriques et conceptuelles consolidées et validées dans plusieurs disciplines, MOBISIM apparaît comme l'un de ses aboutissements en offrant une plateforme de simulation et de tests de scénarios.

Les choix spatiaux figurent ainsi au cœur de la modélisation urbaine. Ils agissent simultanément sur les localisations résidentielles (à long terme) et les mobilités quotidiennes (à court terme). De ce fait, les liens entre organisation territoriale et système de transports ne sont pas considérés de manière linéaire, mais s'inscrivent dans des temporalités et des échelles très différentes, qu'il s'agit de prendre en compte dans le cadre plus formel qu'impose la modélisation envisagée.

8. Le projet ANR (Agence Nationale de la Recherche) ECDESUP (Évaluation du choix et de la décision dans les espaces urbains et périurbains) est porté par le laboratoire Théma sous la responsabilité de P. Frankhauser, pour une période de quatre ans, à partir de 2007. Voir le site : www.ecdesup.org.

2. DES DYNAMIQUES À DIFFÉRENTES ÉCHELLES

D'évidence, les différentes problématiques sur lesquelles focalise le projet MOBISIM, de même que la complexité émergeant de leurs interactions, ne se lisent pas à la même échelle, qu'il s'agisse de l'échelle spatiale (elles n'ont ni la même granulométrie, ni les mêmes répercussions spatiales) ou de l'échelle temporelle (elles n'ont pas la même durée, ni de manière intrinsèque, ni de par les conséquences qu'elles engendrent).

2.1. Échelle temporelle : du jour à l'année

Concernant l'échelle temporelle, les deux types de mobilités étudiées (mobilité quotidienne et mobilité résidentielle) sont de nature différente. La première correspond à une pratique journalière que l'on considère, dans MOBISIM, comme redondante à l'échelle hebdomadaire : le programme d'activité d'un ménage est alors globalement considéré comme identique pour tous les jours de la semaine (en lien avec les activités professionnelles) et se traduit par une mobilité qui se répercute chaque jour de la même manière. Cette option de base, mise en place dès le départ du projet MOBISIM, constitue certes une simplification importante des activités et des pratiques spatiales des individus, mais elle permet de prendre en compte la majorité des motifs et des flux de déplacements identifiés au sein des aires urbaines, en lien notamment avec différents facteurs sur lesquels des possibilités de levier existent : la localisation des activités, les plans de déplacements, les politiques de transport en commun, etc. La temporalité des mobilités quotidiennes se situe donc bien au niveau de la journée (cette journée correspondant à une journée-type), bien que, par simplification, elle traduise un comportement hebdomadaire. Compte tenu de l'évolution du contexte, notamment de la diminution du temps de travail et de l'augmentation des temps de loisirs (Dubois-Fresney, 2006), cette simplification pourrait rapidement évoluer vers un rythme hebdomadaire défini par trois journées-types distinctes, engendrant des comportements eux aussi distincts : les jours de travail (qui correspondent globalement à une période d'emploi, d'école ou d'université pour tous les membres du ménage), les jours de loisir partiel (une partie du ménage vaque à d'autres occupations, c'est typiquement la journée du mercredi), les jours de loisirs (l'ensemble du ménage est libéré, du moins en théorie).

La temporalité des mobilités résidentielles est quant à elle beaucoup plus délicate à formaliser car elle n'est pas liée à un programme d'activités identifiable *a priori*. *A contrario*, elle met en jeu une série de

critères difficiles à saisir parmi lesquels la satisfaction des ménages, les offres immobilières et locatives, mais également les possibilités de chacun d'envisager un déménagement, etc.). Les critères interviennent avec des forces inégales et difficiles quantifier. Dans tous les cas, les résultats des choix individuels associés mènent à un ensemble de migrations résidentielles qui ne se visualisent pas au jour le jour (Tannier et Frankhauser, 2001). Elles peuvent par contre faire l'objet d'un comptage annuel, qui constitue une seconde unité de mesure temporelle dans MOBISIM. Les années peuvent ensuite s'agréger en décennies qui constituent autant de temporalités pertinentes selon l'étude prospective envisagée.

Toutefois, si les temporalités des mobilités quotidiennes et résidentielles sont fondamentalement différentes, elles ne sont pas indépendantes. Elles peuvent au contraire être considérées comme fortement liées, la première influençant la seconde, et inversement. Cette interdépendance a d'ailleurs été schématisée par le rapport Propolis⁹, selon une logique qui correspond à celle que nous décrivons ici :

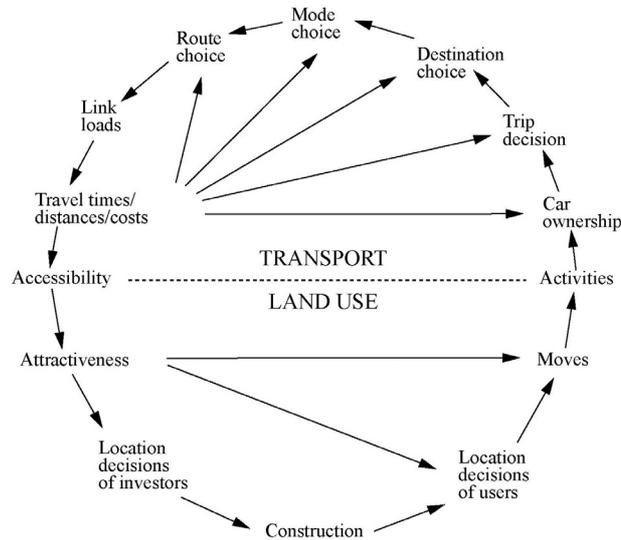
Ainsi, il devient possible de considérer les migrations quotidiennes comme l'un des critères déterminant le déménagement d'un individu ou d'un ménage. Pourquoi, par exemple, ne pas envisager un déménagement si celui-ci permet de réduire les trajets domicile-travail quotidiens, et donc également de réduire le budget consacré aux déplacements, et d'améliorer la qualité de la vie des ménages en substituant des temps de transport à des temps de loisir possibles ? Il apparaît donc plus clairement que l'échelle temporelle de considération des processus, dans MOBISIM, est une échelle quotidienne, partiellement résumée au niveau hebdomadaire, mais que la résultante globale des choix et des décisions liés à ces processus est visualisée à l'échelle annuelle (cette seconde échelle étant de surcroît plus en phase avec les temporalités du monde de l'urbanisme et de ses acteurs).

2.2. Échelle spatiale : de la parcelle à l'aire urbaine

La prise en compte de l'échelle spatiale de MOBISIM pose quant à elle une seconde série de questions, dont certaines, liées au champ de la modélisation d'accompagnement et des démarches collaboratives de partage d'information et de savoir, ont fait l'objet de nombreuses publications, notamment dans le domaine des ontologies spatiales

9. PROPOLIS (*Planning and Research of Policies for Land Use and Transport for Increasing Urban Sustainability*), Rapport final, 2004. Projet financé par la Commission européenne, thématique Energie, Environnement et Développement durable du 5^e PCRD.

Figure 1

Interactions Transport / Urbanisation : des logiques temporelles différentes

Source : PROPOLIS (2004)

(Fonseca *et al.*, 2000, Golledge, 2002). L'émergence forte de ce type de démarche soulève en effet deux problèmes liminaires, liés à la nature même des travaux collaboratifs envisagés. D'une part, il importe que l'ensemble des acteurs s'accorde sur une définition de l'espace sur lequel ils travaillent et sur la manière avec laquelle cet espace fonctionne, afin de pouvoir exprimer clairement les modalités qu'ils voudraient y voir simulées. D'autre part, il importe également que la compatibilité des différentes simulations, possiblement mises en œuvre par différents modèles soit respectée, afin que les résultats des premiers puissent enrichir les données des seconds et que l'ensemble des recherches qui naissent souvent de champs disciplinaires différents, trouvent *in fine* leur complémentarité autour d'avancées concrètes. Or, si le principe peut paraître trivial, sa mise en œuvre n'est pas simple car, d'une part, les processus simulés n'interviennent pas tous à la même échelle (la politique d'une agglomération n'est pas celle d'un quartier) et, d'autre part, ils peuvent faire l'objet de ruptures qui demandent de passer d'un espace discret à un espace continu (c'est le cas par exemple, de certaines barrières foncières, matérialisées par une frontière nationale ou par une politique fiscale différente d'une commune à une autre). Pour pallier ce problème, MOBISIM propose de représenter l'espace géographique selon trois niveaux différents cor-

respondant chacun à une échelle, au sein desquelles une conception cellulaire de l'espace permet de simuler relativement aisément le passage d'un processus continu à un processus discret : le niveau global, le niveau zonal et le niveau cellulaire.

1. Le niveau dit global est le niveau du système d'étude complet, c'est-à-dire de l'aire urbaine étudiée dans sa totalité. C'est à cette échelle (la plus grande) que sont traités les scénarios démographiques et macro-économiques globaux (en entrée), et que sont calculés les indicateurs de performance globale de la mobilité urbaine (en sortie). Ceci nécessite l'identification des échanges et des relations existant (ou estimés) entre l'aire urbaine et le « monde extérieur », qui permettent de qualifier les évolutions probables de la mobilité urbaine (interactions au quotidien entre les personnes qui habitent à l'extérieur de l'aire urbaine et qui travaillent ou transitent par l'aire urbaine), et de la population de l'aire urbaine (échanges migratoires qu'il faut prendre en compte dans les scénarios de simulation).

2. Le niveau dit zonal est celui des îlots (ou zones) constituant le centre du modèle : c'est sur ce découpage que les variables d'état du modèle évoluent. Le niveau zonal apparaît alors comme l'échelle à laquelle se localisent les ménages et les entreprises (agents dynamiques), où s'effectuent les déplacements quotidiens (intrazones ou interzones). Chaque zone correspond à une entité géographique pour laquelle on possède des données statistiques cohérentes avec le degré de finesse de description du modèle. Dans le cadre d'applications à des agglomérations françaises, la zone est le plus souvent équivalente à une zone IRIS ou à un regroupement de zones IRIS. Les ménages et les entreprises analysent leur choix de localisation en fonction des caractéristiques de ces zones et de leurs préférences.

3. Le niveau dit cellulaire (celui des cellules géographiques¹⁰) correspond enfin au découpage géographique le plus fin du territoire et contient les informations désagrégées concernant les ménages et les entreprises, mais également l'occupation du sol qui procure un certain nombre d'aménités à ces ménages et ces entreprises. Toutefois, cette désagrégation, effectuée à partir du niveau supérieur (niveau zonal) reste « anonyme » : l'objectif n'est pas de connaître les localisations des ménages individuels, mais de quantifier le nombre de ménages par cellule afin, entre autres, d'évaluer combien sont exposés directement à la pollution automobile, ou combien se localisent à proximité d'un

10. Le maillage est constitué d'un réseau régulier de cellules carrées dont la taille est variable (de 500 à 50 m de côté), en fonction de la qualité des informations d'occupation du sol recueillies sur l'aire urbaine étudiée.

parc leur procurant un cadre de vie spécifique. L'objectif de l'introduction d'un maillage cellulaire fin est triple : (i) simuler la dynamique de l'occupation du sol (dans le but notamment de tester l'impact des différents scénarios sur le processus d'étalement urbain, une cellule « non-bâti » pouvant devenir « bâti » si certains ménages décidaient de s'y installer), (ii) Estimer l'offre de logements au niveau de la zone en fonction de l'occupation du sol définie dans chaque maille, (iii) estimer les impacts sociaux et environnementaux de la mobilité urbaine. La dynamique d'occupation du sol est ainsi simulée par un modèle qui s'assimile aux automates cellulaires et plus généralement aux modèles LUCC (*Land Use and Cover Changes*).

Les trois niveaux (global, zonal, cellulaire) ne fonctionnent évidemment pas de manière indépendante, mais sont liés par différents opérateurs : opérateurs de ventilation (pour passer, par exemple, des données connues à l'échelle de la zone vers chaque cellule, avec une pondération en fonction de l'occupation du sol de chaque cellule), et opérateurs d'agrégation (sommant, par exemple, l'offre immobilière de chaque cellule pour quantifier l'offre à l'échelle de la zone). Cette imbrication des échelles n'existe pas uniquement pour l'espace : elle peut aussi être considérée pour la population qui, au niveau le plus fin, est considérée à travers les individus. Ces derniers possèdent alors des caractéristiques individuelles qui leur sont propres (sexe, âge, niveau de revenu, profession, zone de résidence, etc.)¹¹, qui permettent de les regrouper en différentes cohortes (jeunes, vieux, voisins, corps de métiers, classes sociales, etc.). Au dernier niveau, l'ensemble de la population est agrégé et associé aux caractéristiques connues à l'échelle de la ville ou de la région entière.

Afin d'illustrer le principe de cette ventilation multiscalaire, prenons l'exemple de la répartition de la population et des logements au sein de la Communauté d'agglomération de Besançon. A partir d'informations recensées par l'INSEE à l'échelle des IRIS, on cherche à répartir les logements plus finement, au sein de cellules de 100 mètres de côté, qui couvrent la totalité du terrain d'étude. Les logements

11. Comme c'est aussi le cas pour le projet MIRO, cette considération individuelle de la population, sous forme d'agents, se heurte au problème des données disponibles en France, où nous ne disposons pas d'informations sur les individus à proprement dit, compte tenu d'un choix déontologique national visant à rendre impossible toute traçabilité individuelle, imposé par la CNIL (Commission nationale de l'informatique et des libertés). Comme dans le projet MIRO, le niveau individuel ne peut donc être qu'approché par la construction d'une population dite « synthétique », à laquelle correspondent les attributs de la populations réelle au niveau global, mais pas nécessairement au niveau individuel. Dans MOBISIM, la répartition de ces attributs au sein des agents est obtenue par une série de probabilités conditionnelles, et la construction des ménages par l'algorithme hongrois de Khun-Munkres. Ces aspects méthodologiques, qui constituent un pan du projet MOBISIM à part entière, ne sont pas développés ici.

(comme la population) ne peuvent évidemment être associés qu'aux espaces bâtis, et plus spécifiquement aux espaces résidentiels, que les données disponibles auprès de l'IGN (en l'occurrence la BD TOPO®) permettent de localiser à l'échelle des bâtiments, dont on connaît à la fois la fonction et la hauteur. Dans un premier temps, nous cherchons donc à savoir quelles sont les cellules bâties :

$$p_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si } Z_i \cap B_j = \max_k \{Z_k \cap B_j\} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

Z_i : la surface de la zone i
 n_i : le nombre de logements dans la zone i
 B_j : la surface du bâtiment j
 h_j : la hauteur du bâtiment j
 C_k : la surface de la cellule k
 a : fonction déterminant l'aire d'une surface

A partir de cette fonction d'appartenance, il devient possible de déterminer le volume total de bâti dans chaque zone :

$$v_i = \sum_j p_{ij} \cdot h_j \cdot a(B_j)$$

Connaissant le volume bâti de chaque zone, la densité de logement de chaque cellule peut être déterminée de la manière suivante :

$$\rho_{Z_i} = \frac{n_i}{v_i}$$

Dans chaque zone, cette densité de logement peut alors être affectée plus précisément au bâtiment auquel elle correspond :

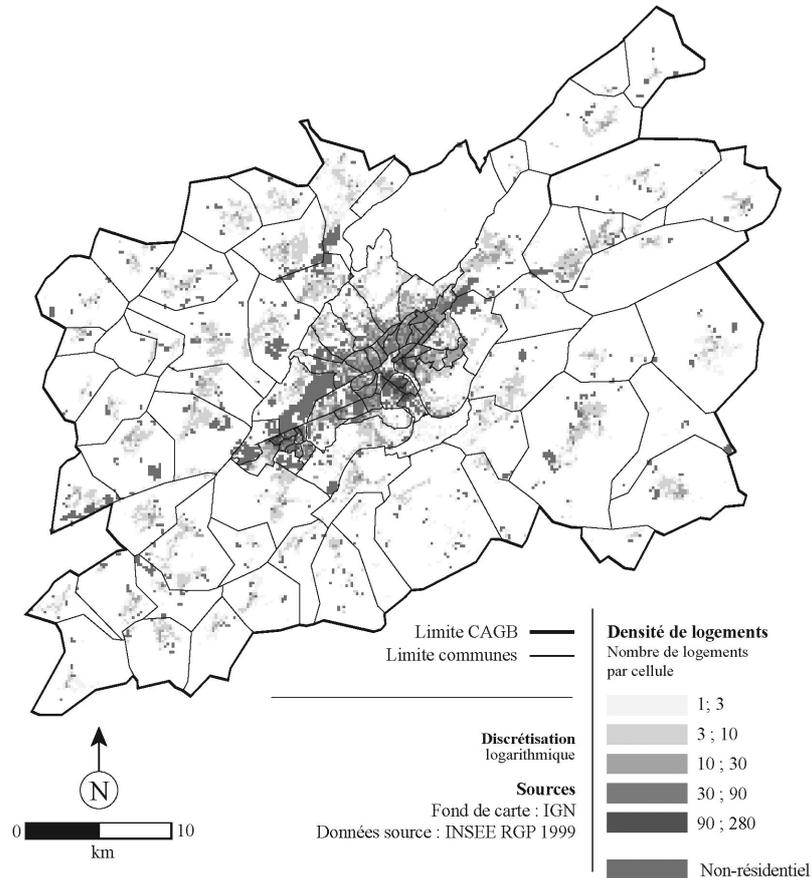
$$\rho_{B_j} = \sum_i p_{ij} \cdot \rho_{Z_i}$$

Enfin, il est possible d'affecter à chaque cellule un nombre de logements, proportionnellement à la surface de chaque bâtiment, comprise dans la surface de chaque cellule :

$$N_{C_k} = \sum_j a(B_j \cap C_k) \cdot h_j \cdot \rho_{B_j}$$

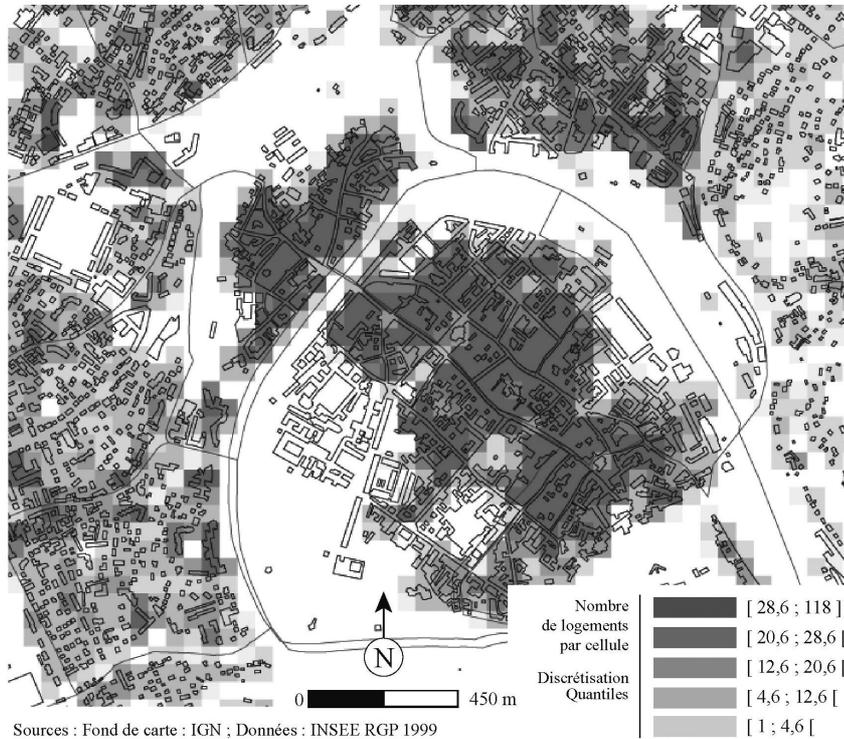
La Figure 2 présente le résultat de cette opération sous la forme d'une carte où chaque cellule, mesurant 100 mètres de côté, est associée à une densité de logements. Elle montre également la répartition

Figure 2 (voir le hors-texte en couleurs)
**Ventilation du bâti non-résidentiel
 et des logements dans l'agglomération de Besançon**



des espaces bâtis non-résidentiels au sein de l'agglomération bisontine, que l'on peut en grande partie associer à des zones d'activités et d'emploi. Le résultat de cette ventilation à l'avantage de fournir une image cellulaire assez fine de la répartition des logements dans la ville, information dont nous ne disposions au départ qu'à l'échelle des IRIS. Suivant une logique identique, la population (c'est-à-dire le nombre d'habitants) peut également être ventilée, ce que montre la Figure 3, qui ne présente ici que le centre de la ville, et montre la correspondance entre les informations cellulaires et l'espace bâti tel que nous le fournissent les données de l'IGN. A l'échelle de chaque cellule, la confrontation du nombre de logements et du nombre d'habitants permet alors d'évaluer très simplement la densité à l'intérieur des loge-

Figure 3

Ventilation de la population (exemple du centre de Besançon)

ments, offrant ainsi une approximation de la structure des ménages dans chaque cellule.

3. UN COUPLAGE DE MODÈLES

L'originalité du projet MOBISIM ne réside pas uniquement dans la considération multiscalaire (à la fois spatiale et temporelle) des processus qui y sont modélisés. Elle se matérialise également dans le couplage de trois types de modèles, associés à des objectifs de simulation relevant de problématiques différentes. Ici, trois modèles aux propriétés spécifiques permettent simultanément de considérer les ménages et leurs activités, les mobilités quotidiennes et les déplacements, et enfin les mobilités résidentielles et la dynamique de l'occupation du sol au sein de l'aire urbaine étudiée.

3.1. Activités des ménages : les systèmes multi-agents

Premièrement, la description des comportements (choix et décision) de localisation et de déplacement des ménages (et dans un deuxième temps des entreprises) qui peuplent l'aire urbaine étudiée est centrale au sein des processus modélisés dans MOBISIM (cf. 1.3). Les SMA apparaissent dès lors comme des outils de modélisation adaptés pour tenir compte de la dynamique de ces différents acteurs au cœur des processus liés à la mobilité et à l'aménagement urbains (Pumain *et al.*, 1995). En urbanisme et en aménagement du territoire, ce type de modèle se révèle en effet particulièrement bien adapté à la modélisation comportementale au niveau des individus, notamment pour les processus menant aux choix résidentiels et aux stratégies de mobilité quotidienne (Ligtenberg, 2001). Entendu dans ce contexte, un « agent », qui correspond ici à un ménage (ou à un individu au sein du ménage), est défini comme une entité physique ou virtuelle qui détient tout ou partie des caractéristiques suivantes : être capable d'agir dans un environnement, de communiquer directement avec d'autres agents, être mu par un ensemble de tendances qu'il cherche à optimiser, posséder des ressources propres, être capable de percevoir de manière limitée son environnement, tenter de satisfaire ses objectifs, en tenant compte des ressources et des compétences dont il dispose, et en fonction de sa perception, de ses représentations et des communications qu'il reçoit (Ferber, 1995).

Les SMA constituent une avancée importante dans l'univers de la complexité ; ils apportent une réponse particulièrement bien adaptée à l'analyse et à la résolution de problèmes impliquant plusieurs dimensions : spatiale, sociale, politique, organisationnelle, économique, financière. Cette approche permet de les appréhender à la fois dans leur globalité et dans le détail des interactions locales entre les agents impliqués. Dans ces systèmes, la « solution » n'est pas programmée explicitement mais émerge des interactions locales entre les agents simulés et leur environnement. L'intérêt des SMA est donc non seulement à caractère opérationnel mais aussi méthodologique, nous donnant à comprendre les situations à partir des comportements des agents qui construisent les dynamiques du système (cf. Chapitre 1). Appliquée à la problématique de la mobilité urbaine, la formalisation multi-agents permet ainsi de couvrir plusieurs domaines et champs d'application possibles, parmi lesquels on peut citer : la morphologie urbaine (urbanisme et développement urbain), les dynamiques spatiales (mobilité quotidienne, choix résidentiels, politique foncière), l'économie et la gestion urbaine (localisation des activités, des commerces,

etc.), les transports (demande de transport, choix modal, réseaux de transport intra-urbain, etc.).

Ainsi, si la dynamique des systèmes, sur laquelle MOBISIM était initialement basé, a pu représenter une évolution notable dans la représentation macroscopique des systèmes par l'introduction de boucles de rétroactions, prenant en compte la dimension temporelle et le caractère non-linéaire des relations entre les variables, l'approche centrée sur les individus, particulière aux SMA, apparaît comme une lecture systémique renouvelée, qui met en avant les multiples dimensions de l'interaction, dans un sens plus large : la coopération, la compétitivité, l'encombrement (etc.), ainsi que leurs conséquences. On considère alors que les actions et les interactions entre agents sont les éléments moteurs de la structuration d'un système complexe dans son ensemble. Des interactions entre agents émergent des structures organisées complexes qui, en retour, contraignent et modifient leurs comportements et le système dans son ensemble. La modélisation par agents semble dès lors adaptée à l'analyse d'interactions complexes, et permet une analyse relativement fine des comportements. Elle constitue le cœur du programme MOBISIM.

3.2. Mobilités quotidiennes et déplacements : la modélisation à quatre étapes

Parallèlement à l'approche individu-centrée et à la modélisation par agents, un modèle à quatre étapes permet de simuler les mobilités des acteurs ou des agents en termes de trafic. Ce type de modèle, classique dans les études de déplacements, propose en effet de simuler le trafic généré dans une agglomération en le partageant entre les différents modes de transports (voiture particulière (VP), transport en commun (TC), etc.) disponibles, et en affectant chacun des flux sur les différents réseaux associés. L'évolution de la mobilité urbaine prend en compte les déplacements de personnes générés par les activités économiques (Le Nir, 1991). Le modèle à quatre étapes est en fait « une succession de modèles dont l'interaction n'est que minime. Plus qu'un modèle, il s'agit donc d'une méthodologie associant différents modèles et les combinant pour décrire une mobilité dans son ensemble, sur un territoire donné » (Audard, 2006). Son utilisation, de plus en plus étendue, démontre aujourd'hui sa fonctionnalité, de même que sa capacité à absorber les innovations méthodologiques en modélisation des transports :

1. La première étape est dite de « génération du trafic » (Small, 1982, Bonnel, 1995). Elle consiste à prendre en compte les processus

décisionnels qui sont à l'origine du déplacement des personnes afin d'estimer leurs déplacements quotidiens (migrations domicile-travail, déplacements de loisirs, etc.), émis et reçus par chacune des zones prédéfinies du territoire d'étude (zones d'habitat résidentiel, zone d'activité, zone commerciale, commune, etc.). Ici, l'ensemble des méthodologies d'analyse des facteurs à l'origine des déplacements peut être utilisé, avec des préférences qui varient en fonction du but de l'étude des mobilités, et/ou des hypothèses contenues dans la recherche effectuée.

2. La deuxième étape est dite de distribution ou encore de « génération des boucles de déplacements » (Ben Akiva, 1991). L'objectif consiste ici, d'une part, à comprendre le processus décisionnel à l'origine du déplacement des personnes, et d'autre part, à fournir une estimation des déplacements entre les zones de l'aire urbaine étudiée¹².

3. La troisième étape est dite du « choix modal » (Cantillo *et al.*, 2006) ; elle consiste à répartir la demande en fonction des différents modes de transport disponibles sur l'aire d'étude. A l'heure actuelle, seuls trois modes de transport sont pris en compte dans MOBISIM : VP, TC et MAP considérés de manière multimodale. Toutefois, le programme devrait rapidement évoluer pour considérer d'autres modes doux (notamment la bicyclette).

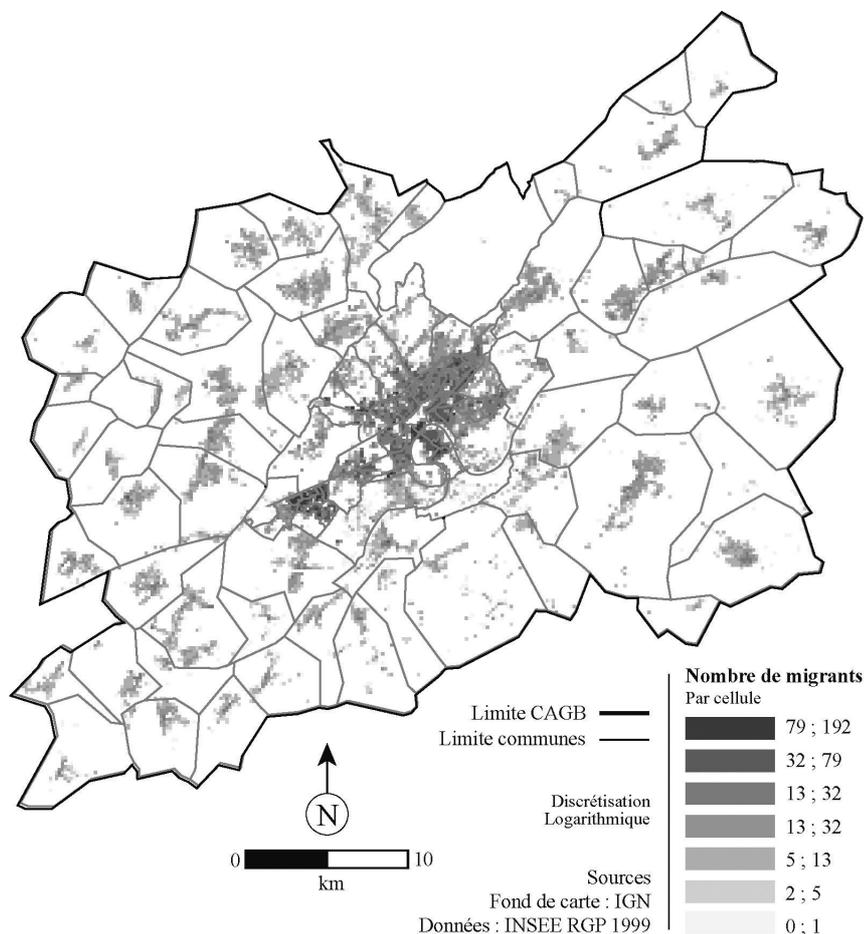
4. Enfin, la dernière étape, dite d'« affectation d'itinéraire » correspond à l'affectation de la demande de déplacement sur les réseaux, à partir de la matrice Origine-Destination pour chacun des modes de déplacement retenus (Swail, 2001). Pour chaque mode utilisé, le modèle reporte les durées, les distances et les coûts des différents trajets¹³. A partir de cette modélisation des déplacements, il est possible de calculer les émissions générées (gaz à effet de serre, polluants, bruits) sur la base du modèle Copert¹⁴ par exemple.

12. Cette étape peut faire appel à l'ensemble des méthodologies d'analyse des facteurs à l'origine des déplacements : des modèles gravitaires, des facteurs de croissance ou d'opportunité, fournissent des solutions possibles de modélisation de la distribution des déplacements. Ici toutefois, plus que l'objectif général du modèle à quatre étapes, c'est réellement la disponibilité des données qui conditionne souvent les choix méthodologiques.

13. Ces calculs prennent en compte la congestion pour le mode VP en utilisant des courbes débit/vitesse pour chaque type de tronçon. Les matrices ainsi obtenues sont utilisées par rétroaction pour déterminer le choix modal des différents usagers.

14. A partir des données relatives aux déplacements par mode (nombre de déplacements, longueurs parcourues et vitesses), le modèle Copert, financé par l'Agence européenne de l'environnement (EEA, European Environment Agency) propose une estimation des impacts environnementaux du transport urbain en termes d'émissions (CO₂, polluants, bruit) à partir des caractéristiques de la flotte automobile de l'aire urbaine considérée, et des caractéristiques des différents systèmes de transports en commun, mais également en terme d'exposition des populations aux

Figure 4
Génération du trafic : l'exemple des actifs



Compte tenu de la composition cellulaire et multiscalaire de MOBISIM (cf. point 2.2.), la première étape est largement simplifiée : la population amenée à se déplacer pour un motif de travail est directement contenue dans chaque cellule puisque les agents y ont été ventilés et que leurs caractéristiques socioprofessionnelles y ont été « synthétisées ». La Figure 4 montre le nombre d'actifs migrants censés quitter chaque jour leur logement pour rejoindre le lieu où se situe leur emploi dans chaque cellule (200 mètres de côté). Le nombre d'emplois contenu dans chacune des cellules non-résidentielles identifiées au

émissions (intersection entre les réseaux de transport, l'occupation du sol et les densités de population). Voir le site : <http://lat.eng.auth.gr/copert/>.

point précédent (cf. 2.2.) pourrait évidemment être cartographié de la même manière.

A partir de cette base, l'étape de distribution du trafic consiste à identifier des couples Origine-Destination, l'origine étant ici entendue comme un nombre de personnes localisées dans l'espace cellulaire, qui quittent leur logement pour travailler, et la destination comme un nombre d'emplois, localisés à la même échelle. Pour ce faire, le modèle utilise un modèle gravitaire, classique pour ce genre d'opérations. Dans un premier temps, l'attractivité de chaque cellule est calculée en fonction du nombre d'emplois qu'elle contient, et de la distance que la sépare des migrants potentiels. Ainsi, avec E_j le nombre d'emploi de la zone j et d_{ij} la distance (ou le coût) entre la zone i et la zone j :

$$A_{ij} = \frac{E_j}{d_{ij}}$$

Il devient alors possible d'estimer les flux entre les cellules d'origine et les cellules de destination de la manière suivante :

$$p_{ij} = \frac{A_{ij}}{\sum_k A_{ik}}$$

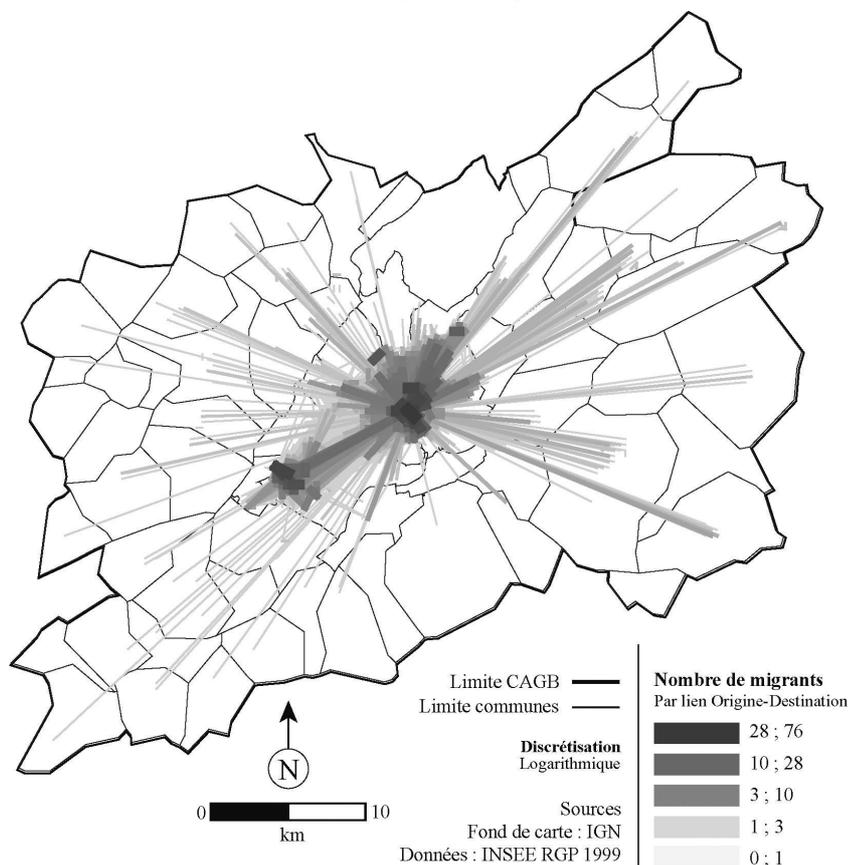
La Figure 5 montre le résultat de cette opération : les cellules sont liées deux à deux par des flux linéaires (à vol d'oiseau), qui représentent les migrations domicile-travail des actifs ; chaque flux est associé à un nombre de migrants.

Considérant que l'ensemble de ces migrations se fera selon le même mode de transport, les flux peuvent aisément être affectés sur le réseau de routes par l'intermédiaire de l'algorithme de Dijkstra (algorithme de calcul du plus court chemin), également classique pour ce genre d'opérations. Comme résultat, la Figure 6 présente la cartographie issue de cette opération sur l'agglomération de Besançon :

3.3. Mobilités résidentielles et de l'occupation du sol : les automates cellulaires

Enfin, un automate cellulaire, lui aussi classique pour ce genre d'opérations (White et Engelen, 1994 ; Barredo *et al.*, 2003 ; Caruso, 2006), est utilisé pour simuler le développement urbain (en termes de morphogénèse) rendu possible ou souhaitable par les mobilités générées aux deux étapes précédentes. Cette dynamique tient essentiellement compte de la mobilité résidentielle des ménages, et considère la manière avec laquelle des déménagements et des migrations vont s'opérer dans l'aire urbaine, et dans quelle mesure ces migrations vont engendrer la construction de logements en périphérie, et donc contri-

Figure 5

Distribution du trafic : l'exemple des migrations domicile-travail

buer à l'étalement urbain. L'évolution de l'occupation du sol qui en découle est évaluée au niveau cellulaire (niveau 3) de l'espace (la plus petite taille des cellules pouvant correspondre globalement à la taille d'une parcelle urbaine).

Le principe de la modélisation des mobilités résidentielles peut se résumer en deux temps. Premièrement, il s'agit de construire une cartographie des préférences des ménages, témoignant du cadre de vie qu'ils auraient tendance à privilégier dans leur voisinage plus ou moins proche. Ce dernier se compose alors de différents éléments inclus dans l'occupation du sol, comme la présence d'espace verts ou de loisirs, la densité d'espace bâtis et d'aménités (commerces et services par exemple), l'accessibilité au centre et la connexion au réseau de transports en commun, etc. (cf. Bonaiuto *et al.*, 2003 ; Lee *et al.*, 2008). Mais il intègre également une optimisation des mobilités quo-

Figure 6
Affectation du trafic : l'exemple des migrations domicile-travail



tidiennes, telle qu'elle a déjà été mise en exergue par la Figure 1, et simulée dans le point 3.2. Toutefois, les préférences doivent être évaluées en fonction des différents types de ménages, notamment de leur taille et de leurs revenus (les préférences n'étant ni identiques ni accessibles pour l'ensemble de la population).

Ainsi, en recensant ce que contient chaque cellule et ce qui est présent dans leur voisinage, il est possible de leur attribuer un « score » montrant leur attractivité potentielle pour chaque ménage (en fonction de son type), qui peut alors comparer la situation résidentielle dans laquelle il se trouve actuellement avec une ou plusieurs situations qu'il juge préférable (Figure 7). Sous réserve que la situation foncière le permette, quatre cas de figure peuvent alors être identifiés (Figure 8) :

1. Aucune situation résidentielle n'apparaît réellement plus avantageuse que celle actuellement occupée par le ménage : le ménage choisit donc de ne pas déménager ;

Figure 7

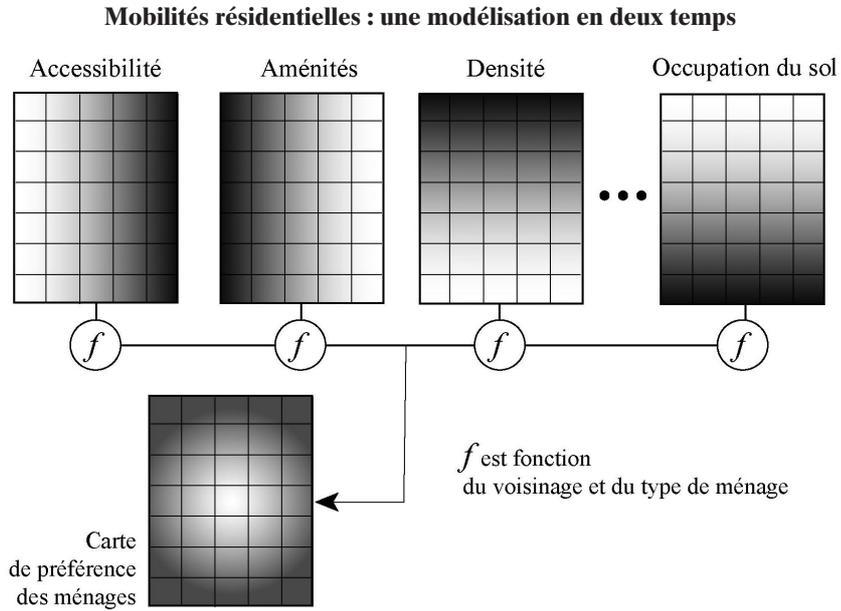
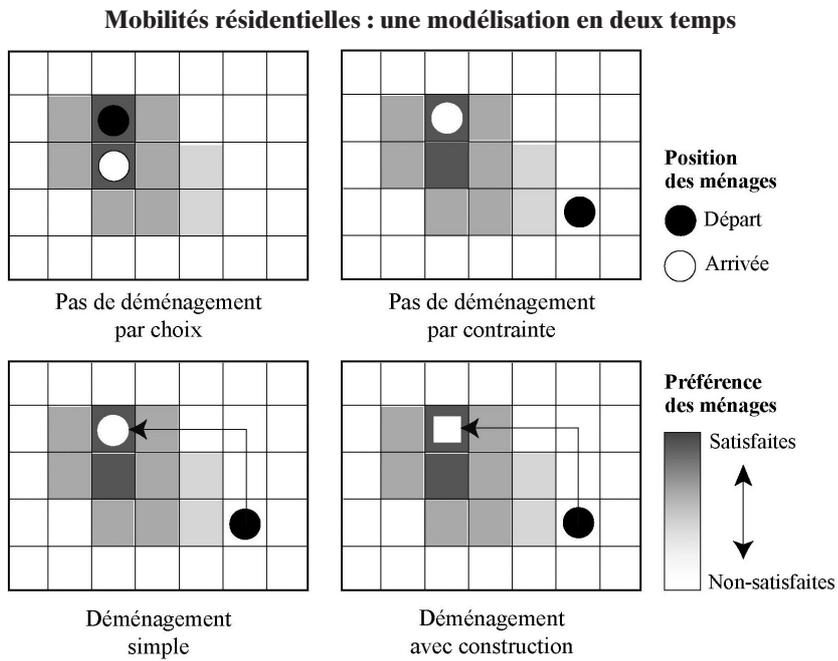


Figure 8



2. Une ou plusieurs situations résidentielles apparaissent plus avantageuses que celle actuellement occupée : le ménage va donc choisir de déménager vers la plus avantageuse d'entre elles ;

3. Une ou plusieurs situations résidentielles apparaissent plus avantageuses que celle actuellement occupée, mais le ménage ne déménage pas car il n'en a pas les moyens (financiers, techniques, temporels, etc.) ;

4. Une ou plusieurs situations résidentielles apparaissent plus avantageuses que celle actuellement occupée : le ménage va donc choisir de déménager vers la plus avantageuse d'entre elles et y construira son propre logement, intervenant ainsi sur l'offre foncière et contribuant à l'étalement urbain (puisque sa cellule de destination se densifiera, voire passera d'un état « non-bâti » à un état « bâti »).

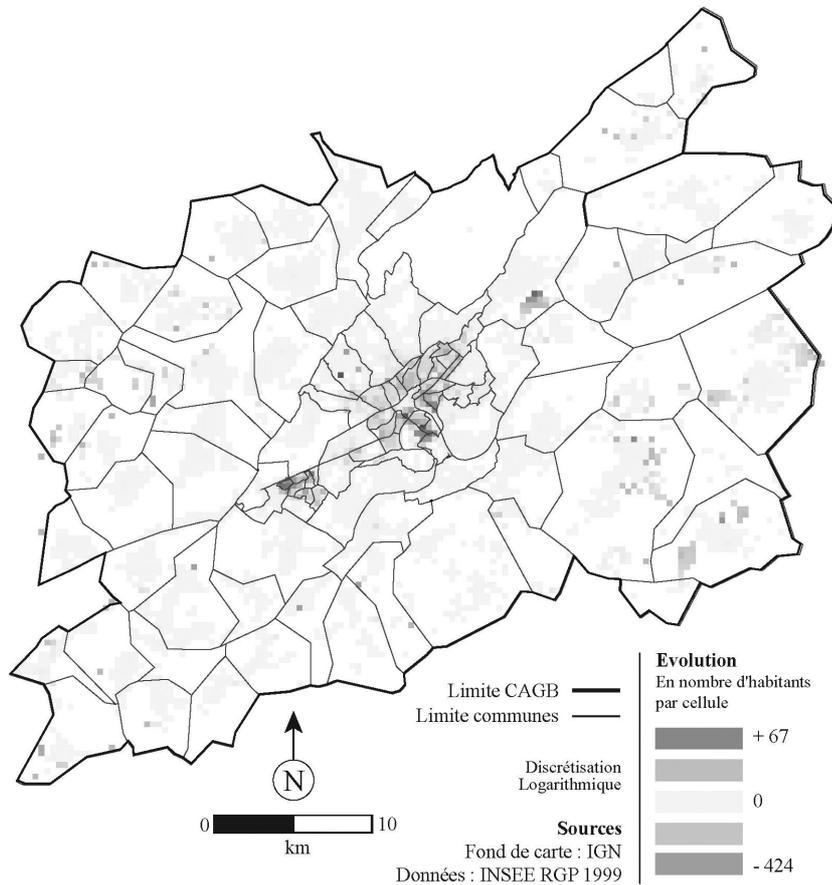
Si le principe théorique de la modélisation s'avère relativement simple, son paramétrage précis demeure délicat. En effet, il nécessite de connaître les préférences résidentielles des ménages. Cette information n'étant pas disponible dans les bases de données standard commercialisées par l'INSEE, il est nécessaire de l'acquérir par une série d'enquêtes. Cette opération est actuellement en cours dans le cadre du programme ANR ECDESUP (cf. point 1.3) et devrait porter sur trois villes (Besançon, Mulhouse et Strasbourg), à partir d'un questionnaire dont les réponses pourront servir au paramétrage de MOBISIM. Dans l'intervalle, il est néanmoins possible de raisonner de manière plus hypothétique, et de construire simplement deux règles, dans la logique des automates cellulaires, pour simuler les mobilités résidentielles. Ici, nous considérons que 5 % des ménages sont susceptibles de déménager au sein de l'agglomération de Besançon :

– pour satisfaire leurs préférences résidentielles, une part des ménages cherche à se localiser à proximités des aménités « vertes », cherchant à maximiser la présence d'éléments naturels (champs, forêts, espaces d'eau) ;

– une autre part de ces ménages cherche au contraire à se localiser à proximité des aménités urbaines, des commerces et des services (zones bâties, activités, structures d'enseignement, etc.).

En fonction des préférences de chacun de ces deux groupes, chaque cellule est alors dotée d'un score, et les ménages les moins satisfaits par leur situation au temps t déménagent au temps $t+1$ dans les cellules dont les scores sont les meilleurs. L'application de ces règles très simples produit des résultats très cohérents à l'échelle de Besançon (Figure 9) : la population augmente dans l'espace central riche en aménités urbaines (ce qui traduit une sorte de mouvement de gentrification) et dans les espaces périphériques riches en aménités « vertes »

Figure 9 (voir le hors-texte en couleurs)

Simulation des mobilités résidentielles

(ce qui traduit *a contrario* un mouvement de périurbanisation), alors que les zones de banlieue, à mi-chemin entre ces deux configurations, sont délaissées et perdent de la population.

Cet exemple est certes trivial, mais il permet de « boucler » la modélisation. En effet, en modifiant les densités de population dans les cellules, le modèle génère une nouvelle configuration de base, à partir de laquelle les mobilités quotidiennes peuvent être recalculées. Cette combinaison permet l'itération de la modélisation, et la simulation à long terme : la mobilité quotidienne influence les préférences résidentielles ; l'optimisation de ces préférences modifie les mobilités quotidiennes, etc., selon la boucle montrée par la Figure 1. Elle permet également de faire correspondre une logique de mobilités quotidiennes à des migrations résidentielles qui s'inscrivent dans le temps long,

répondant à l'exigence théorique identifiée au point 2. L'ensemble des cartes résultant de cette modélisation itérative peut ensuite être analysé par le biais d'indicateurs divers, afin d'évaluer l'impact des ces mobilités sur les trois sphères du développement durable, i.e. les conséquences économiques, sociales et environnementales de ces modifications sur les aires urbaines et leurs possibilités de développement à venir.

CONCLUSION

Tout au long de la démarche MOBISIM, la cohérence entre les modèles (SMA, modèle de trafic et automates cellulaires) est assurée par la formalisation d'une ontologie de l'espace géographique. Celle-ci est entièrement décrite sur le plan mathématique et positionne la modélisation dans l'espace (passage du continu au discret, de l'échelle macro à l'échelle micro, et inversement) conformément à la description du point 2.2, comme dans le temps (passage du continu au discret, de l'échelle quotidienne à l'échelle annuelle, et inversement), conformément à la description du point 2.1.

Sur le plan des résultats escomptés et actuellement en cours de développement, l'imbrication de ces trois modèles à différentes échelles devrait rapidement permettre (et permet déjà en partie) d'évaluer les conséquences associées à chaque scénario de mobilité sur chacune des trois sphères généralement associées au développement durable. Sur la base des travaux du projet Propolis, ces évaluations prennent alors la forme d'indicateurs relativement simples¹⁵. Sur le plan économique d'abord, MOBISIM devrait ainsi offrir un certain nombre d'indicateurs décrivant le niveau de satisfaction et les besoins en mobilité (au niveau de chaque cellule par exemple), les temps de parcours dans l'agglomération (étudiés au niveau de chaque zone) et l'efficacité globale des déplacements (considérée au niveau global, pour l'ensemble de l'aire urbaine étudiée). Sur le plan environnemental, une seconde série d'indicateurs devrait permettre de calculer la quantité des émissions de gaz à effet de serre (au niveau global, mais également au niveau zonal afin de déterminer quels sont les quartiers les plus

15. Parmi les indicateurs définis par différents organismes internationaux (Global Reporting Initiative, Commission européenne, OCDE) et ceux utilisés dans le projet européen Propolis, les indicateurs suivants permettent d'évaluer l'efficacité de la mobilité urbaine. Sur le plan économique : satisfaction des besoins de mobilité, temps de parcours, efficacité des déplacements. Sur le plan environnemental : émission de gaz à effet de serre, pollutions, nuisances sonores, qualité environnementale ; Sur le plan social : impact sur la santé, degré de mixité sociale, accessibilité du centre-ville, des services et des espaces verts.

soumis aux risques), les pollutions et les nuisances sonores associées aux mobilités générées (au niveau des cellules, afin d'associer ces nuisances à une contrainte ou un risque possiblement ressenti par un groupe de résidents déterminé). Dans ce contexte, un indicateur de consommation énergétique a été mis au point sous la forme d'étiquettes énergétiques (Fléty *et al.* 2009). Sur le plan social, enfin, l'impact des mobilités sur la santé, le degré de mixité sociale, l'accessibilité au centre-ville, aux services et aux espaces verts sont également évalués, tant au niveau zonal qu'au niveau cellulaire, en tenant compte avec une précision relative de l'occupation du sol qui pourrait influencer les différents facteurs qui en sont à l'origine.

Toutefois, au regard de ces objectifs, le projet peut paraître ambitieux. L'approche individu-centrée, envisagée à l'échelle d'une aire urbaine, même de taille moyenne ou modeste, entraîne nécessairement la simulation des choix de mobilité de plusieurs dizaines de milliers d'agents, et un temps de calcul souvent exponentiel¹⁶. Elle devrait néanmoins permettre de continuer à positionner le projet MOBISIM sur deux versants complémentaires. D'une part, il s'agit d'utiliser la plateforme comme un outil de réflexion théorique permettant de poser un certain nombre d'hypothèses sur les liens existant entre les mobilités, la morphogénèse urbaine (étalement urbain, hiérarchie d'échelle, fractalité) et la consommation d'énergie associée, et d'y répondre par l'intermédiaire de tests de scénarios. De la même manière, elle doit aussi permettre d'identifier les leviers qui peuvent influencer les politiques urbaines, notamment en matière de transport et de planification, et de qualifier les interactions possibles entre ces différentes politiques. D'autre part, il s'agit également de continuer à utiliser MOBISIM comme une plateforme appliquée, c'est-à-dire un outil d'aide à la décision « au contact » des problématiques locales, permettant de tester des scénarios d'aménagement du territoire. Dans ce cadre, MOBISIM apparaît véritablement comme un outil d'accompagnement et de discussion autour des hypothèses et des options possibles du développement urbain, qui demande à être approprié par les principaux acteurs du territoire.

Références bibliographiques

- Antoni J.P., 2006, Calibrer un modèle d'évolution de l'occupation du sol urbain. L'exemple de Belfort, *Cybergeo : revue européenne de géographie*, 347.

16. Ce « détail » technique, qui a longtemps été le principal écueil de la modélisation multi-agents, trouve aujourd'hui une solution, au moins partielle, par la puissance accrue des machines informatiques, et les possibilités de calcul par grille.

- Antoni J.P., Tannier C., 2006, Evaluation des simulations spatiales, *SAGEO 06 – Colloque International de géomatique et d'analyse spatiale*, Strasbourg, France, 4 p.
- Ascher F., 2001, *Les nouveaux principes de l'urbanisme*, Ed. de l'Aube, 84 pages.
- Audard F., 2006, *Modélisation de la mobilité. La génération de trafic à l'échelle régionale*, Thèse de doctorat, Université de Franche-Comté, 261 pages.
- Barredo J.I., Kasanko M., McCormick N., Lavallo C., 2003, Modelling dynamic spatial processes : simulation of urban future scenarios through cellular automata, *Landscape and Urban Planning*, 64, pp. 145-160
- Batty M., 2005, *Cities and Complexity : Understanding Cities with Cellular Automata, Agent-Based Models, and Fractals*, MIT Press, 584 pages.
- Batty M., Torrens P-M., 2001, Modeling Complexity : The Limits to Prediction, *Cybergeo : European Journal of Geography*, 201.
- Ben-Akiva M., Lerman S-R., 1991, *Discrete Choice Analysis : Theory and Application to Travel Demand*. The MIT Press, 390 p.
- Bonaiuto M., Fornana F., Bonnes M., 2003, Indexes of perceived residential environment quality and neighbourhood attachment in urban environments : a confirmation study on the city of Rome, *Landscape and Urban Planning*, 65, pp. 41-52.
- Bonnel P., 1995, An application of activity-based travel analysis to simulation of change in behaviour, *Transportation*, 22, 1-2, pp. 73 – 93.
- Bruckner J. K., 1983, The economics of urban yard space : An “implicit market”-model for housing attributes, *Journal of Urban Economics*, 13, 216-234
- Cantillo V., Heydecker B., De Dios Ortúzar J., 2006, A discrete choice model incorporating thresholds for perception in attribute values, *Transportation Research B*, 40, 9, pp. 807 – 825.
- Caruso G., 2006, A cellular automata modelling of suburban area, including individual preferences for green and social amenities, *Workshop MODUS : On the emergence of complex forms and multi-scale patterns*, Paris, France.
- Dubois-Fresney L., 2006, *Atlas des Français aujourd'hui. Dynamiques, modes de vie et valeurs*, Autrement, 184 pages.
- Dubois-Taine G., Chalas Y. (ed.), 1997, *La ville émergente*, Ed. de l'Aube.
- Ferber J., 1995, 2007, *Les systèmes multi-agents : vers une intelligence collective*, Dunod, 522 pages.
- Fléty Y., Antoni J.P., Frankhauser P., 2009, Towards local energy performance indicators : zonal energy labels, *16th European colloquium on theoretical and quantitative geography*, Maynooth, Ireland.
- Fonseca F.T., Egenhofer M.J., Davis C.A., Borges K.A.V., 2000, Ontologies and knowledge sharing in urban GIS, *Computers, Environment and Urban Systems*, 24, pp. 251-271.
- Frankhauser P., Moine A., Bruch H., Tannier C., Josselin D., 1998, Simulating settlement dynamics by modelling subjective attractivity evaluation of agents, *Proceedings of the Western Regional Science Association*, Monterey, USA.
- Frankhauser, P., 2000. La fragmentation des espaces urbains et périurbains. Une approche fractale. In : P. H. Derycke, 2000, *Structures des villes, entreprise et marchés urbains*, L'Harmattan, pp. 25-54.
- Gilbert N., Troitzsch K.G., 1999, 2005, *Simulation for the social scientist*, Open University Press, 295 p.
- Giuliano G., Small K.A., 1999, The determinants of growth of employment sub-centers, *Journal of Transport Geography*, 7, pp. 189-201.

- Golledge R.G., 2002, The nature of geographical Knowledge, *Annals of the Association of American Geographers*, 92(1), pp. 1-14
- He C., Okada N., Zhang Q. Shi P., Zhang Q., 2006, Modelling urban expansion scenarios by coupling cellular automata model and system dynamic model in Beijing, China, *Applied Geography*, 26, pp. 323-345.
- Le Nir M., 1991, *Les modèles de prévision de déplacements urbains*, Thèse de doctorat, Université Lyon II, 313 p.
- Lee S.W., Ellis C.D., Kweon B.-S., Hong S.-K., 2008, Relationship between landscape structure and neighborhood satisfaction in urbanized areas, *Landscape and Urban Planning*, 85, pp. 60-70.
- Ligtenberg A., Bregt A.K., Lammeren (van) R., 2001, Multi-actor based land use modelling : spatial planning using agents, *Landscape and Urban Planning*, 56, pp. 21-33.
- Morin E., 1990, *Introduction à la pensée complexe*, Ed. sociales françaises, 158 p.
- Pumain, D., Sanders, L., Mathian, H., Guerin-Pace, F., Bura, S., 1995. In : Fisher, M.M., Sikos, T.T., Bassa, L. (ed.), *Simpop, a multi-agent model for urban transition*. Geomarket Co., pp. 71-85.
- Schwanen T., Dieleman F., Dijst M., 2004, The impact of metropolitan structure on commune behavior in the Netherlands : a multilevel approach, *Growth and Change*, 35, pp. 304-333.
- Small K.A., 1982, The scheduling of consumer activities : work trips, *American Economic Review*, 3, pp. 467 - 479.
- Swait J., 2001, Choice set generation within the generalized extreme value family of discrete choice models, *Transportation Research B*, 35, pp. 643-666.
- Tannier C., Franckhauser P., 2001, From the observations to the construction of an urban dynamics simulation model : an inductive approach, *Cybergeo : European Journal of Geography*, n° 191.
- Tannier C., Frankhauser P., Houot H., Vuidel G., 2006, Optimisation de l'accessibilité aux aménités urbaines et rurales à travers le développement de modèles fractals d'urbanisation, *Actes du XLIIe Colloque de l'ASRDLF*, Sfax, Tunisie, 29 p.
- Vancheri, A., Giordano, P., Andrey, D. and Albeverio, S., 2008, A model for urban growth processes with continuous state cellular automata, multi-agents and related differential equation. Part 1 : Theory, *Environment and Planning B*, 35, 4, pp 723-739.
- Wegener M., 2004, Overview of land-use transport models. In : Hensher D.A., Button K., (ed.), 2004, *Transport Geography and Spatial Systems, Handbook in Transport*, 5, Pergamon/Elsevier Science, pp. 127-146.
- White R., Engelen G., 1994, Urban Systems Dynamics and Cellular Automata : Fractal Structures between Order and Chaos, *Chaos, Solutions and Fractals*, 4, 4, pp. 563-583.

Remerciements. Ce modèle a bénéficié du soutien du projet ECDESUP (« L'évaluation, le choix et la décision dans l'usage des espaces urbains et périurbains »), financé par le programme ANR du Ministère Français de la Recherche.

CHAPITRE 3

SIMAUURIF : UN MODÈLE DYNAMIQUE DE SIMULATION DE L'INTERACTION TRANSPORT-URBANISATION EN RÉGION ÎLE-DE-FRANCE

Dany Nguyen-Luong

Institut d'Aménagement et d'Urbanisme de la Région d'Île-de-France (IAU)
15 rue Falguière – 75740 Paris Cedex 15
dany.nguyen-luong@iau-idf.fr

L'Institut d'aménagement et d'urbanisme d'Ile-de-France (IAU, anciennement IAURIF) et le laboratoire THEMA de l'Université de Cergy-Pontoise¹ ont réalisé entre 2003 et 2007 une recherche sur la modélisation de l'interaction transport-urbanisme. Cette recherche, subventionnée par le Programme de recherche et d'innovation dans les transports terrestres (PREDIT), le Conseil régional d'Île-de-France, la Direction régionale de l'équipement Ile-de-France (DREIF) et Réseau ferré de France (RFF), avait pour objectif de mettre au point un modèle de micro-simulation dynamique de l'interaction transport-urbanisme sur la région Ile-de-France. L'objet était de développer un prototype opérationnel et de l'appliquer à une étude de cas, la Tangentielle Nord entre Sartrouville et Noisy-le-Sec. Ce modèle, appelé SIMAUURIF (SIMulation de l'interAction Urbanisation-transport en Région d'Île-de-France), utilise deux modèles existants :

– URBANSIM, un modèle d'urbanisation (*land-use model*), développé par l'Université de l'Etat de Washington à Seattle (Etats-Unis), basé sur la théorie des modèles de choix discrets et sur le principe de la micro-simulation ;

– DAVISUM-METROPOLIS, un modèle de transport incluant le modèle global de demande de déplacements développé par l'IAU, avec les logiciels MinUTP, Arc-Info/ArcGis puis DAVISUM. La par-

1. Plus particulièrement le Pr. A. de Palma, N. Picard, K. Motamedi et H. Ouaras pour THEMA, et D. Nguyen-Luong pour l'IAU.

tie affectation routière a été réalisée sur le logiciel METROPOLIS qui a été développé par le laboratoire THEMA dans le cadre du PREDIT.

Aux Etats-Unis, les modèles *land-use* (par exemple MEPLAN, DRAM-EMPAL, ITLUP, POLIS, TRANUS, etc.) sont utilisés depuis longtemps dans plusieurs métropoles américaines. Des recherches ont été menées depuis le début des années 1990 sur les modèles LUTI (*Land use transportation integrated models*) qui visent à coupler un modèle *land-use* et un modèle de transport. Ces recherches étaient motivées par un contexte réglementaire - deux lois sur l'air, ISTEA (1991) et TEA21 (1998) - qui rendait obligatoire la prise en compte de l'interaction transport-urbanisme dans l'élaboration des plans de transports régionaux. Par conséquent, on a vu aux Etats-Unis se développer une recherche prolifique sur les modèles intégrés transport-urbanisme ainsi que la mise à disposition d'outils opérationnels. Parmi eux, le logiciel URBANSIM, un modèle d'urbanisation de type micro-simulation, a commencé à être développé en 2000 par l'équipe de P. Waddell au CUSPA (*Center for Urban Simulation and Policy Analysis*) de l'Université de Washington à Seattle. En 2003, URBANSIM est apparu suffisamment au point pour envisager son utilisation en France. En septembre 2003, l'IAU et le laboratoire THEMA se sont donc associés pour essayer de mettre au point le modèle intégré SIMAURIF.

1. OPPORTUNITÉ DU PROJET SIMAURIF

Les modèles LUTI font aujourd'hui l'objet de beaucoup d'attention, aussi bien de la part de la communauté des chercheurs que des services techniques de l'Etat, des exploitants, des gérants et des autorités organisatrices de transports, des bureaux d'études et de quelques entreprises privées de transport (VEOLIA, VINCI ou COFIROUTE par exemple ; cf. Chapitre 5). Il y a trois raisons principales qui fondent l'opportunité du projet SIMAURIF.

1.1. Première raison : dépasser la modélisation classique

Premièrement, il est unanimement reconnu que la modélisation de trafic classique en milieu urbain, du type modèle statique à quatre étapes, est aujourd'hui dépassée. Née après la Seconde Guerre Mondiale aux Etats-Unis dans le but de planifier des systèmes de transport routier, cette méthode de prévision de trafic a atteint ses limites et ne répond plus à la demande des décideurs, même si elle est encore largement utilisée par défaut en France et aux Etats-Unis pour l'éva-

luation des politiques de transport et l'évaluation socio-économique d'un projet d'infrastructure de transport.

D'une part, les modèles de trafic statiques ont très peu évolué depuis 50 ans. Les quatre étapes (génération, distribution, choix modal, affectation ; cf. Chapitre 2, point 3.2) sont toujours présentes. Il y a bien quelques avancées dans le milieu de la recherche académique : modèle conjoint distribution-choix modal, modèle basé sur les activités, modèle Logit emboîté de choix modal, etc. Mais en pratique, le modèle à quatre étapes séquentielles demeure, et la rétroaction entre les quatre étapes, lorsqu'elle est envisagée, se fait presque toujours en mode manuel. D'autre part, un modèle de prévision de trafic permet essentiellement de calculer, à partir de données socio-économiques exogènes fixées à un horizon futur et supposées implicitement indépendantes de l'évolution de l'offre de transport, des gains de temps procurés par une nouvelle infrastructure. En économie des transports, il est habituel de monétariser ces gains de temps grâce à la valeur du temps, de calculer le surplus actualisé pour ensuite aboutir à un taux de rentabilité immédiat et un taux de rentabilité interne pour l'ensemble de la collectivité, compte tenu du montant de l'investissement, de l'année envisagée de mise en service, de la longévité de l'infrastructure et du taux d'actualisation qui est une valeur tutélaire. Or, les Enquêtes globales de transports (EGT) réalisées en Ile-de-France montrent que ces gains de temps n'existent pas car ils sont convertis graduellement en gains de distance par les usagers grâce à l'amélioration de la performance des réseaux. Ceci a pour conséquence un phénomène, que l'on observe dans toutes les métropoles mondiales : l'étalement urbain. La conjecture de Y. Zahavi (1980), qui stipule que les budgets temps de transport sont stables, se trouve ainsi confirmée pour la région parisienne depuis 25 ans. Cette conjecture, même si elle a été remise en question récemment pour d'autres métropoles, en particulier aux Etats-Unis, aura mis finalement presque 20 ans à se diffuser dans les esprits des modélisateurs français.

Par conséquent, il faut aujourd'hui repenser la méthode même d'évaluation socio-économique des transports qui ne repose quasiment que sur des gains de temps (les gains environnementaux sont marginaux). Il faut reconnaître à J. Poulit (2005) le mérite d'avoir essayé depuis dix ans de renouveler l'approche en proposant de calculer des indicateurs de gains d'accessibilité et de cartographier les distributions spatiales de ces bénéfices. Mais au final, cette nouvelle approche ne fait que représenter autrement des gains de temps, et ce ne sont donc toujours que les avantages directs de l'infrastructure qui sont mis en avant pour évaluer le projet. Ces avantages directs sont globaux et

ne disent pas qui sont les gagnants et qui sont les perdants. Pour l'élu local qui est directement concerné par l'infrastructure nouvelle car elle dessert son territoire d'administration, si les usagers peuvent aller plus loin, cela devient un effet indésirable car il préfère que les usagers « consomment sur place » et, au contraire, n'aillent pas chercher ailleurs ce qu'ils peuvent trouver à proximité (emplois, commerces, écoles, etc.). Cette nouvelle approche par les gains d'accessibilité peut donc être contre-productive au niveau local, même si elle est intéressante pour évaluer un bilan global au bénéfice de l'ensemble de la collectivité.

1.2. Deuxième raison : prendre en compte les effets indirects du transport

La deuxième raison de l'insuffisance des modèles classiques à quatre étapes est qu'ils ne permettent pas d'évaluer les effets indirects des transports dans la durée. D'aucuns ont parlé d'effets structurants des transports. Quels sont ces effets indirects ? Ils sont de trois ordres : (i) le développement économique local générateur d'emplois, (ii) l'attractivité résidentielle des ménages et (iii) les plus-values foncière et immobilière. Ces effets indirects n'apparaissent pas le jour de l'inauguration de l'infrastructure, mais des années après (parfois dix à quinze après la mise en service en ce qui concerne le développement économique). Ces trois effets sont très parlants aux décideurs politiques. En effet, leurs critères de décision principaux concernent les impacts que le projet aura sur l'urbanisation et sur l'attractivité de leur territoire (commune, intercommunalité, département). Ils se demandent : combien de nouvelles entreprises vont s'implanter près de l'infrastructure ? Quelles sont les retombées économiques en termes de taxes foncière et professionnelle ? Combien de ménages nouveaux, si possible à hauts revenus, vont s'installer près de la nouvelle gare ? Quelle plus-value l'administration va-t-elle pouvoir récupérer si le foncier et l'immobilier prennent de la valeur après l'ouverture de l'infrastructure ?

Le temps où ingénieurs et économistes pouvaient convaincre les décideurs de l'intérêt du projet de transport en leur apportant sur un plateau le taux de rentabilité interne de cette infrastructure, quitte à l'augmenter en jouant sur la valeur du temps ou sur la valorisation des gains environnementaux, ou pire encore sur le montant de l'investissement, semble donc dépassé. Certains spécialistes de l'économie des transports (Quinet et Walliser, 1990) ont bien avant nous parlé des « splendeurs et misères du calcul économique ». Loin de nous l'idée que le calcul économique est impuissant, mais il est insuffisant dans le

contexte actuel. Il faut se résigner et repenser la méthode. Nous proposons de revenir à une analyse multicritères qui ne cherche pas à se substituer à la méthode coûts-bénéfices, mais à la compléter. Nous avons axé notre recherche sur l'amélioration de l'évaluation socio-économique des infrastructures de transport par un modèle LUTI mais il faut savoir qu'un autre champ d'utilisation de ces modèles est le calcul d'indicateurs de développement durable basés sur l'occupation du sol.

1.3. Troisième raison : rattrapper le retard français

La troisième raison, suggérée dans la réponse à la première question, est que la France est en retard sur les Etats-Unis, et même par rapport à certains pays européens (notamment les Pays-Bas, l'Ecosse, la Suède, l'Allemagne ou la Belgique) dans le développement des modèles *land-use*. Il n'existe pas en France de logiciel d'urbanisation, alors qu'aux Etats-Unis, il y en a plusieurs, comme on l'a évoqué plus haut. En France, il n'y a eu qu'une tentative pour appliquer un modèle d'urbanisation : TRANUS appliqué à Lyon à la fin des années 1990 par le CERTU. Cette tentative s'est soldée par un semi-échec (problème de ressources humaines et de calage). Il peut y avoir plusieurs explications à ce retard français :

- l'absence de loi comme aux Etats-Unis obligeant à l'intégration transports-urbanisme dans un document de planification de type Contrat de plan ou de projet, Plan de déplacements urbains (PDU) ou Plan régional de la qualité de l'air (PRQA) ;
- l'absence de logiciel de modélisation de l'urbanisation accessible, compréhensible, et suffisamment complet, destiné aux professionnels, alors qu'il existe plusieurs logiciels commerciaux de simulation de trafic (DAVISUM, Cube et Emme/2 pour les trois principaux utilisés en France). Pour les praticiens qui seraient un peu familiarisés avec les jeux vidéo, il serait souhaitable de trouver sur le marché un logiciel comparable au jeu SIMCITY mais à destination professionnelle ;
- les évidentes difficultés méthodologiques de la modélisation, ne serait-ce que parce qu'il est extrêmement difficile de dissocier les effets purement transports des autres effets sur l'urbanisation ;
- le manque de polyvalence des ingénieurs de trafic, économètres, urbanistes, démographes et informaticiens. Les ingénieurs de trafic n'ont en général qu'une approche mathématique et informatique de la simulation de trafic ; les économètres vont consacrer tout leur temps à estimer des modèles explicatifs sans avoir une vision globale du projet et des interactions ; les urbanistes n'ont en général qu'une approche

qualitative des problèmes basée sur une longue expérience et pour qui les transports ne sont qu'une branche de l'urbanisme ; les démographes raisonnent essentiellement en termes de soldes migratoire et naturel au niveau d'une commune (avec des paramètres tels que le taux de natalité, de décès, d'immigration, l'espérance de vie, etc.) et leurs modèles démographiques (de type âge-cohorte) ne prennent pas en compte les variables d'accessibilité et de desserte par les transports ; enfin pour les informaticiens, et pour paraphraser G. Clemenceau, la « modélisation est une chose trop grave pour la confier à des informaticiens ». La barrière reste encore étanche entre ces cinq différentes spécialités. Il est impératif que chacun comprenne que sa tâche n'est pas forcément plus importante que les autres, ce qui est une tendance humaine naturelle. Chacun étant à l'aise avec ce qui l'intéresse, il a tendance à minimiser l'importance du reste.

C'est à partir de ces trois raisons que se fonde l'opportunité de la modélisation intégrée transports-urbanisme en France. Les données zonales de l'étape de génération ne sont plus des hypothèses exogènes mais sont calculées par le logiciel qui répartit chaque année les populations et les emplois sur l'aire d'étude à partir de totaux. Ainsi, pour évaluer l'intérêt d'un projet d'infrastructure de transport, ce type de modèle permet justement d'évaluer, en plus des avantages directs (gains de temps), les effets indirects de l'infrastructure sur l'occupation des sols en prenant en compte le court, le moyen et le long terme. Il permet donc, par rapport à la modélisation de trafic pure, des évaluations dans les deux sens, à savoir les impacts des politiques de transport sur l'urbanisation, et réciproquement les effets des politiques urbaines sur la mobilité. Par exemple, quels sont les effets à long terme sur la relocalisation des entreprises et des ménages de l'instauration d'un péage cordon en proche couronne autour de Paris² ? Quels sont les effets d'une politique de densification autour des gares sur les comportements de mobilité, en particulier sur le choix modal et les distances parcourues ? Ce type d'évaluation est très demandé après le Grenelle de l'environnement qui a fixé la priorité aux critères de développement durable des transports.

2. POSITIONNEMENT DANS LA RECHERCHE ACADÉMIQUE

Nous considérons que la recherche théorique sur l'interaction transport-urbanisme restera sans lendemain si des efforts importants

2. Cette question est également abordée dans le chapitre 5 consacré au modèle PIRANDELLO©, qui propose un scénario de péage cordon autour de Paris.

de modélisation ne sont pas engagés. On peut en effet s'interroger longtemps sur l'existence ou non d'une relation entre urbanisation et transports, mais cela mènerait à des discussions sans fin sur la nature des relations (directes, indirectes, de concomitance, de congruence, etc.) entre système de transport et système urbain. Nous préférons laisser de côté ce débat pour modéliser « sans état d'âme ». Notre objectif était donc de mettre au point un modèle intégré opérationnel, ou du moins un prototype, et de l'appliquer à une étude de cas : le territoire desservi par la « Tangentielle Nord » entre Sartrouville et Noisy-le-Sec, en Ile-de-France.

Evidemment, nous n'ignorons pas les nombreuses recherches menées avant nous dans le domaine de l'économie urbaine, l'économie spatiale et la nouvelle économie géographique (cf. Chapitre 1). Loin de prétendre à l'exhaustivité, citons quelques références classiques dans une littérature abondante : Von Thünen (1826) sur la rente foncière, Losch (1954) sur les choix de localisation, Lowry (1963) et Alonso (1964) sur la croissance urbaine, Krugman (1985) sur la localisation des entreprises, Fujita et Thisse (1989) sur la dynamique urbaine et les mécanismes d'enchères foncières, Arnott (2001) sur les villes monocentriques et polycentriques. Sans nier les apports théoriques des chercheurs, la démarche du projet SIMAURIF se veut avant tout opérationnelle, en ayant pour objectif d'aboutir à un prototype de modèle intégré, dynamique et désagrégé de l'interaction transport-urbanisme.

2.1. Le couplage de deux modèles

Nous avons utilisé deux modèles existants :

- le modèle de trafic DAVISUM-METROPOLIS. Ce modèle multimodal comporte trois parties : (i) un modèle classique de prévision de la demande de déplacements sous forme de matrices origine-destination (génération, distribution, choix modal) en 606 zones sur la région d'Île-de-France, (ii) un modèle d'affectation statique en transport en commun (DAVISUM) et (iii) un modèle d'affectation dynamique routière (METROPOLIS).

- le modèle d'urbanisation URBANSIM. Ce modèle américain a connu entre 2000 et 2008 de nombreuses évolutions et plusieurs phases de réingénierie. C'est un modèle de type micro-simulation, qui comporte quatre principaux sous-modèles : (i) un modèle de choix de localisation résidentielle des ménages, (ii) un modèle de choix de localisation des emplois, (iii) un modèle de choix de développement urbain (dans la dernière version OPUS/URBANSIM, c'est un modèle

de choix de localisation de projets urbains) et enfin (iv) un modèle de prix du foncier. Les trois premiers modèles sont des modèles de choix discrets, le quatrième est un modèle de régression linéaire.

En principe, on cherche à modéliser dans une approche holistique ou systémique les interactions suivantes : la localisation des ménages et des emplois génère des déplacements qui sont affectés sur le réseau multimodal de transport ; les coûts généralisés de transport et les mesures d'accessibilité sont, en retour, injectés dans l'expression de l'utilité de chaque modèle de choix. Les disponibilités foncières et immobilières ainsi que leurs prix sont modifiés à chaque horizon temporel. Les réseaux de transport sont mis à jour à chaque pas de temps. Cette boucle de rétroaction annuelle doit tourner pendant 25 à 30 ans.

2.2. URBANSIM : un choix par défaut

URBANSIM présentait de prime abord de nombreux avantages pour notre projet :

- il est l'aboutissement de nombreuses recherches commencées dès les années 1960, d'abord en Amérique latine, puis aux Etats-Unis. P. Waddell (2002) a su tirer des expériences de l'utilisation d'autres logiciels existants tels que MEPLAN, TRANUS, METROSIM, ITLUP, DRAM/EMPAL, etc., pour concevoir son logiciel. Il intègre donc toutes les fonctionnalités d'un logiciel de prévision de l'occupation du sol, en particulier un modèle de prix du foncier et des modèles de choix discret de localisation des ménages et des entreprises ;

- le logiciel a été conçu dès le départ pour fonctionner en interaction avec différents modèles externes classiques de prévision de trafic. De plus, en post-traitement, les résultats peuvent être exportés dans un Système d'information géographique (SIG) pour être visualisés, ce qui constitue un élément de communication et de diffusion incontournable aujourd'hui ;

- le logiciel fonctionne sur le principe de la micro-simulation : chaque ménage, chaque emploi et chaque unité géographique (cellule de 500 mètres de côté) sont représentés dans le modèle, chacun avec ses caractéristiques et ses comportements. Toutes les hétérogénéités sont ainsi prises en compte. Le modèle intégré va faire passer chaque agent dans le processus de simulation (par exemple par la probabilité pour un ménage et pour un emploi de se localiser dans telle cellule, la probabilité pour une cellule vacante de passer à la catégorie habitat, etc.). En modélisation de trafic, on peut faire le parallèle avec les modèles de micro-simulation de type VISSIM (logiciel commercialisé par PTV) ;

– l'équipe a su fédérer l'ensemble des utilisateurs potentiels dans une communauté « virtuelle » en créant une liste de diffusion internationale et un site Internet constamment mis à jour (www.urbansim.org). Chaque mois, des nouveaux utilisateurs rejoignent cette communauté. On trouve sur le site de très nombreux articles, des rapports d'étude et de la documentation en ligne sur le logiciel ;

– l'équipe de P. Waddell a opté pour la stratégie du logiciel dit « libre » (sous licence publique GNU) pour la diffusion d'URBANSIM. Celui-ci est développé entièrement en langage Java (langage « libre » lui aussi) et en langage Python dans sa dernière version. Le code source est disponible de sorte que tout utilisateur peut l'utiliser, le modifier et le redistribuer. URBANSIM est gratuit et téléchargeable sur Internet. Il est décrit comme un outil modulaire, ouvert et robuste³.

2.3. La modélisation des interactions transport-urbanisme : des simplifications nécessaires

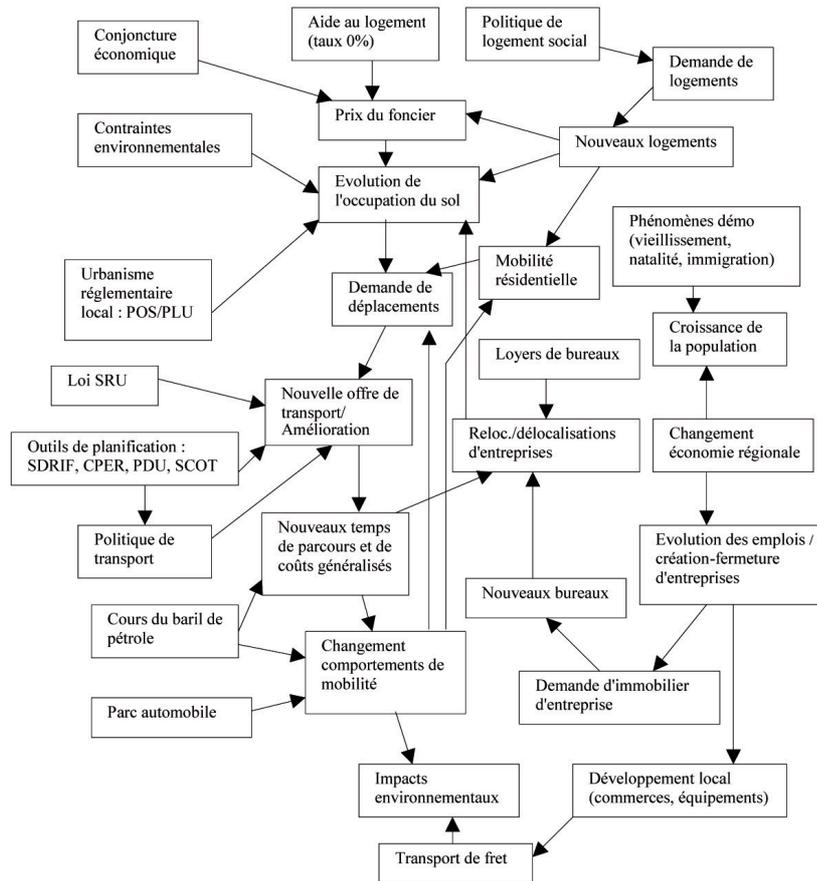
Ce projet de modélisation intégrée SIMAURIF est une première en Ile-de-France, rendu encore plus ardue par la dimension de l'aire d'étude (12 000 km²) et la complexité des interactions spécifiques au cas français (Figure 1). Il est évident que l'on ne pouvait pas modéliser l'ensemble de ces interactions. On a choisi de modéliser les quatre phénomènes principaux suivants :

- le choix de localisation résidentielle des ménages ;
- le choix de localisation des emplois ;
- le choix de développement du type urbain ou le choix de localisation de projet urbain ;
- le niveau de prix de l'immobilier.

3. On exposera cependant les grandes difficultés que nous avons rencontrées dans son utilisation. Il faut reconnaître que c'est la gratuité de ce logiciel qui a été l'élément déclencheur de notre recherche en 2003. Il s'avère que P. Waddell a été mis au courant dès le début de notre recherche et de notre intérêt pour son logiciel. Il a accepté de nous apporter toute l'aide possible, tant au niveau de conseils méthodologiques qu'en adaptant, si nécessaire, le code informatique d'URBANSIM au cas de l'Ile-de-France. En effet, le logiciel a été conçu dans le contexte du système et de l'économie urbaine américaine. Les variables expliquant tel phénomène aux Etats-Unis (par exemple le prix du terrain pour le choix résidentiel, le taux de motorisation pour le choix modal, etc.) ne sont peut-être pas discriminantes dans le cas de la région Ile-de-France. De même, la variable d'accessibilité par le mode « véhicule particulier » apparaît sur-représentée dans les différents modules d'URBANSIM, ce qui est compréhensible dans le cas américain où le véhicule particulier est le mode prépondérant. Mais on ne trouve pas de variables décrivant l'accessibilité et la desserte par les transports en commun. Il a fallu remédier à cette lacune lors de l'adaptation au cas de l'Ile-de-France.

Figure 1

**Schéma des interactions complexes entre système urbain
et système de transports en Ile-de-France**



On cherche parmi l'ensemble des variables pouvant influencer ces phénomènes à faire ressortir, lorsque les variables sont réellement déterminantes, celles qui ont trait au transport : temps de parcours en mode VP (véhicule particulier) et en mode TC (transport en commun), accessibilité locale aux TC, accessibilité régionale (« log somme »), distance aux voies rapides et aux routes nationales, distance au centre de Paris. Par ailleurs, la Figure 1 a un grand défaut : elle ne montre pas la dimension du temps. Or ce sont justement les effets à différents termes qu'un modèle intégré essaie de simuler. On simule donc sur une longue période, en l'occurrence de 1999 à 2026, avec un pas d'un an pour le modèle de trafic et un pas de trois ans pour URBANSIM

(Figure 2). C'est en ce sens que le modèle intégré est dit « dynamique », alors que dans un modèle statique⁴, le temps n'est pris en compte qu'une seule fois de manière exogène à l'année de mise en service du projet.

En résumé, un modèle intégré doit prendre en compte au moins les facteurs suivants :

- les choix de localisation résidentielle des ménages ;
- les choix de localisation des entreprises ;
- les marchés fonciers et immobiliers (résidentiel, bureaux, commerces) ;
- les choix de localisation des projets immobiliers ou de développement du type urbain ou d'évolution du mode d'occupation du sol ;
- les comportements de mobilité (choix de la destination, du mode) ;
- les gains d'accessibilité ;
- le temps.

La complexité vient alors du fait qu'il faut relier ces modèles partiels, sachant que les sorties des uns peuvent être les entrées des autres, puis les assembler pour une exécution automatisée dans une boucle de rétroaction temporelle⁵.

2.4. SIMAURIF dans la modélisation française

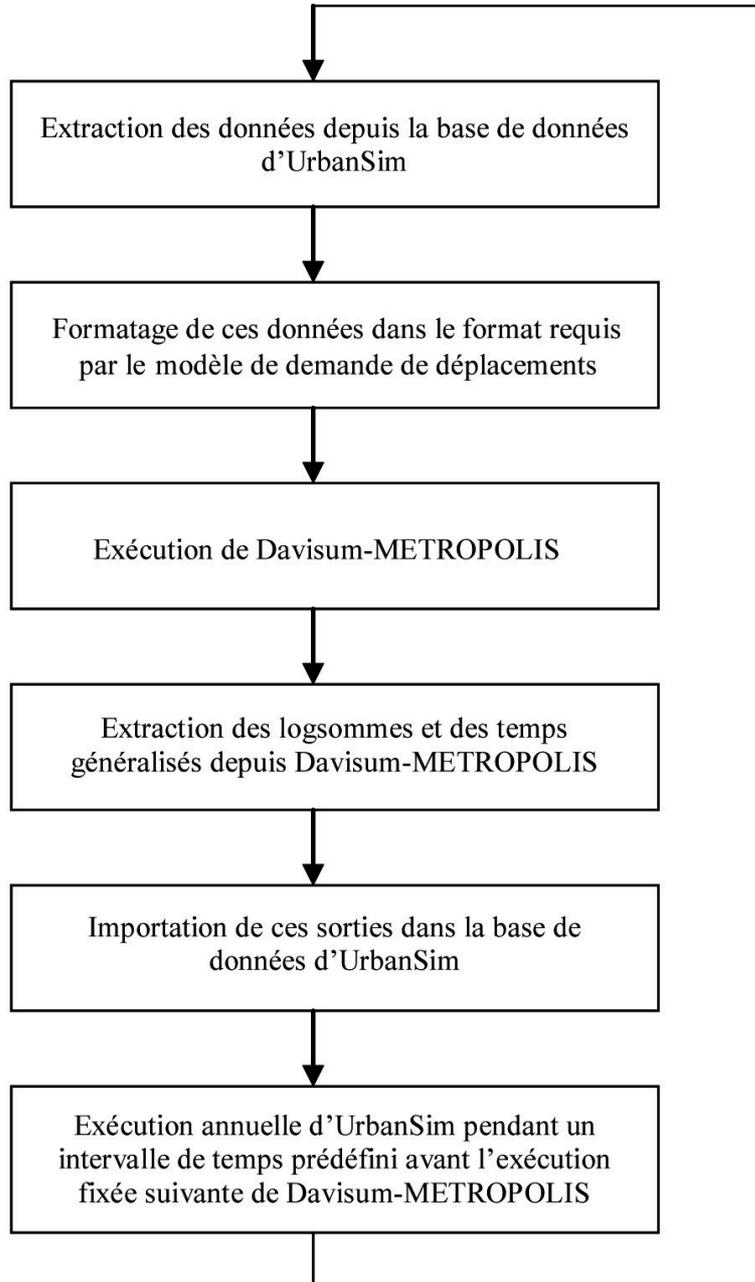
Cinq projets de modélisation urbanisation/transport sont actuellement réalisés dans le cadre du PREDIT. Ils visent tous à simuler l'interaction transport-urbanisme mais se fondent sur des principes différents : SIMAURIF et SIMBAD (v. le Chapitre 4) optent pour une modélisation désagrégée, dynamique et basée sur la théorie des choix discrets. SIMAURIF cherche à contribuer à l'évaluation socio-économique, alors que SIMBAD est plutôt orienté sur l'évaluation environnementale avec le calcul d'indicateurs de développement durable. Les trois autres modèles se basent sur les systèmes multi-agents issus de l'approche « automate cellulaire » mais s'en différencient par la prise en compte de la confrontation des règles de décisions des agents. MIRO (v. le Chapitre 7) est développé par le Laboratoire d'Informatique de l'Université de Franche-Comté, ILOT (Interactions Localisations Transport ; v. le Chapitre 11), comme SIMBAD, par le Laboratoire d'économie des transports (LET) à Lyon, et MOBISIM

4. Cf. l'exemple du modèle PIRANDELLO© au chapitre 5.

5. Cette complexité est également évoquée dans le chapitre 2, consacré à MOBISIM.

Figure 2

Schéma du bouclage dans le temps entre DAVISUM-METROPOLIS et URBANSIM produisant la dynamique du système



par l'entreprise ATN (Application des techniques nouvelles), et repris en 2008 par le laboratoire ThéMA (CNRS et Université de Franche-Comté) à Besançon. La grande innovation de SIMAURIF est le traitement de données désagrégées à une échelle infracommunale.

SIMAURIF est par ailleurs le premier projet terminé dans le monde, en dehors des Etats-Unis, à utiliser URBANSIM. Aux Etats-Unis, seules trois villes sont allées, semble-t-il, au bout de la démarche : Puget Sound, Salt Lake City et le Comté de Volusia (Floride). Il existe de nombreux projets dans le monde, mais aucun à notre connaissance n'était encore terminé en décembre 2007 : Detroit, Honolulu, Houston, Phoenix (Arizona), San Francisco, Burlington (Vermont), Durham (Caroline du Nord), Melbourne, El Paso (Texas), Amsterdam (Pays-Bas), Tel Aviv (Israël), Pescara, Rome et Turin (Italie), Genève, Zurich et Lausanne (Suisse).

3. PRINCIPES DU MODÈLE SIMAURIF

3.1. L'indicateur d'accessibilité « log somme »

Décrivons d'abord le modèle Logit multinomial. Il fournit une expression simple et facilement interprétable des probabilités de choix (McFadden, 1978). A l'individu n et à chaque alternative j , $j = 1, \dots, J$, on associe une utilité aléatoire :

$$U_{nj} = V_{nj} + \varepsilon_{nj}, \forall j$$

où V_{nj} est l'utilité représentative, connue par le chercheur, et où les perturbations e_{n1}, \dots, e_{nJ} sont des variables aléatoires indépendantes et identiquement distribuées, dont la distribution est une distribution de Gumbel standard (ou loi des valeurs extrêmes), et dont la fonction de répartition et la densité sont les suivantes :

$$F(\varepsilon_{nj}) = \exp(-\exp(-\varepsilon_{nj}))$$

$$f(\varepsilon_{nj}) = F'(\varepsilon_{nj}) = \exp(-\varepsilon_{nj})F(\varepsilon_{nj})$$

L'hypothèse d'indépendance des erreurs est une hypothèse restrictive qui n'a plus cours dans le modèle Logit emboîté que l'on trouve dans la version OPUS/URBANSIM de janvier 2009. Néanmoins, cette hypothèse d'indépendance peut aussi s'interpréter comme le résultat naturel d'un modèle bien spécifié. Le chercheur a à sa disposition suffisamment d'informations pour bien spécifier V_{nj} de sorte que la portion d'utilité inobservée ε_{nj} représente essentiellement un « bruit blanc ».

On suppose que l'individu n choisit l'alternative lui procurant l'utilité maximale et que les alternatives sont indépendantes les unes des autres (hypothèse IIA, *Independance of irrelevant alternatives*), contrairement au modèle Probit. En conséquence, on peut démontrer que la probabilité que cet individu choisisse l'alternative i est :

$$P_{ni} = \frac{e^{V_{ni}}}{\sum_j e^{V_{nj}}}$$

En général, l'utilité représentative, V_{nj} , est linéaire par rapport aux paramètres :

$$V_{nj} = \beta' x_{nj}$$

où x_{nj} est le vecteur des variables observées qui sont reliées à l'alternative j . Dans ce cas, la probabilité que l'individu n choisisse l'alternative i prend la forme suivante :

$$P_{ni} = \frac{e^{\beta' x_{ni}}}{\sum_j e^{\beta' x_{nj}}}$$

D. McFadden a démontré en 1974 que la fonction « log vraisemblance » associée à ces probabilités était globalement concave par rapport aux paramètres β .

Le terme $I_n = \ln(\sum_{j=1}^J e^{V_{nj}})$ est généralement appelé le « log somme ».

Il représente à une constante près l'espérance d'utilité de l'individu n .

Dans le projet SIMAURIF, nous avons été confrontés au problème de l'estimation sur un sous-ensemble d'alternatives, et ce pour chacun des sous-modèles. En effet, l'estimation d'un modèle Logit standard s'effectue habituellement par des méthodes de maximum de vraisemblance standards. Néanmoins dans certains cas, le nombre d'alternatives auquel un agent fait face est tellement élevé que l'estimation des paramètres du modèle peut se révéler très coûteuse, voire impossible. Avec un modèle Logit, l'estimation peut être mise en œuvre sur un sous-ensemble d'alternatives sans entraîner de problème d'inconsistance (Ben Akiva et Lerman, 1985). Supposons par exemple que l'on examine un modèle où les agents ont le choix entre 100 alternatives. Il est alors possible de procéder à une estimation sur un sous-ensemble de 10 alternatives seulement pour chaque agent faisant partie de l'échantillon étudié. Le sous-ensemble examiné contient alors l'alter-

native choisie par l'agent plus 9 autres alternatives qui ont été sélectionnées de façon aléatoire parmi les 99 restantes. Si toutes les alternatives ont la même probabilité d'être sélectionnées dans le sous-ensemble, alors la procédure d'estimation sur le sous-ensemble est équivalente à l'estimation sur l'ensemble complet des alternatives. Si en revanche les alternatives ont une probabilité inégale d'être sélectionnées, il est alors nécessaire de mettre en œuvre des procédures d'estimation plus complexes.

SIMAU-RIF met en œuvre le concept d'accessibilité qui est à l'interface entre système de transport et système urbain. Elle est mesurée par le « log somme ». Concrètement, pour chacune des cellules, on calcule les quatre « log somme » suivants :

- EmploiVP : accessibilité à l'emploi calculée à partir des temps de parcours en voiture en heures de pointe ;
- EmploiTC : accessibilité à l'emploi calculée à partir des temps de parcours en transport en commun ;
- ComVP : accessibilité aux commerces calculée à partir des temps de parcours en voiture en heures de pointe ;
- ComTC : accessibilité aux commerces calculée à partir des temps de parcours en transport en commun.

Pour cela, la formule de l'accessibilité proposée par J. Poulit (1974) a été utilisée. Elle est basée sur la prise en compte du logarithme des biens offerts : $\log(Q_j)$ où Q_j représente soit les emplois, soit les commerces disponibles dans la cellule j , suivant la variable d'accessibilité souhaitée. $\log(Q_j)$ caractérise en fait, à un facteur près, l'intérêt que l'utilisateur attribue à la possibilité de pouvoir disposer à sa destination d'un marché d'emplois, de commerces ou de biens égal à Q_j . Il s'agit là du gain associé au déplacement. De ce terme positif, il convient de retirer le coût généralisé du transport (C_{ij}). La satisfaction ressentie par l'utilisateur s'écrit alors de la façon suivante :

$$S_{ij} = \lambda \log(Q_j) - C_{ij} \quad [1]$$

où :

- λ est un facteur de pondération qui vaut $\lambda = \frac{C_0}{\alpha}$, C_0 étant le coût d'une heure de transport⁶, et α est le coefficient exprimant la rapidité de l'effet d'atténuateur de la distance dans la loi de distribution des déplacements (les valeurs de α ont été calculées pour les motifs Domicile→Travail+affaires professionnelles et Domicile→Achats) ;

6. Le rapport « Boiteux II » préconise les valeurs suivantes : 11,6 € pour le motif Domicile→Travail et 6,4 € pour le motif Domicile→Achats (Commissariat Général au Plan, 2001)

– C_{ij} est le coût généralisé du transport qui vaut $C_{ij} = C_0 t_{ij}$, t_{ij} étant le temps de transport nécessaire pour aller de la cellule i à la cellule j

L'équation [1] se réécrit de la façon suivante :

$$S_{ij} = \lambda \log \left(Q_j \exp \left[-\frac{C_{ij}}{\lambda} \right] \right) \quad [2]$$

Les résidents d'une cellule i , avant d'effectuer leur déplacement, prennent en compte l'ensemble des destinations potentielles qui leur sont offertes. Afin d'apprécier la satisfaction moyenne de la collectivité résidant en i , il convient d'étendre l'interprétation économique précédente à l'ensemble des liaisons issues de i . J. Poulit (1974) démontre que la satisfaction d'un résident de la zone i vis à vis de l'ensemble des biens offerts par l'ensemble des zones j qui entourent la zone i est égale à :

$$S_i = \lambda \log \left(\sum_j Q_j \exp \left[-\frac{C_{ij}}{\lambda} \right] \right) \quad [3]$$

Ainsi, l'usager prend en considération l'ensemble des biens qui l'entourent, les pondère par l'effet atténuateur de la distance et en fait la somme. L'augmentation relative de cette somme est l'indicateur de satisfaction auquel il est sensible. C'est cette dernière formule⁷ qui a permis de calculer les variables d'accessibilité. Dans le cas des deux variables d'accessibilité à l'emploi, Q_j correspond au nombre d'emplois de la cellule j . Dans le cas des deux variables d'accessibilité aux commerces, Q_j correspond au nombre de surfaces commerciales de la cellule j . Quant aux temps de transports t_{ij} , ils sont calculés par METROPOLIS pour les temps VP en heures de pointe (donc après affectation de la matrice origine-destination) et par DAVISUM pour les temps TC⁸. Plus S_i est grand, plus la zone i est accessible. Il est intéressant de remarquer que les modèles Logit sont autant à la mode depuis le milieu des années 1990 que l'étaient les méthodes de recherche opérationnelle dans les années 1960-70 (programmation linéaire, optimisation, etc.). Or les problèmes de modélisation de la croissance

7. Le passage de la formule [2] à [3] peut surprendre du point de vue mathématique, la fonction \log n'étant pas linéaire. En fait la formule [3] ne s'obtient pas en additionnant sur l'indice j , mais par la transposition de l'expression de la satisfaction ressentie par l'usager pour une OD donnée à celle ressentie par l'usager pour l'ensemble des destinations depuis la zone i .

8. $\left[-\frac{C_{ij}}{\lambda} \right] = [-\alpha t_{ij}]$

d'une métropole se posaient déjà il y a 50 ans. Seuls leur mise en équation et les moyens informatiques étaient différents.

3.2. Déroulement chronologique du projet et échelle d'étude

Le déroulement chronologique du projet, de 2003 à 2008, reflète la méthodologie employée. Elle se compose de plusieurs étapes :

- la revue de la littérature sur les modèles de trafic, les modèles d'urbanisation et les modèles intégrés ;
- l'étude théorique d'URBANSIM (les quatre modèles principaux et les cinq modèles secondaires non évoqués ici) ;
- une première prise en main d'URBANSIM sur une étude de cas américaine (Eugène-Springfield) ;
- la conception de l'architecture du modèle intégré SIMAURIF ;
- le recalage du modèle de demande de déplacements de l'IAU en 606 zones à partir de l'Enquête globale transports de 2001, pour trois motifs de déplacements ;
- la constitution d'une base de données géolocalisées et désagrégées d'entrée en 50 000 cellules carrées sur l'Ile-de-France ;
- la constitution de bases de données géolocalisées et désagrégées d'estimation à partir de différentes sources de données (enquêtes ménages, recensements, enquêtes emplois, mode d'occupation du sol, base des Notaires, etc) ;
- une estimation économétrique et un calage des quatre modules principaux d'URBANSIM au niveau du maillage en 50 000 cellules sur la période 1990-1999 ;
- le paramétrage de l'ensemble d'URBANSIM avec la structure initiale de données ;
- le recalage de METROPOLIS à partir d'une nouvelle base de comptages ;
- le recalage de la partie affectation en TC du logiciel DAVISUM de l'IAU ;
- la mise au point de l'interface entre URBANSIM et DAVISUM-METROPOLIS ;
- la construction des graphes « transport » sur la période 1990-1999 ;
- l'assemblage puis le calage de l'ensemble URBANSIM/DAVISUM/METROPOLIS sur la période 1990-1999 ;
- la construction des graphes « transport » sur la période 1999-2026 ;
- l'élaboration des scénarios de la Tangentielle Nord ;

– la simulation des scénarios de la Tangentielle Nord sur la période 1999-2026.

Par défaut, URBANSIM fonctionne sur des unités géographiques appelées cellules. Ce sont des carrés de 500 mètres de côté qui partitionnent les 12 000 km² de l’Ile-de-France. Pour le modèle de trafic, c’est un découpage en 606 zones (dont 80 à Paris et 34 à l’extérieur de la région). Pour le modèle de prix, qui n’a pu être estimé au niveau de la cellule, on est passé par l’intermédiaire de la commune.

La période de calage est la période 1990-1999. On estime et on cale chaque sous-modèle sur cette période, puis le modèle intégré est calé globalement sur cette période. DAVISUM-METROPOLIS tourne par pas d’un an ; URBANSIM tourne aux années 1990, 1993, 1996, 1999. Les résultats de l’exécution sont comparés aux données observées en 1999. Il y a donc une différence avec les modèles de trafic purs pour lesquels on parle d’une « année » de calage (ou de référence) alors que pour les modèles intégrés, il faut parler de « période » de calage. Cela suppose aussi qu’il faut construire les bases de données à deux années : 1990 et 1999. C’est un double travail. On peut légitimement critiquer le choix d’une période trop courte (10 ans) pour caler le modèle intégré. On aurait pu prendre la période 1982-1999 mais on aurait été confronté au problème de disponibilité de données pour l’année 1982. Une fois le modèle intégré calé, on peut le faire « tourner » sur la période de simulation 1999-2026 avec les mêmes pas de temps. Les résultats en 2026 sont ensuite cartographiés, analysés et interprétés.

3.3. Des bases de données distinctes

Il faut distinguer les bases de données d’entrée du modèle intégré des bases de données d’estimation, qui servent à estimer les différents sous-modèles. En entrée du modèle URBANSIM, on trouve trois tables principales : « gridcell », « households » et « jobs ». Ces tables comportent des données exhaustives désagrégées et sont construites pour deux années : 1990 (année de base) et 1999 (année cible). Les bases de données source sont géolocalisées :

– la table « gridcell » comporte pour chacune des 50 000 cellules de 500 mètres de côté une cinquantaine d’attributs, par exemple le nombre de logements, la valeur de ces logements, la distance au centre de Paris, la surface en zone inondable, la surface en zone urbaine sensible, etc. ;

– La table « households » comporte 4 232 526 lignes correspondant au nombre de ménages en 1990. Chaque ménage est renseigné par

quelques caractéristiques (par exemple, sa taille, sa tranche de revenu, sa cellule de résidence, etc.) ;

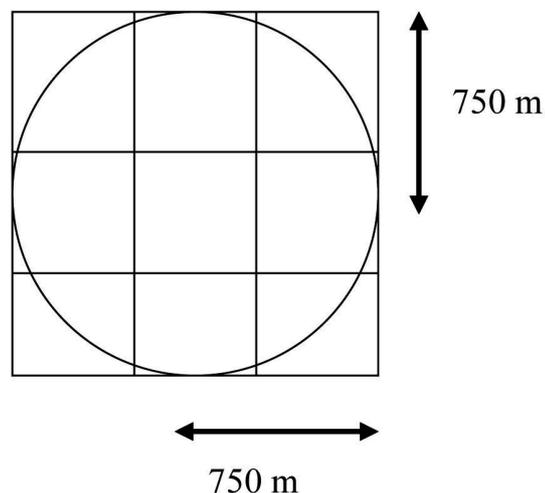
– La table « jobs » comporte 5 075 974 lignes correspondant au nombre d'emplois en 1990. Chaque emploi est renseigné par sa catégorie (on en a distingué 8) et par sa cellule de localisation.

Une grande partie de la table « gridcell » a été construite grâce au Système d'information géographique régional (SIGR) de l'IAU et ses très nombreuses couches référencées, dont la couche MOS (Mode d'occupation du sol). Cette couche MOS comporte plus de 380 000 polygones répartis en 83 postes différents. L'intersection entre cette couche et le maillage en 50 000 cellules permet d'extraire des informations d'occupation du sol pour chaque cellule. La table « households » est quant à elle basée sur le fichier du Recensement général de la population (RGP). Celui-ci présente l'avantage d'être exhaustif. Enfin, la table « jobs » est également basée sur le fichier du RGP ; celui-ci n'est connu qu'à l'échelle de l'îlot INSEE (chaque emploi est localisé dans un îlot). Pour identifier le carré de 500 mètres où se trouve l'emploi, il a été nécessaire d'effectuer une intersection spatiale entre la couche îlot INSEE et le maillage.

Pour l'estimation des sous-modèles, il est nécessaire de travailler au niveau de la cellule, donc d'utiliser des bases de données infracommunales géolocalisées. Partant du principe anglo-saxon (*garbage in, garbage out*), nous avons fourni dans ce projet un effort pour construire les bases de données, et ce grâce à la puissance d'un Système d'information géographique. Les données ont ainsi été préparées dans le découpage de la région en mailles carrées de 500 mètres de côté. En fait, nous n'avons pas choisi ce découpage : c'est une structure géographique imposée par URBANSIM dans ses versions 2 et 3. La question fondamentale est de savoir si ce découpage fin est vraiment pertinent, et si oui, s'il est « rentable ». Nous répondons oui, sauf pour le modèle de prix : il a été impossible d'estimer un modèle de prix du logement dans un découpage aussi fin et sur une aussi large aire d'étude. En revanche, pour les autres modèles, le découpage en cellules carrées a permis deux apports intéressants : la prise en compte de la notion de voisinage et la possibilité de produire des résultats à l'échelle infracommunale (autour des gares de la Tangentielle Nord par exemple). Le voisinage d'une cellule est constitué des huit cellules voisines. Par exemple, UrbanSim calcule automatiquement pour chaque cellule la surface commerciale totale comprise dans les huit carrés voisins (Figure 3).

Ce calcul automatique par URBANSIM permet de caractériser chaque cellule par une sorte de valeur d'accessibilité locale. Plus cette

Figure 3

Voisinage d'une cellule

valeur est élevée, plus elle permet d'atteindre des opportunités dans son voisinage. Mais il faut rester vigilant lorsqu'on introduit ces variables de voisinage, et ne pas générer des problèmes d'autocorrélation spatiale. Il y a également un second problème que l'on ne peut ignorer : le biais d'agrégation. Lorsqu'on superpose la couche des îlots MOS de population et la couche du maillage en 50 000 cellules pour affecter les populations sur les cellules, il se produit une perte d'information, un biais ou une distorsion. De plus, la fiabilité des résultats reste à démontrer à cette échelle. Il y a sans doute une nécessité d'estimer des modèles plus fins, comportant plus de variables que celles que l'on a retenues, pour que les résultats soient eux-mêmes exploitables à un niveau plus fin. Mais on est ensuite confronté au problème de l'élaboration des projections de ces nouvelles variables. On en arrive à devoir faire un compromis, pas toujours satisfaisant intellectuellement. Enfin, il faut encore souligner qu'au niveau cellulaire, seuls des modèles simples et prédictifs peuvent être estimés de manière fiable. Si l'on cherche à estimer des modèles explicatifs, la modélisation au niveau cellulaire ne donne pas des coefficients de régression très acceptables. C'est pour cette raison que la dernière version OPUS/URBANSIM permet de travailler sur des découpages de taille variable, autres que le maillage en cellules carrées, par exemple directement sur le découpage communal ou le découpage en îlot MOS. En contrepartie, on perd les avantages de la notion de voisinage.

Plusieurs bases de données ont été utilisées pour caler les modèles :

- pour le modèle de localisation résidentielle des ménages, on a utilisé l'EGT de 2001-2002. Cette enquête comporte un carroyage de 300 mètres de côté sur la région. Une correspondance a été trouvée entre ce carroyage et le maillage en 50 000 cellules. Pour le modèle de localisation des emplois, on disposait de l'Enquête régionale emplois (ERE) de 1997 et 2001. Celle de 2001 est entièrement géolocalisée ;
- pour le modèle de prix, on a utilisé la base de données géolocalisées des notaires BIEN. Le calage du modèle a d'abord été effectué au niveau cellulaire sur deux territoires tests, celui du RER E et celui du tramway T1, mais la qualité de ces tests s'est révélée faible. Au final, le modèle a été estimé sur des données classiques de prix moyens à la commune ;
- pour le modèle de choix de développement urbain, c'est la base de données EVOLUMOS de l'IAU qui donne l'inventaire numérisé de l'occupation du sol en 1990 et 1999 ;
- pour recalibrer le modèle de demande de déplacements (les trois premières étapes), c'est l'EGT 2001-2002 qui a été exploitée ;
- pour recalibrer les modèles d'affectation sur METROPOLIS et sur DAVISUM, enfin, on a utilisé des bases de données de comptages provenant de la Direction Interdépartementale des Routes d'Ile-de-France (DRIF) et des Conseils généraux, des « serpents de charge » et des résultats d'enquêtes origine-destination aux gares provenant de la SNCF et de la RATP.

Lorsque le problème classique de données manquantes s'est présenté, deux possibilités se sont offertes : la fusion de bases de données ou la construction de données par modélisation. Par exemple, pour imputer un revenu à chaque ménage (la donnée de revenu n'est pas disponible dans le RGP), on a utilisé la base de données de la Direction générale des impôts (DGI). Autre exemple, pour certaines communes dont la donnée de prix moyen de vente d'appartement était inconnue, on a créé un modèle linéaire pour combler les manques.

4. UNE APPLICATION AU CAS DE L'ILE-DE-FRANCE

Pour l'appliquer au cas de l'Ile-de-France, il a été nécessaire d'adapter URBANSIM à deux niveaux : la structure de données qui est pré-établie et la spécification des sous-modèles :

- pour la structure de données, certains attributs environnementaux ont été remplacés, d'autres ajoutés (par exemple, les variables

« zone inondable » et « zone de protection ZNIEFF⁹ ». On a également introduit des variables sur les transports en commun, cruellement absentes dans URBANSIM. D'autres variables concernant l'environnement urbain ont également été ajoutées, comme par exemple l'appartenance d'une cellule à une zone urbaine sensible. Enfin, les activités ont été simplifiées en les regroupant toutes en une seule classe ;

– pour la spécification des sous-modèles, le modèle de prix du foncier a été transformé en un modèle de prix de l'immobilier résidentiel. Le modèle spécifié prend une forme log-linéaire et non pas linéaire comme c'est le cas par défaut. Le modèle de choix de développement urbain est quant à lui un modèle de transition d'un type à un autre, dont le principe consiste à considérer la cellule comme un agent et à déduire l'évolution de son mode d'occupation du sol selon ses caractéristiques actuelles. On ramène ainsi l'évolution du MOS à un choix discret. Les différents types de MOS sont regroupés en trois types généraux : « vacant », « habitat » et « activité ». Les cellules non urbanisables (à cause des caractéristiques du terrain ou de la législation) ne sont pas prises en compte par ce modèle. On voit bien ici que la transposition d'URBANSIM au cas de l'Ile-de-France n'a pas été immédiate ni automatique.

4.1. Prise en compte des contraintes environnementales et politiques

Les contraintes environnementales et les contraintes politiques ont été prises en compte dans la table des cellules. Les contraintes environnementales sont par exemple la surface de la cellule incluse dans une zone inondable ou une zone de protection des monuments. Les contraintes politiques peuvent être d'ordre local ou régional. La base des Plan locaux d'urbanisme (PLU) a été croisée spatialement avec le maillage en 50 000 cellules. Chaque cellule est aussi renseignée par son appartenance à une zone urbanisable selon le Schéma directeur régional d'Ile-de-France (SDRIF) de 1994. Ensuite, la prise en compte de ces contraintes se fait au moment du choix des alternatives lors de l'estimation des modèles Logit. Ainsi, une cellule non urbanisable (car ayant trop de contraintes) est d'emblée exclue de l'ensemble des alternatives sur lequel s'effectue le tirage aléatoire.

9. ZNIEFF : Zones naturelles d'intérêt écologique faunistique et floristique.

4.2. Estimation et calage des sous-modèles

La principale difficulté réside dans la construction des bases de données d'estimation ; c'est une tâche laborieuse et ingrate, peu reconnue et très gourmande en temps de travail. Un second problème réside dans l'impossibilité d'implémenter des modèles trop sophistiqués dans URBANSIM. En fait, au départ, on a estimé les sous-modèles indépendamment les uns des autres, avec une démarche économétrique rigoureuse et autant de variables que possible, quitte à en modéliser de nouvelles pour satisfaire nos besoins. Ces estimations sont chronophages, et au final quasiment impossibles à implémenter dans la structure pré-établie d'URBANSIM. De plus, on perd la vision globale du modèle intégré et les interactions existantes entre les différents modèles. Une solution a alors consisté à passer à une méthode d'estimation plus systématique, en utilisant une base de variables commune à tous les sous-modèles, en nombre limité, dans le but d'aboutir à un modèle utilisable en prédiction et non plus un modèle explicatif. Parmi les variables exogènes testées, on a essayé de faire ressortir des variables transport (accessibilités locales et régionales en VP et en TC, temps d'accès au centre de Paris) mais la base de variables était incomplète en ce qui concerne les coûts de transport. Une troisième difficulté a concerné le modèle de choix de développement urbain. En 2005, nous avons estimé un modèle de transition conformément à la version d'URBANSIM 2. En 2007, la nouvelle version d'URBANSIM a modifié radicalement ce modèle en un modèle de choix de localisation de projet urbain. Nous avons choisi de conserver le premier modèle, quoique, dans la logique d'URBANSIM, le nouveau modèle est plus pertinent, car il permet de simuler des contraintes chiffrées de capacité pour les deux modèles de localisation et distingue le promoteur immobilier comme un nouvel agent économique. C'est en général ce modèle qui est le moins bien traité dans les modèles intégrés. Enfin, une quatrième difficulté a consisté à se prémunir des problèmes d'auto-corrélation spatiale (tests de Durbin et Watson, de Box-Pierce), d'endogénéité des variables, de colinéarité des variables et d'hétéroscédasticité¹⁰ (tests de White, de Goldfeld et Quandt, de Breusch et Pagan). La tâche de détection et de résolution de ces problèmes incombait au spécialiste en économétrie.

10. L'analyse des résidus en modélisation linéaire consiste à évaluer comment les résidus sont distribués en fonction des valeurs prédites de la variable dépendante. Si la dispersion des résidus n'est pas homogène, on parle d'hétéroscédasticité.

Le problème du calage repose quant à lui avant tout sur une question d'assemblage. En effet, les modules ont été estimés indépendamment les uns des autres. Il est ainsi possible de valoriser du point de vue de la recherche chaque estimation ; mais le but premier n'est pas ici de publier les résultats de chacun des sous-modèles. Il s'agit au contraire de réaliser un « calage global », tâche autrement plus difficile. En quoi consiste ce calage ? Dès juin 2003, lors de l'élaboration de la méthodologie du projet, nous avons eu l'intuition de l'importance de cette « phase de calage global ». Elle consiste, en pratique, en l'assemblage de tous les sous-modèles estimés et en l'exécution sur la période 1990-1999 de l'ensemble dans une boucle de rétroaction annuelle (un an pour URBANSIM et trois ans pour le modèle de trafic), sachant que les sorties d'un sous-modèle une année peuvent être les entrées d'un autre sous-modèle la même année ou l'année suivante. L'objectif de ce calage global était alors de reconstituer la situation observée en 1999, c'est-à-dire la répartition géographique des populations et des emplois à un niveau infracommunal, le mode d'occupation du sol en trois postes agrégés et les prix moyen des logements au niveau communal.

Le deuxième aspect du calage global est l'interaction entre les différents modèles au sein d'URBANSIM. On s'est ici posé la question de savoir si cette interaction était déjà implémentée. On peut regretter que cet aspect pourtant fondamental soit très mal expliqué dans la documentation, voire pas du tout. C'est une approche empirique qui nous a permis de comprendre progressivement comment les sorties d'un modèle alimentent les entrées d'un autre et comment les variables de « gridcells » et les tables « households » et « jobs » sont mises à jour annuellement¹¹. Formellement, le calage global consiste alors à résoudre un problème d'optimisation : minimum [(observé – simulé)²]. On peut imaginer une procédure automatique de calage qui mettrait en œuvre une boucle de rétroaction avec un critère d'arrêt à partir du principe des moindres carrés ou à partir du maximum de vraisemblance.

Concrètement, nous avons calé le modèle intégré au niveau départemental (de même d'ailleurs que le modèle de demande de déplacements). Après analyse des premiers résultats, nous avons décidé de rajouter des constantes pour les indicatrices permettant de favoriser ou de défavoriser tel ou tel département. Par exemple, si nous observons

11. Il est également apparu en fin de projet qu'une compétence manquait à l'équipe : la maîtrise du langage Python. Autant les phases précédentes du projet demandaient des compétences pluridisciplinaires (modélisation de trafic, économétrie, système d'information géographique, gestion de bases de données, connaissance du fonctionnement de la région Île-de-France), autant il s'avérait que cette phase de calage global dans la dernière version OPUS/URBANSIM requerrait essentiellement des compétences en programmation en langage Python.

une surestimation de 4 % du nombre de ménages qui se localisent à Paris, nous ajoutons un coefficient négatif pour l'indicateur Paris, ce qui réduit l'attractivité de Paris. En d'autres termes, l'utilité calculée par le modèle de localisation des ménages était moindre. Nous avons procédé de cette manière pour les quatre sous-modèles d'URBAN-SIM. Avec cette méthode empirique, nous avons pu améliorer les résultats. Il faut savoir qu'une simulation de SIMAURIF sur la période 1990-1999 dure environ quatre heures sur un PC standard, et qu'un bon calage nécessite, selon nous, une centaine de simulations. Il était encore possible d'améliorer ces résultats mais pour des raisons de contrainte de délais, nous avons décidé de ne pas aller au-delà d'un certain niveau de précision.

4.3. Le projet de Tangentielle Nord

Le projet consiste en la création, sur 28 kilomètres, de deux voies dédiées, contigües aux voies de la ligne actuelle dite « Grande ceinture » (Figure 4). Six nouvelles gares seront créées et huit gares existantes réaménagées pour optimiser les correspondances avec les cinq lignes RER, les lignes « Transilien » provenant des gares Paris-Nord et Paris-Saint-Lazare, ainsi qu'avec le tramway T1 (Noisy-le-Sec/Saint-

Figure 4

Plan de situation de la Tangentielle Nord

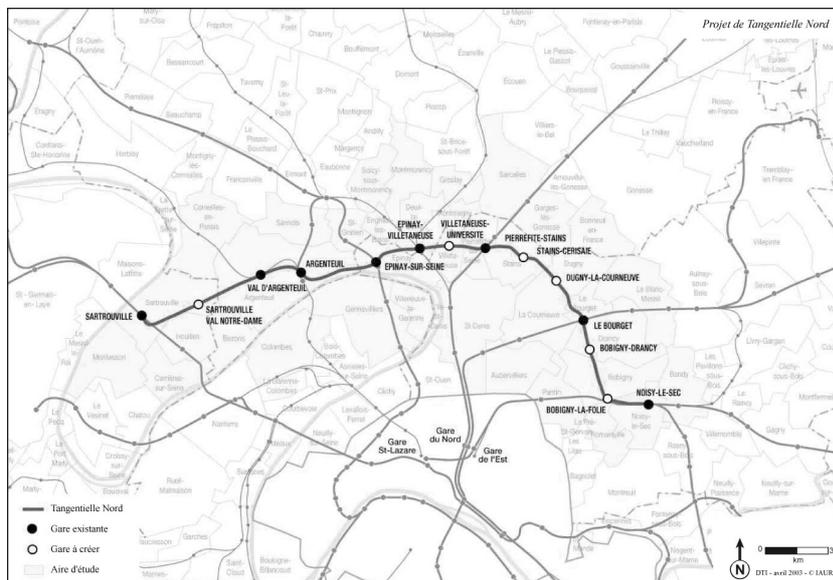
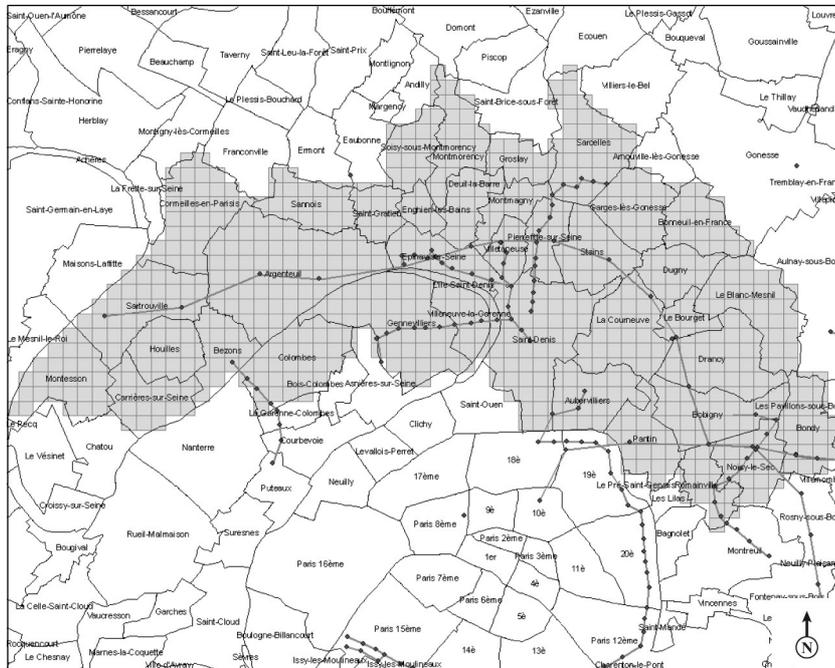


Figure 5
Les 853 cellules du territoire de la Tangentielle Nord



Denis) et le futur Tramway Saint-Denis / Epinay-Villetaneuse. La Tangentielle Nord sera la première rocade ferroviaire en banlieue proche.

L'enquête publique concernant ce projet s'est déroulée en 2006, et son lancement officiel a eu lieu le 30 juin 2008. Une mise en service progressive est prévue, avec l'ouverture de la section Epinay-sur-Seine / Le Bourget en 2014, puis de toute la ligne de Sartrouville à Noisy-le-Sec en 2016 (dans le premier Schéma de principe, la mise en service était envisagée pour 2009). La fréquence prévue est élevée, avec un passage toutes les 5 minutes aux heures de pointe et toutes les 10 minutes aux heures creuses et une ouverture de la ligne de 5h à 24h. La vitesse moyenne est d'environ 50 km/h et le temps de trajet prévu entre Sartrouville et Noisy-le-Sec est de 35 minutes. En ce qui concerne le matériel roulant, il est de type tram-train, c'est-à-dire de type urbain, plus léger, plus court et plus silencieux qu'un RER. La capacité de chaque tram-train est de 500 voyageurs et pourra être portée à 750 dans le futur.

L'aire d'influence élargie de la Tangentielle Nord est constituée de 38 communes, correspondant à 853 cellules de 500 mètres de côté

(Figure 5). Les simulations ont été exécutées sur l'ensemble des 50 000 cellules du découpage, mais les résultats ont été analysés sur l'aire d'étude.

L'aire d'étude comporte environ 1 300 000 habitants en 1999. Cette population est stable mais le solde migratoire est négatif (-9 % en moyenne). Le revenu moyen des ménages est faible, le taux de chômage élevé. Le taux de logement social est élevé (39 % contre 30 % en moyenne en petite couronne), avec des disparités très fortes (Dugny : 77 %, Enghien : 7 %). On trouve aussi une forte population étrangère (19 % contre 14 % en petite couronne) et un faible niveau de qualification (ouvrier : 24 % contre 18 % en petite couronne). L'aire d'étude comporte en 1999 environ 416 000 emplois. Le nombre d'emplois a baissé de 5 500 entre 1991 et 1998. Les deux principaux pôles d'emplois sont Bobigny (30 000 emplois) et Argenteuil (26 000). En ce qui concerne l'occupation du sol, l'habitat individuel constitue 32 % de la surface, l'habitat collectif 12 %, les activités 14 %, les transports (routes, fer, aéroports) 12 % et les espaces ouverts 25 %. Le marché immobilier est peu dynamique. Le collectif domine (3/4 des logements offerts). Les prix sont 20 % en-dessous de la moyenne de la petite couronne. Le parc de logement est très contrasté, avec 71 % de collectif et 29 % d'individuel. Le pavillonnaire est plus ancien que le collectif. Le parc social constitue 42 % du parc total. Il y a des secteurs en difficultés : grands ensembles, copropriétés en difficulté, cités jardins et quartiers pavillonnaires en déclin (Argenteuil, La Courneuve, Drancy).

Ce territoire de 38 communes comporte un certain nombre d'atouts pour son développement économique :

- la pluri-fonctionnalité des sous-territoires desservis ;
- des pôles attractifs ;
- des filières établies ou émergentes ;
- des potentiels de développement importants (nombreuses surfaces affectées aux activités, des terrains mutables, un bassin de main d'œuvre significatif) ;
- une possibilité de maillage sur les axes radiaux par des infrastructures de rocade nord.

En revanche, les faiblesses sont également nombreuses :

- un secteur relativement déprimé, mal identifié du point de vue économique et avec une image dévalorisée ;
- des facteurs défavorables au renouvellement urbain : un tissu qui se renouvelle au coup par coup, un foncier qui reste cher ;
- des équipements majeurs non desservis directement ;

- une faiblesse au niveau des communes situées sur la section centrale de la Tangentielle Nord ;
- une structuration traditionnellement très radiale et un morcellement institutionnel ;
- des sites autour des gares en général assez contraints ;
- une concurrence avec des secteurs à proximité plus attractifs ou en développement ;
- une main d'œuvre sous qualifiée.

De même, en ce qui concerne l'attractivité résidentielle, le territoire présente des atouts :

- proximité des grands centres d'emplois et d'équipements ;
- des tissus d'habitat de qualité ;
- des atouts environnementaux ;
- des situations d'insularité ;
- des potentialités de renouvellement dans les tissus existants ;
- des prix qui restent faibles ;
- des actions fortes d'amélioration du tissu d'habitat : Contrat de ville, Grand projet de ville (GPV).

Mais là encore, les faiblesses constituent un véritable frein au choix de localisation des ménages :

- faible mixité sociale ;
- manque de logements pour les couches moyennes ou aisées de la population ;
- un cadre de vie peu attractif : environnement, services, image du territoire, etc. ;
- une faible valorisation du bâti ;
- un manque de dynamisme de la construction.

Dans ce contexte, la Tangentielle Nord offre des opportunités pour favoriser le développement économique et augmenter l'attractivité résidentielle :

- amélioration du maillage du territoire, du développement des pôles et une mise en réseau des pôles majeurs ;
- amélioration de l'accès à l'emploi et aux équipements ;
- ouverture du territoire à un bassin de main d'œuvre plus large ;
- amélioration du niveau de formation par l'accessibilité aux équipements de formation ;
- renforcement de l'attractivité résidentielle du territoire, en particulier à proximité des gares ;
- renouvellement urbain aux abords des gares ;
- redynamisation dans les tissus urbains.

Enfin, c'est un territoire caractérisé par l'importance des actions déjà engagées depuis dix ans : le Contrat de plan État-Région (CPER), des Fonds européens de développement régional (FEDER), des contrats Région-Département, des actions de l'Établissement public d'aménagement Plaine de France, une anticipation des collectivités pour valoriser l'apport de la Tangentielle (communes, intercommunalité, GEP 93, EPA, GPV, étude bruit de la Région). Il n'en reste pas moins qu'en réalité, il y a beaucoup de velléités à l'encontre du projet et que la mise en service de sa première section a déjà été reportée de 2009 à 2014.

4.4. Elaboration des scénarios

Deux scénarios ont été testés : un scénario de référence sans Tangentielle Nord, et un scénario avec la Tangentielle Nord (mise en service au cours de la période 2014-2017).

4.4.1. Les variables des scénarios

Entre les deux, seules les variables concernant le transport changent. Elles sont mises à jour après l'année de mise en service de la Tangentielle Nord, donc aux années 2017, 2020, 2023 et 2026, sur le découpage en 50 000 cellules :

- le nombre de gares par cellule (cela concerne seulement 14 cellules sur les 50 000)¹² ;
- l'accessibilité « emploiTC »

$$S_i = \lambda \log \left(\sum_j Q_j \exp \left[-\frac{C_{ij}}{\lambda} \right] \right)$$

où Q_j est le nombre d'emplois par zone j , λ est égal à 2,86, et C_{ij} est le temps de déplacement en TC entre les zones i et j ;

- le temps d'accès à Châtelet en TC.

Il est important de noter que les différences entre les deux scénarios ne portent que sur l'offre de transport. Les contraintes environnementales et de politique locale (PLU par exemple) ont déjà été prises en compte dans les bases de données, et sont communes aux deux scénarios. Cela signifie que si les simulations montrent, par exemple, un gain en emplois sur le territoire entre les deux scénarios à l'horizon futur, ce

12. On peut s'interroger ici sur la sensibilité d'un modèle à la modification infiniment faible d'une variable. À ce stade, on s'est inquiété de savoir si les résultats des deux scénarios montraient des différences.

gain sera un minimum car il sera uniquement imputé aux gains d'accessibilité locale et régionale et au gain de temps vers Paris. Or, on sait que l'engagement des acteurs locaux pour accompagner la mise en service de la Tangentielle Nord est important pour optimiser l'investissement transport. Il aurait été intéressant de construire d'autres scénarios pour tester la sensibilité des paramètres d'offre tels que la fréquence et la vitesse ou d'autres scénarios basés sur des politiques d'aménagement ou foncières différentes. On pourrait aussi construire des scénarios basés sur des combinaisons d'offres (par exemple la Tangentielle Nord et le prolongement du T1 à Montreuil) pour mesurer les effets de réseau.

4.4.2. Construction des réseaux sur la période de simulation

L'IAU dispose dans son propre modèle de trafic d'un réseau routier et d'un réseau de transport en commun. Le graphe du réseau routier comporte environ 16700 arcs monodirectionnels et 5330 nœuds pour l'année 1999. Le réseau TC comporte le réseau lourd (lignes SNCF et RATP) ainsi que l'ensemble du réseau de bus RATP et les principales lignes de bus OPTILE (222 lignes). L'ensemble est constitué d'environ 5200 arcs bidirectionnels et 4200 nœuds, auxquels s'ajoutent 1500 arcs de correspondance. Il y a sur le réseau lourd 230 missions à l'heure de pointe, chaque mission étant caractérisée par une fréquence et des temps de parcours inter-gares. Nous avons codé les réseaux tous les trois ans à partir de 1999 jusqu'à 2026 en prenant des hypothèses réalistes de mise en service des infrastructures. En tout, il y a 20 graphes à construire (1 par mode tous les 3 ans entre 1999 et 2026). Ces réseaux sont détaillés dans le troisième rapport SIMAURIF (Nguyen-Luong *et al.*, 2007).

4.4.3. Hypothèses socio-économiques à l'horizon 2026

La période de simulation est 1999-2026. La population totale de la région était de 10,95 millions d'habitants en 1999, elle était estimée à 11,6 millions d'habitants par l'INSEE en 2007 et elle a été fixée à 12 millions d'habitants en 2026 (hypothèse basse). Sur la période, la taille moyenne des ménages baisserait de 2,4 à 2,1. Le nombre d'emplois, quant à lui, passe de 5,04 millions en 1999, à 5,58 millions en 2026. Cette augmentation nette de 10,7 % du nombre d'emplois en 27 ans est le résultat d'une baisse d'effectifs dans certains secteurs (industrie par exemple) plus que compensée par une croissance dans d'autres secteurs (services à la personne et aux entreprises, services financiers notamment).

4.4.4. *Durée d'une simulation*

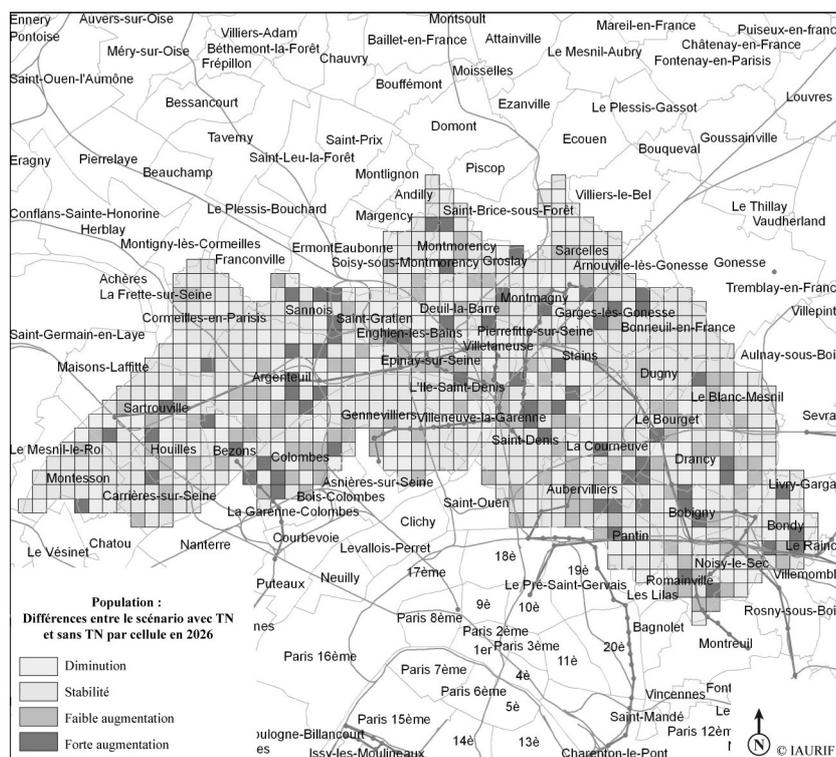
Les simulations sont effectuées sur l'ensemble de la région, mais on focalise les résultats sur le territoire d'étude. Un ordinateur équipé d'un processeur Core Duo 2,4 GHz et de 4 Go de RAM a été utilisé pour les simulations. La durée d'une simulation sur la période 1999-2026 est d'environ sept heures.

4.5. **Résultats de l'application au cas de la Tangentielle Nord**

Le résultat principal est d'abord le trafic prévisionnel à l'horizon 2026. Il est d'environ 80 000 voyageurs par jour dix ans après la mise en service, ce qui est tout à fait acceptable. N'importe quel modèle de trafic digne de ce nom est capable de produire ce résultat, mais ce qu'il ne peut pas fournir, c'est la répartition géographique des populations et des emplois en 2026 dans le territoire élargi desservi par la Tangentielle Nord et plus précisément dans les environs immédiats des gares (les neuf cellules autour de chaque gare). SIMAURIF met à jour chaque année les tables « households », « jobs » et « gridcells ». Nous avons extrait de ces tables en 2026 les résultats sur le territoire de la Tangentielle Nord. Nous avons cartographié les résultats sur les 853 cellules du territoire pour la population (Figure 6) puis les emplois (Figure 7).

Sur le territoire de la Tangentielle Nord, la population en 1999 était d'environ 1,26 millions d'habitants. Dans le scénario sans Tangentielle Nord, SIMAURIF trouve une population en 2026 de 1,520 millions sur le territoire, soit une augmentation de 260 000 habitants en 27 ans. Dans le scénario avec la Tangentielle Nord, SIMAURIF trouve une population de 1,522 millions, soit 2000 habitants de plus seulement. Cet écart entre les deux scénarios est extrêmement faible, voire non significatif, par rapport à l'augmentation tendancielle de la population (<1 %). Il est possible que le modèle soit suffisamment précis pour détecter cette différence, mais il est plus probable que l'on se trouve dans la marge d'erreur du modèle. On ne peut donc pas conclure de manière tranchée sur l'attractivité résidentielle. De plus, si l'on suppose que le modèle est fiable, la faiblesse de ce surplus de population ne doit pas surprendre. Ce territoire n'est au départ pas très attractif du point de vue résidentiel, et ce n'est pas la simple arrivée de la Tangentielle Nord qui va modifier radicalement son image. D'autres actions concomitantes, d'autres mesures d'accompagnement sont nécessaires afin d'attirer de nouveaux ménages aisés. Il faut améliorer le cadre de vie au quotidien : créer des espaces verts, des commerces de proximité, revaloriser le bâti, requalifier des axes urbains, etc.

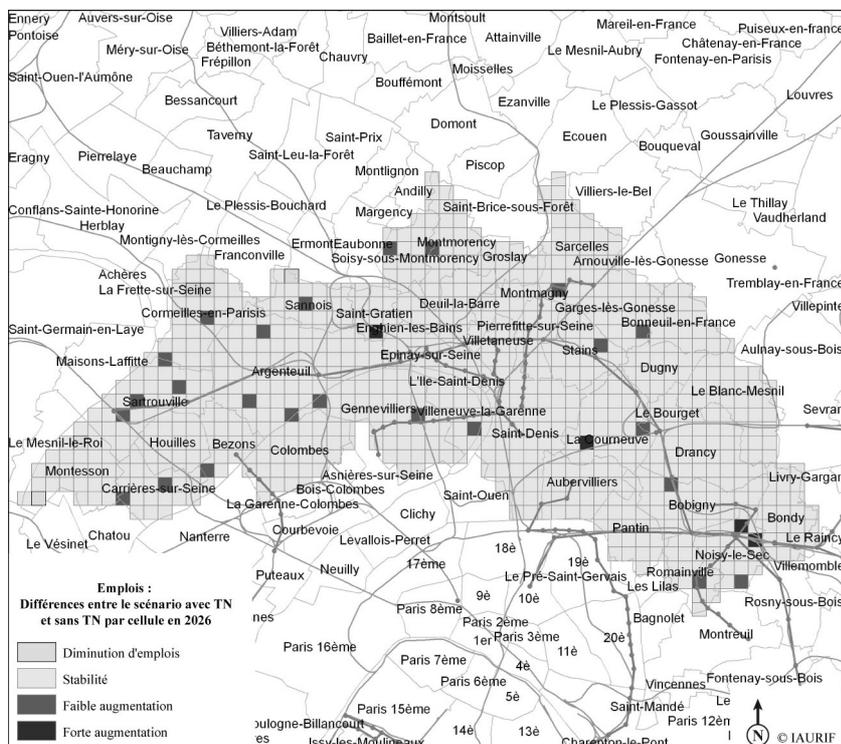
Figure 6
**Différences de population entre le scénario avec TN
 et sans TN par cellule en 2026**



La manière dont les ménages sont répartis sur le territoire entre les deux scénarios est un autre résultat intéressant. Les 2000 habitants supplémentaires constituent un solde net, résultant de départs et d'arrivées. La Figure 6 montre les différences en quatre tranches de population entre les deux scénarios. On constate que les cellules dans lesquelles la population a augmenté ne se trouvent pas toutes dans le corridor immédiat de la Tangentielle Nord ou à proximité des 14 gares comme on aurait pu le penser. Cependant, on perçoit que ces cellules se trouvent plutôt dans les communes les plus denses du territoire. On ne sait pas si la Tangentielle Nord joue un rôle dans cette répartition ou si le modèle illustre simplement une attirance pour la densité.

Voyons maintenant les emplois. Sur le territoire de la Tangentielle Nord, le nombre d'emplois en 1999 était d'environ 416 000. Dans le scénario sans Tangentielle Nord, SIMAURIF trouve un nombre d'emplois en 2026 de 508 000 sur l'aire d'étude, soit une augmentation

Figure 7
**Différence d'emplois entre le scénario avec TN
 et sans TN par cellule en 2026**



de 92 000 emplois en 27 ans. Dans le scénario avec la Tangentielle Nord, SIMAURIF trouve un nombre d'emplois de 518 000, soit 10 000 emplois de plus par rapport au scénario sans Tangentielle Nord. Deux éléments peuvent être distingués :

- premièrement, on est cette fois plutôt rassuré sur le fait que SIMAURIF arrive à sortir une différence entre les scénarios moins marginale que pour la population, que cette différence est positive donc intuitivement va dans le bon sens. Mais cette différence de 10 000 emplois reste encore faible au regard de l'augmentation tendancielle des emplois entre 1999 et 2026 dans le scénario de référence (11 %). On peut donc se demander si ce résultat est attribuable à la marge d'erreur du modèle SIMAURIF ou bien si, le modèle étant suffisamment fiable et performant, on a mis le doigt sur un phénomène très intéressant, à savoir le faible impact de la Tangentielle Nord sur le développement économique local sans actions concomitantes (urbai-

nes, environnementales, paysagères, foncières, fiscales, etc.) de valorisation de l'infrastructure.

– Deuxièmement, on peut se demander comment se répartissent ces 10 000 emplois supplémentaires. La Figure 7 montre les différences en quatre tranches entre les deux scénarios. On constate qu'il y a très peu de cellules dans lesquelles l'emploi a augmenté (28 cellules exactement, sur 863). Les augmentations se localisent principalement aux deux extrémités de la ligne, du côté de Sartrouville-Argenteuil et du côté de Noisy-le-Sec. On observe aussi des augmentations localisées d'emplois à proximité des gares de Bobigny, du Bourget et de Stains, mais très peu d'impact sur le tronçon central de la Tangentielle Nord qui dessert le secteur le plus défavorisé du territoire. On aurait pu s'attendre à des augmentations d'emplois plus importantes autour du pôle de la gare du Bourget mais il faut savoir que le prolongement de la ligne 7 du métro n'est pris en compte dans la simulation que dans la dernière période 2023-2026. Les très fortes augmentations se localisent dans 4 cellules seulement, dont deux situées aux environs immédiats de la gare de Noisy-le-Sec. Les quartiers de la gare de Noisy-le-Sec apparaissent comme le nouveau pôle économique du territoire, ce qu'aucun modèle n'aurait pu prévoir auparavant. La desserte par la Tangentielle Nord de cette gare permet de mailler avec la ligne de tramway T1, avec son prolongement vers Montreuil, avec le RER E et avec le tram-train T4, créant un effet multiplicateur de réseau et de maillage. Dans le modèle, ce gain d'accessibilité locale et régionale, même s'il est relativement faible, contribue très fortement aux choix de localisation des emplois à proximité de la gare.

Enfin, en ce qui concerne les prix de l'immobilier, comme nous l'avons vu précédemment, SIMAURIF n'a pas été en mesure de produire des résultats fiables au niveau cellulaire mais seulement au niveau communal. Ce volet sur les prix est donc à perfectionner. Il faudrait également soumettre le modèle intégré à une batterie de tests de sensibilité.

Ainsi, c'est la première fois, en France, qu'un modèle produit, d'une part, la répartition géographique des populations et des emplois qui ne sont plus des données exogènes mais des sorties, et qu'il parvient d'autre part à mettre en évidence des différences entre des scénarios sur ces variables de population et d'emplois. Jusqu'à maintenant, on raisonnait, dans les modèles de trafic classiques, à demande constante pour chaque scénario, ce qui ne permettait pas de mesurer des différentiels de population ou d'emplois. Pour la première fois, un modèle permet de mesurer l'attractivité résidentielle et l'attractivité économique qui peuvent donc être de nouveaux critères d'aide à la

décision dans une démarche d'analyse multi-critères, au même titre qu'un taux de rentabilité interne. Mais il faut rester très prudent sur les résultats car les différences calculées par SIMAURIF entre les deux scénarios peuvent être imputées aux incertitudes des données d'entrée et de calculs, et se retrouver à l'intérieur de la marge d'erreur. Comme en traitement du signal, le bruit dû à la nature probabiliste des modèles peut être plus grand que le signal à mesurer. Les sources d'incertitudes sont multiples :

- incertitude des données d'entrée (valeurs manquantes, perte d'information ou distorsion par croisement de données géoréférencées, biais par fusion de bases de données différentes) ;
- erreur systématique, par exemple due à la procédure de sélection des alternatives qui n'est pas parfaitement aléatoire ;
- incertitude des modèles prédictifs : les variables retenues peuvent s'avérer insuffisantes (par exemple il manque les facteurs de qualité de vie tels que la proximité d'écoles dans le modèle de localisation des ménages), le type de modèle lui-même n'est peut-être pas le mieux adapté (« Probit » ou « mixed Logit » plutôt qu'un « multinomial Logit »), ou même le modèle de choix discret n'est qu'une première approximation ;
- incertitude sur les paramètres généraux : les chiffres globaux servant de variables de contrôle (nombre de ménages ou d'emplois par exemple), l'estimation des taux de déménagement, etc. ;
- incertitude due au générateur de nombres aléatoires.

Enfin, un dernier problème réside dans le fait que les résultats présentés (différences entre les deux scénarios de population et d'emplois) sont malheureusement invérifiables, même quand on sera en 2026. En effet, le scénario de référence (celui sans Tangentielle Nord) ne verra pas le jour, normalement ... On pourra seulement comparer en 2026 le nombre de ménages et le nombre d'emplois simulés dans l'aire d'étude avec les nombres réels mais pas les volumes supplémentaires dus à l'attractivité de la Tangentielle nord. Remarquons aussi que nous n'avons pas ici comparé les résultats de prévision de trafic en 2026 sur la Tangentielle Nord avec ceux des études de trafic antérieures de la fin des années 90 qui envisageaient une date de mise en service en 2009.

On peut néanmoins en tirer des enseignements très intéressants pour le cas de la Tangentielle Nord. S'ils s'avèrent exacts, les résultats des simulations montrent en effet que l'arrivée de la Tangentielle Nord induira des augmentations relativement faibles d'emplois et surtout de population, toutes choses égales par ailleurs. Remarquons que le gain

d'accessibilité n'est pas si important car sur les 14 gares, 8 existent déjà. On ne peut donc pas conclure que la mise en service, seule, de la Tangentielle Nord créera des effets indirects importants sur l'essor économique et l'attractivité résidentielle d'un territoire comportant de nombreuses faiblesses et à l'image quelque peu dévalorisée. Autrement dit, les simulations montrent qu'il y a un risque de ne pas exploiter au mieux l'occasion donnée à ce territoire. Il faudra une forte volonté politique et encore beaucoup d'investissements dans des projets urbains pour accompagner l'arrivée de la Tangentielle Nord et maximiser ainsi ses retombées économiques. Ces conclusions rejoignent celles des urbanistes qui ont travaillé de manière qualitative sur le diagnostic territorial de la Tangentielle Nord. Les propositions pour accompagner l'investissement de la Tangentielle Nord ne manquent pas. Maintenant que son lancement a été officiellement annoncé le 30 juin 2008, il est temps de :

- renforcer les pôles et favoriser une synergie entre ces pôles ;
- revitaliser le secteur central ;
- favoriser l'implantation de grands équipements aux abords des gares ;
- créer un lieu d'échange et de coordination sur le développement du grand territoire ;
- coordonner à l'échelle des gares les projets urbains et leur articulation avec la Tangentielle Nord ;
- donner une ambition forte aux secteurs repérés comme des lieux d'intérêt régional ;
- mettre en place des outils d'interventions foncières et opérationnelles ;
- favoriser des opérations nouvelles d'habitat aux abords des gares ;
- favoriser le renouvellement dans le tissu urbain ;
- améliorer le cadre de vie au sens large : environnement, emplois, services ;
- améliorer l'habitat ancien ;
- ouvrir un partenariat d'investissement sur le territoire sous l'égide d'une structure spécifique ayant un rôle de coordination et de suivi.

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Le projet a nécessité une équipe de trois personnes équivalent plein-temps pendant trois ans et demi, aux compétences multiples, plus

un stagiaire par an à l'IAU. Il a aussi bénéficié de la disponibilité et de la richesse des données de l'IAU, qui ne sont pas intégrées dans son budget global. Les compétences minimales et permanentes qu'il faut réunir dans une équipe sont : un spécialiste en modélisation, un économètre, un analyste-programmeur connaissant le langage Python, un géomaticien gestionnaire de bases de données. Mais il est important de souligner que si l'objectif est d'aboutir à un outil opérationnel, c'est le modélisateur qui doit rester maître du projet et canaliser les exigences des autres membres de l'équipe. Sinon le risque est de ne travailler que sur des estimations économétriques indépendantes les unes des autres ou que sur des aspects purement théoriques ou informatiques, et au final de ne pas atteindre l'objectif de mise au point d'un modèle intégré opérationnel. L'approche purement économétrique ne permet pas d'aboutir à un outil opérationnel de modèle intégré car il y a trop de variables explicatives et les variables transport ne sont pas assez discriminantes. Il est donc vital pour la réussite du projet que le praticien ne se laisse pas déborder par les chercheurs puristes versés dans les débats théoriques ou à la recherche d'une solution idéale. Il faut aussi insister sur l'importance de bien connaître l'aire d'étude du point de vue de l'urbaniste, du démographe et de l'économiste avant de se lancer dans la modélisation. Des discussions avec ces spécialistes sont indispensables pour connaître leurs visions et essayer de les « mettre en équations » dans nos modèles.

A ce stade, le projet SIMAURIF apparaît ainsi riche en enseignements. Il signe un nouveau paradigme dans les études de modélisation de trafic. Ce sont trois nouvelles approches qui sont ainsi mises en pratique dans ce projet :

- l'approche intégrée : couplage entre un modèle de trafic et un modèle d'urbanisation. On peut cependant regretter l'absence aujourd'hui d'un modèle complètement intégré disponible dans un seul et même outil. Il faut aussi envisager l'intégration à un niveau encore plus large, avec en aval un modèle d'émission et de diffusion de polluants et de bruit, et en amont un modèle sociodémographique. La lucidité et l'expérience nous font simplement dire qu'il faudra encore beaucoup de temps avant de voir un modèle universel de simulation des interactions entre transport, urbanisation et environnement, surtout quand on sait que le modèle de trafic statique à quatre étapes a très peu progressé en pratique depuis 50 ans, et cela risque de continuer ;

- l'approche infracommunale : les études à l'échelle de l'adresse postale, quartier, îlot, doivent se généraliser. Avec l'avènement des SIG et les outils dérivés tels que les géocodeurs, il n'y a plus d'excuse

aujourd'hui à continuer à faire des études de modélisation au niveau communal ;

– l'approche désagrégée : au niveau de la modélisation des localisations, les agents sont représentés un par un avec leurs caractéristiques et avec leurs probabilités de choix discrets.

La qualité des modèles dépend évidemment de la qualité des estimations économétriques, et aussi, on ne le dira jamais assez, de la qualité des données. Un effort sans précédent a donc été fourni pour construire les bases de données d'entrée et les bases de données d'estimation des modèles.

La modélisation de l'interaction transport-urbanisme est un thème situé au croisement de multiples disciplines : mathématiques appliquées, économétrie, économie des transports, urbanisme, sociologie, démographie, économie urbaine, géographie, informatique. Notre recherche a permis un dialogue fructueux entre des experts de chaque discipline. Cependant, à travers ce dialogue, nous avons été confrontés tout au long du projet à deux méthodologies concurrentes : celle des chercheurs et celle des praticiens. Les chercheurs-théoriciens travaillent sur chaque sous-modèle de manière théorique, sans souci de parcimonie dans le choix des variables et indépendamment les uns des autres jusqu'à en oublier l'objectif d'intégration de tous les modèles. Cela a pour conséquence de produire une certaine incohérence entre les données, voire une incompatibilité de fonctionnement en prédiction du modèle intégré, même si chaque sous-modèle est rigoureusement traité et fournit des explications intéressantes sur le phénomène en question. L'autre méthodologie est celle du praticien-ingénieur-modélisateur qui a une vision globale du modèle intégré et qui doit arbitrer entre la qualité économétrique et le réalisme qui se traduit par la possibilité d'implémenter ou non le modèle. Cette deuxième méthodologie a pour conséquence l'obligation de prendre en compte des hypothèses parfois très simplificatrices, peu satisfaisantes intellectuellement, mais l'avantage de permettre l'implémentation, et donc d'aboutir au final à un outil opérationnel. C'est une réelle gageure que de réaliser l'alliance idéale entre le chercheur, « puriste » par nature, et le praticien, « pragmatique » par expérience. Autrement dit, si l'objectif est de mettre au point un outil opérationnel dans des délais imposés, le praticien doit canaliser, contenir et recadrer en permanence les ambitions théoriques du chercheur.

Enfin, l'application du modèle intégré SIMAURIF sur le cas de la Tangentielle Nord est un succès modeste. Elle a donné des résultats intéressants à l'horizon 2026 (12 ans après sa mise en service prévue)

sur l'attractivité économique locale et résidentielle du territoire desservi par l'infrastructure. Ces résultats rejoignent globalement l'analyse qualitative des urbanistes, sans toutefois être concluants sur le thème de la rente foncière. SIMAURIF peut donc se positionner comme un nouvel outil d'aide à la décision dans le cadre d'une analyse multi-critères. Il évalue l'impact d'une infrastructure de transport sur la relocalisation des ménages et des entreprises sous contraintes d'espace disponible et sous condition de concurrence dans le marché immobilier.

A court terme, il faudrait néanmoins améliorer encore le calage global et effectuer des tests de sensibilité aux paramètres. Il est également prévu de mieux modéliser les impacts des infrastructures sur les prix de l'immobilier. Une étude est actuellement en cours sur le cas du tramway T3 à Paris (collaboration IAU/INRETS), après celles sur le RER E et le tramway T1 (par l'IAU), le tramway T2 (par l'INRETS) et les « zones 30 » de Paris (collaboration CERNA/IAU)¹³. Une synthèse de ces cinq études en 2010 permettra de conclure quant à l'intérêt d'évaluer l'impact d'une infrastructure sur les prix de l'immobilier à un niveau infracommunal. Il semble intéressant ensuite d'appliquer SIMAURIF à d'autres projets d'envergure en Ile-de-France, tels que le prolongement du T3 de la porte d'Ivry à la Porte de la Chapelle, le projet de Tangentielle sud-ouest Massy-Evry, et un scénario de péage routier autour de Paris. Les bases de données sont construites, le calage global du modèle intégré réalisé (même s'il est encore perfectible) et les graphes des réseaux transport pour le scénario de base construits (un tous les trois ans de 1999 à 2026). Il suffit donc de définir les scénarios et de construire les réseaux correspondants puis exécuter le modèle intégré afin de voir les effets à long terme de ces projets d'infrastructure ou d'une politique de transport sur l'urbanisation. Une nouvelle recherche sur trois ans a débuté et devrait permettre de réaliser les développements à court terme sur SIMAURIF. Elle s'intègre dans le projet PLAINSUDD (v. le Chapitre 6) retenu en 2008 par l'Agence nationale de la recherche (ANR), piloté par A. Bonnafous et permettant à l'IAU de travailler en collaboration avec le LET ainsi que les partenaires VINCI-COFIROUTE et GEOMOD.

A moyen terme, il serait intéressant de connecter le modèle intégré en aval à des modèles environnementaux (pollution, bruit) dans le but de calculer des indicateurs de développement durable et en amont à un modèle socio-économique qui alimenterait automatiquement les

13. Toutes ces études, sauf celle sur le T2, ont été financées dans le cadre du PREDIT.

tables des totaux de population et d'emploi pour chaque année de la période de simulation.

A long terme, nous envisageons de ne plus dépendre du logiciel américain URBANSIM qui a nécessité des adaptations importantes pour le cas de l'Ile-de-France. Le projet SIMAURIF a permis de montrer la difficulté de transposer un modèle américain aux villes françaises, la nécessité de mettre au point un outil transport-urbanisme complètement intégré et non un simple couplage de modèles, et l'importance de disposer d'une interface utilisateur conviviale. Pour cela, il faut développer notre propre modèle intégré transport-urbanisme adapté aux villes européennes. Il faudrait que la France ait son propre modèle LUTI d'ici 2015, qui soit applicable aux villes européennes et qui soit une référence dans le monde, au même niveau que le logiciel américain URBANSIM. Cela nécessitera sans doute de mutualiser les moyens des laboratoires de recherche et des bureaux d'études, et de coopérer avec des partenaires européens. Nous avons proposé de donner à ce projet le nom suivant : *ULTISIM (Urban Land-Transport Interaction Simulation)*. La première phase de ce projet a démarré dans le cadre du PREDIT à la fin de l'année 2009. Nous espérons que le projet SIMAURIF servira de base de lancement et ouvrira une nouvelle ère de créativité et d'innovation, comme l'ont permis les modèles de trafic 50 ans auparavant.

Références bibliographiques

- Alonso W., 1964, *Location and land use*, Harvard University Press.
- Ben-Akiva M., Lerman S., 1985, *Discrete choice analysis. Theory and application to travel demand*, MIT Press.
- Boiteux M., 2001, *Transports : choix des investissements et coût des nuisances*, Rapport au Commissariat Général du Plan.
- Fujita M., 1989, *Urban economic theory*, Cambridge University Press, 366 p.
- McFadden, D., 1978, Modelling the choice of residential location. In : Karlqvist A., Lundqvist L., Snickars F., Weibull J. (ed.), 1978, *Spatial interaction theory and planning models*, Amsterdam, pp. 75-96.
- Lowry I.S., 1964, *A model of metropolis*, Rand Corporation.
- Nguyen-Luong D., De Palma A., Picard N., Motamedi K., Ouaras H. Quatre rapports *SIMAURIF* de 2004, 2005, 2007 et 2008, disponibles sur le site Internet de l'IAU www.iau-idf.fr dans la rubrique Nos études/Transport et mobilité/Simulation de trafic.
- Nguyen-Luong D., 2008, *An integrated land use-transport model for the Paris region (SIMAURIF) : Ten lessons learned after four years of development*, Institut d'Aménagement et d'Urbanisme de la Région d'Ile-de-France (IAU).
- Poulit J., 1974, *Urbanisme et transport : les critères d'accessibilité et du développement urbain*, SETRA, Ministère de l'équipement.
- Poulit J., 2005, *Le territoire des hommes*, Bourin.

- Quinet E., Walliser B., 1990, Splendeurs et misères du calcul économique, *Le Monde*, 18 octobre 1990.
- TRB, 2007, *Metropolitan Travel Forecasting. Current Practice and Future Direction*, Transportation Research Board, www.trb.org.
- Waddell P., 2002, URBANSIM : Modeling urban development for land use, transportation and environmental planning, *Journal of the American Planning Association*, 68, pp. 297-314.
- Waddell P., Borning A., Noth M., Freier N., Becke M., Ulfarson G., 2003, Microsimulation of urban development and location choices : design and implementation of URBANSIM, *Networks and Spatial Economics*, 3, 1, pp. 43-67.
- Zahavi Y., 1980, Regularities in Travel Time and Money Expenditure, *Transportation Research Record*, 750, pp. 13-19.

CHAPITRE 4

SIMBAD : UN OUTIL POUR INTÉGRER LE DÉVELOPPEMENT DURABLE DANS LES POLITIQUES PUBLIQUES

Jean-Pierre Nicolas

Laboratoire d'Economie des Transports
UMR 5593 CNRS, ENTPE, Université de Lyon
Rue Maurice Audin – 69 518 Vaulx-en-Velin Cedex
jean-pierre.nicolas@entpe.fr

Si la thématique du développement durable imprègne aujourd'hui largement les discours des politiques publiques locales, les outils permettant de les accompagner en comparant et en évaluant les différentes alternatives en jeu restent limités. Le projet *Simuler les MoBilités pour une Agglomération Durable (SIMBAD)* développé par le Laboratoire d'Economie des Transports (LET) a pour objectif d'intégrer cette préoccupation dans l'évaluation des politiques de transport sur les territoires urbains. Il propose une modélisation du système de déplacements d'une agglomération et de ses interactions avec l'urbanisme, pour fournir des indicateurs permettant d'intégrer simultanément les questions environnementales, économiques et sociales dans la réflexion des acteurs de la ville¹. Le développement d'un tel outil est également l'occasion de s'interroger sur les procédures de modélisation habituellement utilisées dans le domaine des transports. Tout d'abord, compte tenu des objectifs d'une représentation pertinente des déplacements à long terme, la prise en compte des interactions entre transport et urbanisme s'est imposée. Ce domaine, auquel l'ouvrage est consacré, est exploré depuis longtemps déjà puisque les premières recherches remontent au 19^e siècle. Nous n'en

1. Une première version du modèle vient d'être développée dans le cadre du PREDIT 3 (Programme de recherche et d'innovation dans les transports terrestres), financée par la Direction de la Recherche et de l'innovation (DRI) du Ministère de l'écologie et l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME). Le modèle a également été développé en partenariat avec l'Agence d'urbanisme de Lyon, qui a notamment financé une thèse de doctorat (Convention industrielle de formation par la recherche CIFRE). Une seconde phase de recherche se poursuit maintenant dans le cadre du PREDIT 4, avec les mêmes acteurs.

sommes pourtant qu'aux premiers développements appliqués sur des terrains français. D'autre part nous avons fait le choix de retenir la procédure de modélisation traditionnelle en transports urbain, avec sa décomposition en quatre étapes (génération des flux, distribution spatiale, répartition modale et affectation sur les réseaux concernés). Cette méthodologie est bien maîtrisée par les techniciens, tant dans les bureaux d'études que dans les services de l'Etat et aujourd'hui dans les collectivités locales. Par contre, nous avons systématiquement réinterrogé chacune de ces étapes pour proposer des réponses alternatives cohérentes, avec une meilleure prise en compte des problématiques du développement durable dans les politiques de transport.

L'objectif de ce chapitre est de présenter les grandes lignes de SIMBAD, tant dans sa philosophie générale que sur les choix scientifiques et techniques qui ont été réalisés. Le chapitre se structure en trois parties. La première fournit le cadre de notre problématique en présentant la vision du développement durable qui a été retenue, et en montrant comment elle a été déclinée pour aboutir à l'agencement de la plate-forme actuelle. La seconde partie s'intéresse à la modélisation du système de déplacement. La troisième présente la manière dont les interactions avec l'urbanisme ont été prises en compte. La conclusion, enfin, est l'occasion de revenir sur les limites qui sont apparues les plus importantes par rapport aux objectifs de SIMBAD et de présenter les développements en cours.

1. PRENDRE EN COMPTE LA NOTION DE DÉVELOPPEMENT DURABLE DANS LES MODÈLES PROSPECTIFS TRANSPORTS/URBANISME

L'objectif du projet SIMBAD est de fournir un outil de simulation des politiques pouvant affecter les trafics urbains (développement de nouvelles infrastructures routières ou de transports collectifs, politiques d'urbanisme, réglementations sur les vitesses ou tarification de l'usage de la voirie, etc.) pour fournir, *in fine*, un éclairage pertinent sur les impacts économiques, environnementaux et sociaux de ces politiques, au niveau d'une aire urbaine et à un horizon de 25 ans. Cette première partie est l'occasion de développer les idées fortes qui ont guidé le projet pour montrer comment elles ont structuré le projet : quelle vision du développement durable ? Avec quels indicateurs ? Pour quelle prospective à long terme ? Sur quel territoire ?

1.1. Quels indicateurs de mobilité durable ?

Le développement durable reste une notion ouverte qui peut véhiculer des valeurs et porter des projets de société extrêmement différents. De façon générale, pour qu'une démarche soit reconnue comme relevant d'une préoccupation de développement durable, il faut aujourd'hui qu'elle s'attache à la fois à articuler court et long terme, local et global, ainsi qu'à prendre en compte simultanément les dimensions économique, sociale et environnementale de la question qu'elle traite (Theys, 2000 ; Zuideau, 2006). D'autres acceptions existent néanmoins, souvent plus centrées sur une dimension particulière², mais nous avons privilégié celle-ci, qui apparaît tout à la fois comme la plus ouverte et la plus en phase avec les préoccupations émergentes de notre époque (Verry et Nicolas, 2005).

L'ambition du projet est d'abord de montrer que d'un point de vue opérationnel, pour juger des conséquences à long terme d'une politique de transports urbains, il est possible de disposer d'un outil analytique qui reprenne de manière cohérente des indicateurs économiques, environnementaux et sociaux (Joumard et Nicolas, 2010). Elle consiste également à plaider en faveur d'approches évaluatives ouvertes, évitant de se refermer sur des logiques peut-être fortement cohérentes du point de vue de leur logique interne, mais du coup parfois trop fermées sur elles-mêmes pour éclairer des choix publics de manière politiquement pertinente. L'idée sous-jacente est que, quoique l'on fasse, en abordant les conséquences environnementales, économiques, sociales (etc.) d'une action publique, une évaluation croise des dimensions en partie irréductibles les unes aux autres (Costanza *et al.*, 1997). Ainsi, la nécessaire prise de décision qui tranche pour une option plutôt qu'une autre, quelle que soit la procédure sur laquelle elle repose (prise de responsabilité d'une seule personne, débat public, calcul technico-économique, etc.), assume à un moment ou à un autre, un, voire plusieurs sauts logiques qui lui permettent d'agréger et de comparer les résultats obtenus au sein de chaque dimension. Le rôle de l'outil que nous proposons est de fournir un spectre suffisamment large pour éclairer ce choix de manière explicite, ainsi que de montrer les éventuelles synergies et contradictions que les évolutions de mobilité peuvent avoir sur les différentes dimensions prises en compte. Dans le cadre du projet SIMBAD, la pertinence des dimensions à retenir du

2. Voir par exemple les revues de H. Gudmunsson et M. Hojer (1996) ou L. Giorgi (2003) pour ce qui concerne le transport, de J. Pezzey et M. Toman (2002) dans le domaine de l'économie, ou encore de P. Hardi et P. Muyata (2000) ou F.D. Vivien (2005) de façon plus générale.

fait des impacts des transports a peu été discutée. Ce sont les trois dimensions de la notion de développement durable, économique, environnementale et sociale, qui ont été retenues et qui servent donc d'illustration pratique à l'intérêt d'une approche ouverte en matière d'évaluation.

La réflexion menée pour mettre en œuvre des indicateurs de mobilité durable dans SIMBAD (Verry et Nicolas, 2005) repose sur la représentation des interactions entre transport et urbanisme en trois systèmes de localisation, de déplacements et de pratiques sociales, telle qu'elle a été proposée par A. Bonnafous et H. Puel (1983) :

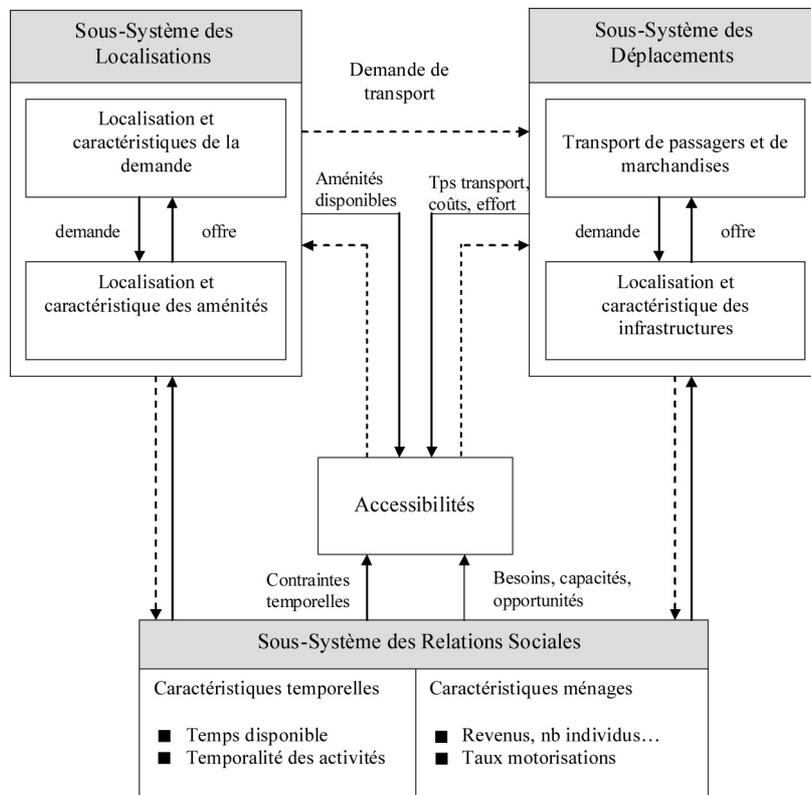
- le sous-système de localisations renvoie aux différents usages du sol et à leur inscription dans l'espace ;
- le sous-système des déplacements est constitué d'une part des flux de personnes et de marchandises et d'autre part du système de transport qui permet physiquement l'expression de cette mobilité ;
- le sous-système des pratiques et relations sociales, dans lequel s'inscrivent les activités de la vie quotidienne, est lié au mode de fonctionnement de la société.

Le sous-système des déplacements est privilégié dans SIMBAD, puisque ce sont ses impacts qui sont évalués. Cependant, ce sous-système ne peut être saisi dans sa dynamique et ses évolutions à long terme qu'à travers ses interactions avec les deux autres sous-systèmes (Wegener et Fürst, 1999). La notion clé marquant cette interaction est celle d'accessibilité, qui caractérise le service rendu par un système de déplacements dans une configuration spatiale et sociale donnée³. L'amélioration de l'accessibilité constitue l'un des objectifs prioritaires de toute politique de transport, mais elle reste complexe à caractériser puisqu'elle mêle des aspects liés à l'espace, au temps, à la localisation des activités et aux systèmes de transport et aux pratiques sociales. La relation entre l'accessibilité et les trois composantes du système urbain peut être représentée par la Figure 1.

Les indicateurs de mobilité durable concernent donc les services rendus ainsi que les coûts et les nuisances des déplacements réalisés au sein de l'aire urbaine. Pour rendre compte de l'évolution des services rendus par le système, nous avons retenu l'évolution des accessibilités moyennes des ménages à l'emploi et aux commerces ainsi que, pour les entreprises, de l'accessibilité moyenne aux activités économiques ; pour éclairer la dimension sociale, un rendu plus fin est fait en fonction

3. Voir par exemple S. Masson (2000) ou K.T. Geurs et R. Van Eck (2001).

Figure 1

Le système transport-urbanisme à travers le concept d'accessibilité

Source : Verry et Nicolas (2005) adapté de Geurs et Van Eck (2001)

de leur revenu (distingué en trois classes) et de leur localisation. Du côté des coûts :

- les impacts environnementaux sont mesurés par l'évolution des émissions de CO₂, NO_x, particules et hydrocarbures (la pollution atmosphérique locale et globale est donc privilégiée ici et d'autres impacts comme le bruit ou l'occupation de l'espace n'ont pas été intégrés dans cette première version, même s'ils pourront l'être par la suite) ;

- le coût économique du système de transport est établi dans l'esprit des « comptes déplacements », avec une estimation des dépenses réalisées par la puissance publique, les ménages et les entreprises (CERTU, 2005) ;

- d'un point de vue social, le coût ressenti par les ménages est mesuré par la part relative du revenu consacré à la mobilité quoti-

dienne locale en distinguant les ménages comme précédemment, selon leur revenu et leur localisation.

Enfin, en amont de ces indicateurs mettant en balance services rendus et coûts induits, quelques indicateurs synthétiques permettent de caractériser le contexte général dans lequel ils ont été calculés. Ceci concerne d'une part les hypothèses générales d'évolution de la société (évolutions démographique, économique, technologique, et des modes de vie) et d'autre part les grandes résultantes du modèle concernant l'interface entre transports et urbanisme (localisation des activités et de la population, indicateurs de mobilité globaux, etc.).

1.2. La démarche prospective : évolutions du contexte et simulation des politiques urbaines

Prospective n'est pas prévision, et l'exercice proposé dans SIMBAD n'est pas d'annoncer ce que seront les trafics dans 25 ans, ni de prédire les coûts ou le niveau de pollution générés par les transports à cet horizon. Son objectif reste plus modeste : compte tenu de nos connaissances des liens entre les différents facteurs qui conditionnent les mobilités, comment peut-on penser l'évolution des trafics suivant diverses hypothèses de transformation du contexte général, et quelles politiques peuvent accompagner ou modifier ces évolutions ? Tout l'enjeu de la prospective est d'éclairer au mieux cette réflexion stratégique. Pour construire les scénarios prospectifs, trois catégories de variables ont été distinguées :

- les « leviers » dont l'évolution est influençable par la puissance publique ;
- les « tendances lourdes » dont l'évolution n'est pas influençable, mais supposée prévisible ;
- les « sources de clivage » dont l'évolution n'est ni influençable, ni prévisible⁴.

L'idée est alors de définir des scénarios d'évolution générale du contexte à partir des tendances lourdes et des sources de clivage, et de s'interroger sur l'impact des politiques imaginées et mises en œuvre pour agir sur le système de transport, telles qu'elles ont pu être réfléchies et organisées lors des réflexions prospectives du groupe de Batz par exemple (Crozet *et al.*, 2001). Le modèle a été conçu pour pouvoir travailler dans cet esprit (Nicolas et Morice, 2006).

4. Voir par exemple F. Hatem (1993) ou M. Godet (2004) sur l'approche prospective, ainsi que F. Plassard (2003) pour sa déclinaison dans le domaine des transports.

C'est un horizon de 25 ans qui a été retenu pour cette démarche prospective. Deux principaux arguments ont poussé à cet horizon temporel, qui peut apparaître relativement court dans une approche en termes de développement durable. Tout d'abord, une contrainte méthodologique se pose, car même si l'intégration des interactions entre transports et urbanisme peut améliorer la prospective, il nous semble peu raisonnable d'aller trop loin dans les projections, au risque de ne plus maîtriser les limites de la modélisation. Par ailleurs, une prospective à 20-30 ans est cohérente avec notre objectif d'aide aux politiques publiques locales, pour lesquelles cet horizon apparaît comme une limite pour réfléchir et programmer la planification. Il existe d'autres travaux sur le long terme, voir le très long terme, basés sur d'autres types d'approches (Bagard *et al.*, 2008). Mais ils ne sont pas conçus pour répondre aux questions que peuvent se poser des collectivités locales qui voudraient réaliser une évaluation stratégique d'une politique particulière appliquée dans un contexte donné.

1.3. Une application au cas de l'aire urbaine de Lyon

Pour répondre à ce double objectif de test de politiques de transport (les « leviers disponibles ») dans un cadre prospectif donné (les « scénarios ») à un horizon de 25 ans d'une part et de mesure de l'évolution des indicateurs de mobilité durable d'autre part, le projet SIMBAD repose sur une modélisation traditionnelle du système de transport et de ses interactions avec le système des localisations. Une plate-forme a ainsi été conçue pour enchaîner plusieurs grandes étapes, conçues chacune comme un module particulier : (i) localisation des ménages et des établissements, (ii) mobilités, et (iii) affectation du trafic. Ces trois étapes se succèdent et « bouclent » sur 25 pas d'un an (Nicolas *et al.*, 2006). Les différents modules « transport » débouchent sur des temps généralisés qui permettent l'estimation d'indicateurs d'accessibilité qui sont utilisés dans les modules de localisation des ménages et des activités.

Le terrain d'application retenu a été l'aire urbaine de Lyon, notamment à partir d'une part des données INSEE de 1999 et 2005 (Recensement Général de la population ; RGP), fichiers SIRENE pour les établissements) et d'autre part des Enquêtes ménages déplacements (EMD) locales (1995 et 2006). Ce choix s'est fait pour une raison de disponibilité et de bonne connaissance des données du terrain par l'équipe de développement, mais aussi par le fait que les acteurs locaux ont été intéressés pour se prêter au jeu d'une recherche appliquée. Ce dernier point s'est traduit par un accès facilité à certaines données (transactions immobilières et foncières du Grand Lyon par exemple),

par des échanges fructueux pour élaborer les scénarios et envisager les politiques à tester, et enfin par un partenariat actif avec l'Agence d'Urbanisme de Lyon, qui a financé une thèse sur la modélisation de la localisation des ménages.

D'un point de vue méthodologique, plusieurs choix ont été faits au niveau des outils de modélisation utilisés. Tout d'abord, la structuration traditionnelle à quatre étapes (cf. Chapitre 2, point 3.2) a été retenue pour le modèle de transport. Elle a bénéficié d'innovations et de développements issus des travaux du LET sur la génération, la distribution et la répartition modale (Cabanne *et al.* 2000 ; Bonnel, 2004 ; Gitton, 2006). Il en va de même pour les trafics liés aux marchandises qui sont pris en compte par le modèle FRETURB (Routhier *et al.*, 2001 ; Toilier *et al.*, 2005) présenté dans le Chapitre 8 de cet ouvrage. La partie 2 reprend les faiblesses de cette approche traditionnelle et présente les propositions faites pour les dépasser, tout en restant dans le même cadre de modélisation.

Par ailleurs, la plate-forme URBANSIM a été retenue pour la modélisation des localisations des ménages et des activités (Waddell, 2001). Cet outil, qui privilégie l'approche par la théorie des choix discrets, est présenté dans la partie 3. Nous montrerons comment le lien a été fait entre théorie, travaux empiriques et notre application sur l'aire urbaine de Lyon.

2. TRANSPORTS : DE LA GÉNÉRATION DES MOBILITÉS À LA REPRÉSENTATION DES FLUX

La modélisation en transports se réalise traditionnellement en quatre étapes : (i) génération des mobilités au sein de chaque zone de l'aire d'étude, (ii) distribution spatiale de ces flux entre les zones, (iii) répartition entre modes (marche à pied, voiture particulière et transports collectifs notamment) et (iv) affectation sur les réseaux concernés pour déterminer les trafics passant sur les différents tronçons. Cette procédure connaît de nombreuses critiques (Ortuzar et Willumsen, 2001) qui poussent aujourd'hui à des recherches sur des approches alternatives, à l'aide de SMA par exemple. Cependant, ce type de modélisation reste aujourd'hui l'outil dominant pour les acteurs de la ville travaillant dans le domaine des transports, et de nombreuses solutions qui peuvent être proposées à l'intérieur de ce cadre n'ont pas été explorées. Nous avons donc préféré conserver cette approche traditionnelle, avec un regard critique et en proposant des innovations pour améliorer l'outil.

Les principales propositions faites dans le cadre de SIMBAD sont au nombre de quatre, avec (i) un module original de génération des flux qui opère par micro-simulation au niveau des individus et abandonne la notion de « déplacement » pour préférer celle de « sortie » représentant une chaîne de déplacements entre le départ et le retour au domicile, (ii) la décomposition de la chaîne de modélisation en trois sous-chaînes parallèles correspondant à trois sous-populations différentes, pour pouvoir mieux suivre les impacts d'une politique de transport ou d'urbanisme sur différents segments de la population, (iii) la prise en compte des transports de marchandises en ville, et (iv) une tentative de codification la plus systématique possible des réseaux routiers et des transports collectifs qui doit permettre d'une part d'intégrer au mieux les informations commerciales disponibles qui se développent aujourd'hui grâce aux nouvelles technologies de l'information (GPS, téléphone portable, etc.), et d'autre part de reconstruire les réseaux passés pour recalculer le modèle sur plusieurs périodes et mieux évaluer les évolutions comportementales au cours des années passées.

2.1. Génération des sorties du domicile par micro-simulation aléatoire

Dans la procédure à quatre étapes, le modèle de génération est le plus souvent construit par régression linéaire sur des données d'EMD. Le nombre de déplacements par zone est « expliqué » par un vecteur de variables socioéconomiques décrivant les zones du périmètre d'étude. Cette modélisation présente des limites importantes, avec un pouvoir explicatif généralement faible, lié notamment à une considération insuffisante de la logique structurant l'enchaînement des activités entre un départ et un retour au domicile, une mauvaise prise en compte de la variabilité des comportements individuels, et l'utilisation d'un zonage assez grossier. L'exercice prospectif est également limité par une difficulté à rendre compte d'une part des évolutions démographiques au niveau zonal, et d'autre part des évolutions comportementales (Bonnell, 2004 ; Ortuzar et Willumsen, 2001).

2.1.1. Analyse des sorties et micro-simulation : deux choix méthodologiques originaux

Pour dépasser ces limites, deux choix méthodologiques originaux ont été retenus. Ils concernent d'une part le choix des sorties du domicile pour rendre compte de la mobilité des individus, et d'autre part une modélisation qui s'appuie sur les travaux en micro-simulation (Wannel et Gravel, 2002 ; Dupont *et al.*, 2003).

Le premier choix méthodologique renvoie à l'indicateur retenu pour représenter les mobilités, à savoir la sortie du domicile de préférence au déplacement. Un déplacement se définit comme « l'action de relier une origine et une destination pour un motif donné ». Une sortie correspond quant à elle à « un enchaînement de déplacements réalisés entre la sortie et le retour au domicile ». Par exemple, une personne qui part de chez elle, s'arrête pour déposer son enfant à l'école, va au travail puis rentre le soir chez elle en s'arrêtant sur le trajet du retour pour acheter de l'essence, réalise une seule sortie, mais quatre déplacements : domicile-dépose, dépose-travail, travail-achat, achat-domicile. Cela correspond également à deux déplacements liés au domicile et deux déplacements dits « secondaires » (dépose-travail et travail-achat). Dans la modélisation classique, tous ces déplacements secondaires sont regroupés pour estimer une loi de génération dont le pouvoir explicatif est généralement très faible. Le problème subsiste pour les étapes suivantes de distribution ou de répartition modale, où chaque déplacement est modélisé de manière indépendante. Ainsi, à l'issue de l'étape de répartition modale, la sortie de l'exemple précédent peut très bien commencer à pied pour aller à l'école, continuer en TC pour aller au travail, se poursuivre en VP pour acheter de l'essence et se terminer en deux-roues... Face à ce problème, l'approche en termes de « sortie » permet de conserver la cohérence de l'enchaînement entre les déplacements, même si, dans notre cas, l'information sur leurs motivations est appauvrie avec un unique motif principal qui est privilégié pour décrire la sortie. Ainsi, un fichier des sorties du domicile a été établi à partir du fichier déplacements de l'enquête ménages, en définissant le motif principal de ces sorties à partir de la hiérarchie suivante : travail → école → collège/lycée → université → achats/services → accompagnement → loisir → autre.

Le second choix concerne la méthode de modélisation par micro-simulation. Celle-ci consiste à construire des typologies de profils de comportements. Ensuite, les individus de la population simulée sont représentés de manière exhaustive et se voient attribuer le comportement d'un individu de même profil, tiré aléatoirement au sein d'une base établie sur une population réelle. Dans notre cas, par exemple, l'EMD de Lyon, qui sert de base de tirage pour la simulation, a permis de segmenter la population en 55 types aux profils de mobilité bien différenciés (Gitton, 2006). La population simulée a été reconstituée de manière exhaustive à partir du RGP de 1999, et chaque individu est caractérisé par les variables socioéconomiques utilisées lors de la construction des profils de mobilité. Pour la prospective, cette population

évolue en respectant les distributions statistiques issues des projections démographiques de l'INSEE⁵.

2.1.2. Une bonne reconstitution des comportements observés

La méthode a été testée sur les données de l'EMD de 1995 en utilisant 75 % de l'échantillon pour établir le modèle et en vérifiant qu'il reproduisait correctement les comportements des 25 % de la population restante. Ces deux sous-échantillons ont été constitués par tirage aléatoire. On a ensuite comparé le nombre de sorties estimées par le modèle au nombre de sorties réellement observé dans l'enquête. Enfin, afin de mesurer un écart moyen qui ne dépende pas de la simulation, l'opération a été renouvelée 100 fois, et un écart moyen a été calculé. Globalement, le nombre total de sorties est bien reconstitué, avec une erreur moyenne globale de 1,1 % et inférieure à 2,8 % pour 95 % des simulations⁶. La méthode permet donc de reproduire l'observé avec une qualité tout à fait appréciable si on la compare avec les méthodes plus classiques par régression, qui ne permettent pas une désagrégation aussi fine des motifs de sorties.

Reste à tester l'hypothèse de constance des comportements à structure sociodémographique donnée. Le test a été réalisé à l'aide des données des enquêtes de 1985 et 1995 (l'enquête de 2006 n'était pas encore disponible au moment du test ; Gitton, 2006). Il en ressort que la mobilité des sorties les plus contraintes (travail, étude) est assez bien simulée et les changements de structure de population expliquent une bonne part des évolutions de mobilité en termes de sorties. En revanche, les résultats sont moins satisfaisants pour les motifs moins contraints (loisirs, achats-services), avec une augmentation de la mobilité entre 1985 et 1995 qui ne résulte pas d'un effet de structure de population et qui n'est pas prévu par la simulation. Deux interprétations sont possibles, qui se combinent sans doute dans les faits sans qu'il y ait moyen de le vérifier. On peut d'abord considérer que les écarts observés sont dus à des évolutions de comportements (i.e. l'hypothèse initiale n'est pas bonne). La seconde hypothèse est que la comparabilité temporelle entre les enquêtes ménages déplacements n'est pas strictement respectée ; en effet, l'analyse des résultats

5. Modèle OMPHALE : Outil Méthodologique de Projection d'Habitants, d'Actifs, de Logements et d'Elèves.

6. Si l'on entre dans le détail, les erreurs moyennes restent faibles pour les sorties les plus fréquentes. Par exemple, l'écart est inférieur à 3,6 % pour la moitié des simulations pour la sortie simple achats/service et l'écart moyen calculé sur les 100 simulations est de 4,4 %. L'écart moyen reste inférieur à 10 % pour toutes les sorties simples, mais est supérieur pour certaines sorties complexes.

pour les agglomérations disposant de quatre enquêtes ou plus met en évidence des évolutions souvent erratiques (CERTU, 2009), en partie explicables par les aléas liés aux méthodes d'échantillonnage, et en partie très probablement liées aux aléas introduits par la complexité de réalisation de ces enquêtes sur le terrain⁷ (Bonnell, 2004).

Cette limite du modèle, qui repose sur l'hypothèse de constance des comportements à caractéristiques socio-démographiques données, est commune à toutes les méthodes de génération. Nous envisageons de tenter de la réduire dans des travaux ultérieurs en analysant l'estimation du modèle à quatre étapes sur chacune des EMD afin de tenter de dégager des tendances d'évolutions qui pourraient alors être introduites dans les simulations sous forme de scénarios d'évolution de comportements.

2.2. Distribution et répartition modale : trois chaînes de modèles pour trois classes de revenus

La phase de distribution, deuxième étape du modèle à quatre étapes, permet de relier entre elles les sorties émises par chaque zone et les attractions que représentent les autres zones en fonction des activités qui s'y déroulent. Elle permet de produire la matrice origines-destinations (OD) des déplacements. L'étape suivante de répartition modale, vise à répartir cette matrice en autant de matrices de déplacements qu'il y a de moyens de transport. L'offre de transport, généralement mesurée par l'intermédiaire du temps généralisé, influe bien évidemment sur ces choix.

2.2.1. Choix méthodologiques : une approche en termes de sorties et une segmentation des individus en fonction de leur revenu

Le module de génération de SIMBAD conduit à produire des émissions et des attractions en termes de sorties et non pas en termes de déplacements. Dans l'approche classique en termes de déplacements, la distribution permet de relier les émissions et attractions entre elles, autrement dit l'origine et la destination des déplacements. Dans une sortie, l'origine et la destination sont au domicile. Il est donc nécessaire d'adapter la méthode pour identifier l'origine et la destination de chacun des déplacements inclus dans la sortie. Dans la pratique, il s'agit de déterminer le lieu de réalisation de chacune des activités incluses dans la sortie.

7. comme par exemple les grèves dans les TC dans les mois précédents l'EMD de Lyon en 2006.

L'exploitation de l'EMD de 2006 montre que la distance supplémentaire générée par les activités autres que celle correspondant au motif principal de la sortie est très faible par rapport à la distance aller-retour entre le domicile et le lieu du motif principal de la sortie. Globalement, la distance parcourue non prise en compte est inférieure à 1,5 % du total et nous avons fait le choix d'agréger les sorties simples (avec juste un aller-retour, domicile-destination-domicile) et les sorties complexes (avec des déplacements secondaires) ayant le même motif principal. Ce choix est tout à fait acceptable au regard de l'objectif de SIMBAD de production d'indicateurs pour évaluer l'état du système de transport (occupation de voirie, distance de déplacements pour les calculs d'émission, etc.), même s'il reste évidemment plus discutable sur le plan comportemental. Il est clair que ces activités « annexes » conditionnent parfois le choix du mode et nous envisageons de revenir sur ce choix lors des développements ultérieurs de SIMBAD.

Le second choix méthodologique découle des objectifs de SIMBAD, à savoir la production d'indicateurs prenant en compte les trois dimensions du développement durable. La dimension sociale est le plus souvent occultée par la modélisation du transport car les caractéristiques des individus ne peuvent être attachées aux déplacements. Nos choix méthodologiques pour la génération permettent en revanche de disposer des caractéristiques utilisées pour segmenter les profils d'individus. Il est donc possible de conserver ces caractéristiques lors des étapes de distribution et de répartition modale. Toutefois, cela conduit à estimer autant de modèles qu'il y a de segments de population. Les effectifs enquêtés étant souvent faibles au regard des besoins de modélisation, il n'était pas réaliste de conserver les 55 profils et nous n'avons conservé que le revenu défini en trois classes (20 % les plus modestes ; 60 % intermédiaires ; 20 % les plus riches).

En théorie, les localisations des activités réalisées et les choix modaux étant différents en fonction du revenu, cette segmentation devrait améliorer la qualité de notre modélisation. Il n'est toutefois pas sûr que ce gain en termes de pertinence compense la perte de qualité des estimations du fait de la réduction des échantillons utilisés, répartis en trois classes. Ce choix de la segmentation en fonction du revenu est donc plus guidé par l'objectif du projet SIMBAD de produire des indicateurs rendant compte de la dimension sociale du système de transport que par un objectif d'amélioration de la chaîne de modélisation transport.

2.2.2. *Un modèle gravitaire exponentiel pour la distribution*

Il existe plusieurs familles de modèles de distribution, mais celle dont l'usage est prédominant dans la modélisation contemporaine correspond aux modèles gravitaires qui fonctionnent par analogie avec la loi de la gravitation universelle de Newton⁸, et dont la forme générique est la suivante (Bonnel, 2004) :

$$T_{ij} = v \cdot e_i \cdot a_j \cdot f(c_{ij})$$

où : T_{ij} le nombre de sorties dont le domicile est en i et la localisation de l'activité principale en j , v est un coefficient de proportionnalité, f est la fonction de résistance liée au coût généralisé c_{ij} entre la zone i (émettant e_i sorties) et la zone j (attirant a_j sorties).

La spécification de la fonction f impacte directement les résultats de la phase de distribution. Dans le cadre de SIMBAD nous avons opté pour une formulation classique de type exponentielle, déterminée par une constante positive appelée paramètre d'impédance β . La méthode utilisée pour estimer ce paramètre est dérivée de celle d'Hyman (1969), elle vise à atteindre une fonction objectif qui est définie par :

$$c(\beta) = \frac{\sum_{ij} T_{ij}(\beta) \cdot c_{ij}}{\sum_{ij} T_{ij}(\beta)} = c^* = \frac{\sum_{ij} N_{ij} \cdot c_{ij}}{\sum_{ij} N_{ij}}$$

Avec c_{ij} le coût généralisé de i à j , N_{ij} le nombre de déplacements observés dans l'enquête ménages déplacements entre i et j , $T_{ij}(\beta)$ le nombre de déplacements modélisés entre i et j , c^* le coût généralisé moyen observé dans l'enquête ménages déplacements et $c(\beta)$ le coût généralisé moyen modélisé fonction de l'estimation de β .

2.2.3. *Répartition modale : un modèle Logit hiérarchique de choix discrets*

Trois modes de transport ont été retenus au sein de SIMBAD : la marche à pied (MAP), la voiture particulière (VP), utilisée en tant que conducteur ou que passager (les deux-roues motorisés sont également compris dans ce mode), et enfin les transports en commun (TC) qui incluent le bus, le tramway, le métro et le train. Dans cette première version, la part du vélo étant de l'ordre de 1% dans les enquêtes de 1995 ou de 2006, nous ne considérons que la marche à pied pour les

8. Formellement, le modèle gravitaire est établi à partir du principe d'entropie (Wilson, 1970).

modes doux. Les facteurs qui permettent aux agents d'arbitrer et de choisir un mode pour se déplacer sont multiples. Il est classique de les organiser en trois groupes (Bonnell, 2004) :

- l'offre de transport définie par le prix ressenti et le temps perçu par les individus ;
- les caractéristiques de la sortie (son origine et sa destination, le motif, l'heure, le chaînage des activités) ;
- les caractéristiques de l'individu qui conditionnent l'accès aux différents modes.

Dans le cadre de SIMBAD, les facteurs liés aux caractéristiques de la sortie – localisation de l'origine et de la destination, motif et chaînage des activités – ainsi qu'une partie des facteurs individuels – le revenu – interviennent par le biais des matrices OD issues de l'étape de distribution. L'étape de répartition modale à proprement parler permet d'intégrer dans l'analyse les facteurs liés à l'offre de transport – notamment par les temps généralisés et la contrainte de stationnement – ainsi que de prendre en compte une caractéristique individuelle supplémentaire, l'accès à la voiture particulière, par le biais du taux de motorisation. Cette étape se fait en deux temps, avec un premier modèle de choix entre les déplacements réalisés à pied et ceux réalisés avec un mode motorisé (MM), puis un deuxième modèle déterminant, parmi les déplacements en MM, ceux en TC et ceux en VP.

Pour le choix entre MAP et MM, nous avons retenu des modèles Logit pour chacun des motifs et des catégories de revenu considérés : il s'agit d'un choix binaire, nous n'avons donc pas défini une fonction d'utilité mais simplement une différence entre les utilités de la MAP et des MM. La partie déterministe de cette différence d'utilités est :

$$(U_{MAP} - U_{MM})_{ij} = k_1 + \tau_{MAP} \cdot c_{ij}^{MAP} + \tau_{MM} \cdot c_{ij}^{MM} + \delta_1 \cdot d_j \quad [1]$$

où : $(U_{MAP} - U_{MM})_{ij}$ est la différence d'utilité entre la MAP et les MM entre i et j ; c_{ij}^{MAP} et c_{ij}^{MM} sont les temps généralisés respectivement de la MAP et des MM ; d_j est la densité de la zone de destination et sert à donner une mesure de la contrainte de stationnement (Raux et Lichère, 1997). Enfin, k_1 , τ_{MAP} , τ_{MM} et δ_1 sont des paramètres de calage. La part de marché de la MAP $(MS_{MAP})_{ij}$ dans les déplacements entre i et j est alors donnée par :

$$(MS_{MAP}) = \frac{1}{1 + \exp((U_{MAP} - U_{MM})_{ij})}$$

Pour les modes motorisés, il est difficile de mettre en place un modèle de choix s'appliquant à tous les motifs et à toutes les catégories

de revenu. Plus précisément, les sorties pour motif d'enseignement primaire et secondaire sont réalisées par des individus ayant des formes d'accès très particulières à la VP et aux TC. L'observation des parts modales pour ces motifs ne fait pas apparaître de variations significatives dans le temps, avec une part de marché TC d'environ 8 % pour l'enseignement primaire et autour de 70 % pour l'enseignement secondaire en 1985 et 1995 (Lichère *et al.*, 1997). On retrouve à peu près les mêmes valeurs en 2006. Pour cette première version de SIMBAD, le choix a été de conserver ces deux valeurs pour les motifs « enseignement primaire » et « enseignement secondaire ». Les matrices sont obtenues en multipliant les matrices MM par ces parts de marché, supposées constantes. Pour tous les autres motifs, on utilise le modèle de choix de type Logit suivant :

$$(U_{TC} - U_{VP})_{ij} = k_2 + \tau_{TC} \cdot CP_{ij}^{TC} + \tau_{VP} \cdot CP_{ij}^{VP} + \delta_2 \cdot d_j \quad [2]$$

avec : $CP_{ij}^{TC} \equiv c_{ij}^{TC} \cdot \xi_i$ et $CP_{ij}^{VP} \equiv c_{ij}^{VP} / \xi_i$

où : c_{ij}^x le temps généralisé du mode x entre i et j , d_j la densité de la zone de destination, ξ_i le taux de motorisation de la zone d'origine (rapport entre le nombre de voitures et le nombre de personnes de plus de 18 ans). CP_{ij}^x est un temps généralisé perçu : ξ_i augmente la pénibilité relative des sorties TC tandis qu'elle réduit celle des sorties VP.

Pour l'application du modèle, il faut donner des valeurs aux quatre paramètres de l'équation (1) et aux quatre paramètres de l'équation (2), pour tous les niveaux de revenu ainsi que pour tous les motifs, dans le premier cas, et pour les motifs autres que l'enseignement primaire et secondaire dans le second. La méthode de calage utilisée est celle proposée par P. Bonnel (2003), par itération d'agrégations des observations associées à des régressions linéaires pour traiter au mieux les nombreuses cases vides des matrices OD.

2.3. L'intégration des marchandises en ville : l'interface entre FRETURB et SIMBAD

Les transports de marchandises représentent plus de 15 % des trafics de l'aire urbaine de Lyon (Cabanne *et al.* 2000). Les travaux du LET sur cette thématique et le développement du modèle FRETURB (Routhier *et al.*, 2001 ; Toilier *et al.*, 2005) ont permis de prendre en compte ce type de déplacements dans le projet SIMBAD. Ceci constitue une innovation importante puisque les transports de marchandises

ne sont traditionnellement pas intégrés dans la modélisation à quatre étapes⁹.

Par contre, il est nécessaire d'évoquer les adaptations de FRETURB pour permettre un dialogue correct avec les différents modules de SIMBAD. En amont, les modifications ont touché au niveau de précision requis pour les données d'entrée du modèle. En aval, elles ont consisté à détailler les résultats pour pouvoir les associer aux flux de personnes dans le module de trafic. Mais entre les deux, il a également fallu aménager le logiciel de façon à obtenir dans un délai d'exécution supportable des résultats suffisamment fins pour être utilisables.

(i) Une perte de précision dans la caractérisation des établissements. En 1999, année de base du modèle SIMBAD, les établissements économiques sont directement issus du fichier SIRENE, il n'y a donc pas de problèmes de compatibilité avec FRETURB qui utilise également cette source de données. Les établissements y sont décrits avec la finesse d'information requise par le modèle : localisation, activités fines en 700 secteurs, taille des établissements, type de locaux, statut des unités.

Mais les années suivantes, du fait de l'évolution démographique propre aux activités économiques, le fichier SIRENE originel est modifié, certains enregistrements disparaissent tandis que d'autres sont créés. Ces nouveaux établissements sont générés selon les contraintes fixées par le module de transition économique d'URBAN-SIM, qui fournit un nombre annuel d'établissements sur la période 1999–2025 pour chaque activité détaillée selon les 36 rubriques de la Nomenclature économique de synthèse (NES) de L'INSEE et les 9 classes de taille fixées par le modèle SIMBAD (cf. point 3.3.). Les nouveaux établissements sont donc connus avec un niveau de précision moindre que ceux issus de SIRENE. Néanmoins, sachant que, d'une part, le modèle FRETURB classique s'applique année après année pour tous les établissements qui perdurent depuis 1999, qu'ils soient sédentaires ou aient déménagé dans l'aire d'étude, et que, d'autre part, le flux d'établissements nouveaux est marginal¹⁰, l'erreur introduite par cette moindre précision pèsera peu dans le résultat global.

(ii) Le recours à un macrozonage pour accélérer la production des résultats. La distribution des flux dans FRETURB se fait au moyen des 25 fonctions de distance établies en fonction du type d'opération, de

9. Le chapitre 8 étant consacré à la présentation du modèle FRETURB, il n'est pas utile de revenir sur ce point.

10. Un établissement commercial change d'enseigne ou déménage environ tous les dix ans, tout en restant souvent dans le même quartier donc probablement dans la même zone ; les gros établissements sont beaucoup plus stables.

gestion, de véhicule et de densité de zone. En confrontant ces fonctions au distancier et aux capacités d'accueil des zones, on établit une liste de zones avec lesquelles une zone donnée est susceptible d'échanger. La lourdeur de la procédure et le type de programmation utilisé¹¹ induisent des temps de calculs importants, dont la croissance est exponentielle selon le nombre de zones à traiter. Pour permettre aux simulations SIMBAD sur 25 ans de se dérouler dans une durée raisonnable, la distribution des flux de marchandises n'est réalisée que tous les 5 ans et porte sur un macrozonage en 34 zones. Les flux ainsi distribués sont ensuite éclatés suivant les 777 IRIS de l'aire urbaine de Lyon, au *prorata* du poids de chacun d'entre eux dans la génération des flux.

(iii) En sortie, des flux de même nature que ceux des déplacements de personnes. Dernier point, l'affectation des trafics de marchandises sur le réseau routier suppose une homogénéisation des sorties par rapport aux trafics de personnes. Tout d'abord, FRETURB fournit des flux non orientés. Pour les besoins de SIMBAD, ces flux ont été orientés en posant qu'ils sont en quantité égale de A vers B et de B vers A (la matrice est symétrisée). Enfin, FRETURB distingue trois catégories de véhicule, auxquels sont appliqués des coefficients multiplicateurs afin de les rendre comparables aux voitures particulières en termes d'occupation de la voirie, et de permettre une affectation du trafic sur le réseau routier la plus juste possible. Ainsi, les véhicules utilitaires de moins de 3,5 tonnes sont multipliés par un coefficient de 1,5 ; les camions porteurs par 2 et les articulés par 2,5, selon la même correspondance que le modèle FRETURB (Chapitre 8, point 1).

2.4. Une codification systématisée des réseaux de transport pour simuler les trafics

Les travaux présentés dans les parties précédentes permettent de disposer des flux d'échanges entre toutes les zones de l'aire urbaine. Ils ont été complétés par les trafics de transit et d'échange avec l'extérieur, qui restent marginaux, ainsi que par la répartition entre heure de pointe et heure creuse donnée par les EMD et les Enquêtes marchandises en ville (EMV ; v. Chapitre 8). Il reste ensuite à affecter ces flux sur les réseaux pour déterminer les itinéraires, les tronçons congestionnés et les temps d'accès entre les zones.

Pour cette dernière étape de modélisation, le logiciel DAVISUM a été retenu, tant du fait de ses bonnes performances que parce qu'il est bien utilisé au sein des services de l'équipement du Ministère du déve-

11. VBA sous Access

veloppement durable (MEEDDM) et par les collectivités territoriales. Cependant, plus que le choix du logiciel proprement dit et les calculs d'affectation qu'il propose, c'est le travail de codification des réseaux qui apparaît le plus décisif pour la qualité des résultats. Cette codification est extrêmement chronophage lors du développement d'un modèle de transport. Elle nécessite le plus souvent un important travail de collecte de données existantes, complétée par des productions de données spécifiques.

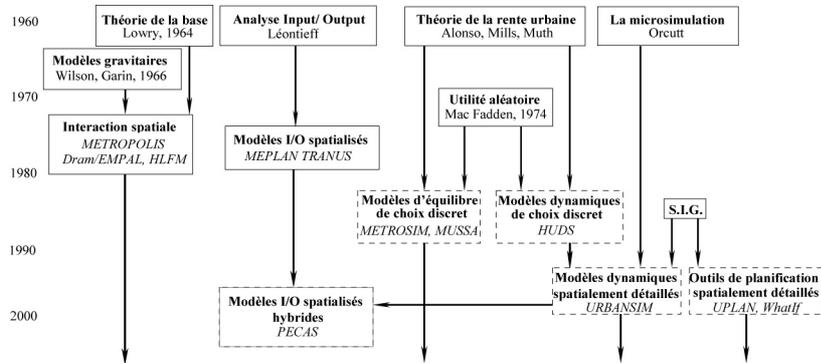
Dans le cadre de SIMBAD, nous avons souhaité d'une part explorer les potentialités offertes par les bases de données géographiques existantes pour limiter le travail de collecte, et d'autre part évaluer les possibilités d'une codification la plus automatique possible afin de pouvoir reproduire cette codification dans le temps, tant dans le passé pour un calage dynamique des modèles que pour garantir la cohérence des représentations de réseaux dans le futur. Ce sont les résultats de cette réflexion qui sont présentés ici.

2.4.1. *Le réseau routier*

Notre objectif a été de traiter les réseaux de la manière la plus automatique possible à partir de bases routières existantes comme NAVTEQ® (qui fait aujourd'hui référence en matière de navigation routière), ou la base GEOROUTE® développée par l'Institut géographique national (IGN). Cela nous a permis de réduire le temps de codification, mais surtout, de reproduire des réseaux passés ou à venir de manière homogène, sans être liés aux contingences d'une codification *ad hoc*. Nous ne souhaitons pas avoir à traiter des agrégations de liens aux caractéristiques différentes qui nécessitent toujours un traitement particulier dont l'automatisme est forcément limitée. En conservant la totalité du réseau, nous avons décrit chacun des liens à partir des informations disponibles sur les infrastructures correspondantes. Par contre, même si le réseau et le zonage retenus apparaissent très fins, puisque l'ensemble des voiries sont conservées et connectées aux 777 IRIS de l'aire urbaine de Lyon, cette finesse ne se retrouve pas au niveau de la mesure des attributs des nœuds et des liens, qui sont quant à eux traités de manière agrégée à partir de règles systématiques.

De ce fait, la précision du réseau routier est largement illusoire et ne doit pas tromper sur le niveau d'analyse des résultats, qui doit se limiter à un niveau macro à l'échelle de l'agglomération. L'objectif est bien de donner des indications sur les flux et les temps de parcours ou les temps généralisés entre secteurs de l'agglomération afin de produire des indicateurs d'évaluation des politiques de transports à l'aune du développement durable à l'échelle de l'agglomération ou d'illustrer

Figure 2
GEH en fonction du type de réseau



le degré de péri-urbanisation ou de périphérisation des flux ou encore le poids relatif du centre par rapport à des couronnes périphériques.

Nous avons appliqué nos principes de codification des réseaux sur les bases NAVTEQ® et GEOROUTE®. Ceci nous a permis de mesurer la qualité insuffisante des bases routières à ce jour, même si le développement des applications de guidage routier devrait conduire à les améliorer dans le futur. Un important travail de correction a permis de produire un réseau routier extrêmement fin contenant plus de 100 000 arcs et près de 45 000 nœuds, validé grâce aux données de comptages disponibles. Le test des résultats de l'affectation a été réalisé avec l'indice GEH¹², qui permet de comparer deux séries de volume de trafic :

$$GEH = \sqrt{\frac{2(M - C)^2}{M + C}}$$

où M représente les flux modélisés et C les flux des données de comptage.

Nous avons comparé les résultats de l'affectation avec tous les comptages disponibles. Généralement, dans les études de circulation de projets d'infrastructure de transport, on considère qu'il est souhaitable que 85 % du volume de trafic ait un GEH inférieur à 5 % (DMBR, 2009). Compte tenu de notre objectif qui vise une analyse macro-économique des politiques, cette exigence de précision ne constitue pas une contrainte absolue. Comme l'indique la Figure 2, les

12. du nom de son concepteur : Geoffrey E. Havers.

résultats finaux sont tout à fait corrects. Ils restent acceptables pour le périurbain, mais sont de moins bonne qualité en milieu urbain et pour les échangeurs autoroutiers. Le calage du réseau méritera donc d'être affiné, ce qui pourra être réalisé lors du calage dynamique de l'ensemble du modèle SIMBAD.

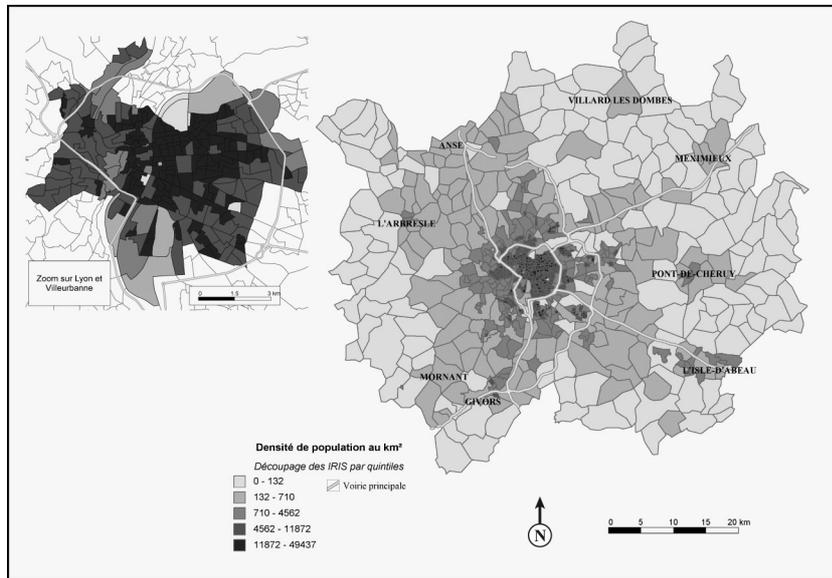
2.4.2. *Le réseau de transports collectifs : vers une codification automatique à partir des données publiques ?*

La codification du réseau TC a également été développée à un niveau très fin à l'aide d'une digitalisation de tous les arrêts. La construction des attributs des lignes a ensuite été réalisée de manière automatique à partir des guides horaires du réseau. Le calage des réseaux donne des résultats satisfaisants à un niveau macro. En revanche, malgré la finesse de la description des réseaux, l'analyse des résultats ne peut être conduite à un niveau spatial fin (Nicolas *et al.*, 2009).

La description du réseau TC est de nature différente de celle du réseau viaire. Un réseau de transports collectifs est composé de lignes et le passage d'une ligne à une autre génère un coût ou temps généralisé supplémentaire qui n'a pas d'équivalent pour la voiture. Il est donc nécessaire de superposer au graphe du réseau une description des lignes de transports collectifs. Pour chaque ligne, cette description consiste en une succession de nœuds correspondant à des possibilités de monter ou descendre de la ligne. Selon la finesse de représentation nécessaire, on peut isoler chacun des arrêts d'une ligne ou bien agréger plusieurs arrêts dans un même nœud (Bonnel, 2004). Le graphe support de ce réseau peut être le graphe du réseau viaire. Toutefois, la description de lignes en site propre nécessite en général l'ajout de nœuds et de liens supplémentaires, car ces liens ne peuvent pas être utilisés par les autres modes de transport et sont bien souvent situés, au moins partiellement, en dehors du réseau viaire.

Les principes de codification retenus sont similaires à ceux que nous avons exposés pour le réseau routier. De même, dans le prolongement de cette logique, nous avons retenu une codification fine du réseau de transports collectifs qui conduit à codifier tous les arrêts de transports collectifs y compris lorsque plusieurs arrêts sont localisés au sein d'un même IRIS. Concernant la codification des liens connectant la zone au réseau, le travail est plus complexe et plus sensible que pour le réseau routier. Nous avons tout de même privilégié une approche conduisant à une codification automatique, permettant une reproductibilité pour réaliser différents scénarios de réseau. Ce choix a été facilité par le

Figure 3
Résultats du calage du réseau de transports collectifs



Source : d'après TERESE, EGIS RAIL et DAVISUM-SIMBAD, LET

travail de D. Caubel (2006), qui a réalisé la digitalisation de l'intégralité du réseau TC du Grand Lyon dans le cadre de sa thèse.

Toutefois, la finesse spatiale de la codification du réseau TC ne doit pas tromper, car l'usage de règles les plus automatiques possible fait que l'analyse doit rester agrégée. Par exemple, lorsque plusieurs arrêts sont inclus dans une même zone, la modélisation ne permet pas d'identifier correctement la charge de chacun des arrêts. En effet, toute la demande étant concentrée sur le centroïde de chaque zone, il n'est pas possible de la répartir entre les arrêts sur une base comportementale solide même si DAVISUM, comme d'autres logiciels, propose des fonctionnalités qui permettent d'éclater la demande entre les différents nœuds.

Pour réaliser le travail de calage, ne disposant pas des données de charge des différentes lignes de transports collectifs pour 1999, nous avons comparé nos résultats avec ceux du logiciel TERESE développé par EGIS RAIL (SEMALY, 2000). Nous avons considéré que ces derniers étaient proches de la « réalité » dans la mesure où les nombreuses études réalisées sur l'agglomération lyonnaise avec le logiciel TERESE apportent des résultats très satisfaisants (GESMAD, 2000). Plusieurs tests ont été réalisés afin de caler les paramètres de la fonc-

tion de temps généralisé, ainsi que les matrices de pénalités de correspondance entre modes et les matrices de temps de marche à pied entre zones d'arrêt. Les résultats obtenus sont proches de ceux produits par le logiciel TERESE à la fois sur le plan de la répartition entre les modes de transports collectifs et sur celui de la charge des principales lignes du réseau. Il n'est donc pas nécessaire de chercher à affiner ce calage dans la mesure où l'analyse devra être reprise lors du calage en dynamique de l'ensemble des modules de SIMBAD.

2.5. Conclusion : le double usage des résultats du modèle de transport

Les calculs réalisés au fil des quatre étapes du modèle de transport débouchent sur les résultats fournis par la procédure d'affectation et sont destinés à un double usage.

Le premier consiste à poursuivre la simulation dans SIMBAD en utilisant les temps d'accès interzones pour estimer les localisations des ménages et des établissements entrant ou déménageant dans l'aire urbaine de Lyon au cours de la période. Pour l'instant les indicateurs utilisés ont été des indicateurs d'accessibilité gravitaire simples, de forme $A_i = \sum_j^n O_j / t_{ij}$. Ils sont appliqués avec les temps calculés en heure de pointe et fournissent déjà de bons résultats. D'autres indicateurs sont en cours de test, de type $A_i = \sum_j^n O_j e^{-\beta c_{ij}}$ (Hansen, 1959), où β traduit la sensibilité des échanges entre i et j par rapport au coût c_{ij} correspondant au temps généralisé estimé sous DAVISUM. Leur formulation apparaît en effet plus cohérente avec le cadre théorique utilisé dans nos modèles de localisation (Bonnafous et Masson, 2003 ; Raux et al., 2008).

Les résultats du modèle d'affectation ont également une seconde fonction. Ce sont essentiellement eux qui permettent d'estimer les indicateurs d'impact du système de transport sur les dimensions environnementales, économiques et sociales. C'est ici que la distinction des ménages en trois classes de revenus, modélisés séparément dans la chaîne transport, prend tout son sens. L'affectation « multi-classes » sous DAVISUM conserve l'information sur l'origine de chacune des matrices origines-destinations affectée sur les réseaux. Elle permet ainsi de savoir qui a fait quoi, et par exemple de disposer de ratios d'émissions unitaires des véhicules plus précis, ou de connaître les coûts des mobilités de chaque groupe en fonction de leur revenu et de leur localisation. De même, les calculs de temps généralisés du modèle d'affectation permettent d'établir les différentes accessibilités utilisées pour rendre compte du service rendu par le système de transport.

3. URBANISME : LA LOCALISATION DES MÉNAGES ET DES ACTIVITÉS ÉCONOMIQUES

De nombreux travaux proposent un état de l'art de la modélisation des interactions entre transports et urbanisme (LUTI pour *Land Use and Transport Interaction*) : Wegener et Fürst (1999), Simmonds *et al.*, (1999), Wegener (2000), Waddell *et al.* (2001), Hunt *et al.*, (2005). Nous reprenons ici rapidement une synthèse des différentes familles de modèles existantes, avec les soubassements théoriques qui les sous-tendent, avant de montrer la logique qui nous a poussés au choix de la plate forme de modélisation OPUS-URBANSIM et de présenter le travail de modélisation réalisé pour la localisation des ménages et des établissements.

3.1. Quelles modélisations des interactions entre localisations et transports ?

Les premiers modèles transport-urbanisme recensés au début du siècle précédent sont assez descriptifs ou analytiques. Le modèle de Von Thünen est l'exemple le plus classique (cf. Chapitre 1). Il explique la localisation des activités agricoles autour des villes en considérant que le seul facteur de structuration de l'espace est constitué par la distance des terres au marché urbain. Ces travaux précurseurs ont fourni un cadre de simulation urbaine que l'on retrouve dans les développements de la Nouvelle économie urbaine et ses travaux sur la rente urbaine, avec le modèle de Lowry en 1964, puis les nombreux modèles d'interaction entre transport et urbanisme qui se sont développés par la suite. Ils sont très diversifiés, tant du point de vue des soubassements théoriques sur lesquels ils s'appuient, que des techniques de modélisation qu'ils emploient. La théorie de la base et la théorie de la rente urbaine constituent sans doute deux des approches les plus fécondes en la matière. Elles ont ensuite pu être enrichies par des outils conceptuels et méthodologiques qui ont assuré le développement de la recherche sur ce champ de la modélisation. Par ailleurs, un modèle peut combiner différentes approches théoriques et différents outils, comme l'illustre la Figure 4, proposée par P. Waddell (2005).

Dans la théorie de la base, les activités économiques d'une aire urbaine sont distinguées en activités basiques et en activités induites. Les activités basiques sont les activités exportatrices par rapport à l'aire d'étude, elles sont considérées comme exogènes au modèle. La population employée par ces activités s'installe dans l'agglomération, ce qui entraîne le développement d'activités induites comme des activités de services aux particuliers. Les activités basiques constituent

ainsi le moteur de croissance économique de la zone d'étude, exogène au modèle. Dans l'analyse des matrices input/output de Leontieff, le système d'activités est représenté par un modèle comptable spatial d'entrées-sorties. Une segmentation des secteurs économiques est opérée, et les échanges intersectoriels ainsi repérés constituent une matrice input/output. Cette mise en forme des données est souvent associée à la théorie de la base qui fournit une grille pour distinguer les différents types d'activités entrant dans la matrice. On retrouve ici des modèles comme TRANUS (de la Barra *et al.*, 1984) ou MÉPLAN (Echenique *et al.*, 1990).

La théorie de la rente urbaine suggère que les valeurs des sols résultent d'un arbitrage entre les coûts de transport et l'accessibilité. Elle se base sur l'hypothèse fondamentale du modèle monocentrique de la Nouvelle économie urbaine (Alonso, Muth, Mills), qui stipule que les coûts de transport augmentent avec la distance au centre d'emploi et sont identiques pour l'ensemble des ménages suburbains. Par conséquent, les rentes et les densités diminuent avec la distance au centre. Dans sa forme statique initiale, cette approche débouche sur des modèles d'équilibre où, étant donné l'état des variables d'entrée, les valeurs des variables de sortie sont directement calculées et fixées pour l'horizon de la simulation, comme dans le cas des modèles METROSIM (Anas, 1994) ou MUSSA (Martinez et Donoso, 1995). Certains des prolongements qui ont suivi ont porté sur des représentations dynamiques au sein des modèles : les valeurs fournies à la période précédente influent sur les résultats de la période suivante, et ainsi de suite jusqu'à l'horizon de la simulation, sans qu'un équilibre ne soit forcément obtenu *in fine*. On retrouve ici les modèles de type URBANSIM (Waddell, 2001, 2002), utilisé pour SIMBAD.

Les outils fournis par la théorie de l'utilité aléatoire ont également enrichi cette approche du modèle monocentrique (Anas, 1983). Un individu attribue à chaque localisation une fonction d'utilité définie en fonction des caractéristiques de la zone. Il pourra ainsi sélectionner la localisation qui offre la plus forte utilité pour lui. Afin de prendre en compte la variabilité des comportements individuels, les utilités sont spécifiées comme des variables aléatoires, de telle sorte que le choix est probabiliste.

Les modèles gravitaires, enfin, sont fondés par analogie avec la loi gravitationnelle de Newton, qui stipule que la force d'attraction entre deux corps est le produit de leur masse divisée par le carré de leur distance. Transférée à un contexte géographique, la force peut être représentée par le nombre de déplacements entre deux régions, la masse peut être assimilée à une variable structurelle telle que la taille

Figure 4
Evolutions des théories et des outils des modèles LUTI

	GEH [0 -10%]	GEH]11% et +]	Poids des postes de comptage en UVP
Autoroute, Périphérique, VRU	82%	18%	52%
Périurbain	75%	25%	9%
Urbain	57%	43%	31%
Echangeurs	55%	47%	8%
Tous postes de comptage	66%	34%	100%

Source : P. Waddell (2005)

de la population et une fonction de résistance (de type temps généralisés) remplace la distance. On se donne ainsi une mesure de la capacité des zones à attirer ou à générer des déplacements, permettant de faire le lien entre les localisations et les transports, comme dans le cas du modèle DRAM/EMPAL (Putman, 1995).

A côté de cette approche historique des outils et méthodes, Simmonds *et al.* (1999) se sont intéressés aux finalités et aux possibilités offertes par les différentes familles de modèles pour déboucher sur une classification en cinq groupes. Un premier groupe de modèles a pour objet d'optimiser les configurations urbaines plutôt que de prédire les impacts des politiques de transport sur l'évolution de la structure urbaine. Ils sont généralement adaptés à une perspective de planification à long terme. D'autres modèles répondent plus directement aux besoins de prévision des impacts des politiques de transport et d'aménagement sur l'évolution des aires urbaines. Parmi eux, Simmonds *et al.* (1999) distinguent les modèles statiques qui s'appliquent à un moment donné dans l'espace-temps (exemple de MUSSA) et les modèles quasi-dynamiques qui fonctionnent sur plusieurs périodes de temps. Ces derniers peuvent ainsi prendre en compte les changements du système des transports qui nécessitent généralement plus d'une période de temps pour avoir un impact sur l'occupation du sol. On retrouve parmi ces derniers les grandes distinctions évoquées précédemment, suivant qu'ils soient basés sur l'entropie et l'analogie gravitaire (DRAM/EMPAL), sur la théorie de la base (MEPLAN, TRANUS) ou issus des travaux d'économie spatiale (URBANSIM).

Les objectifs d'évaluation de politiques publiques du projet SIMBAD, avec notamment (i) la dimension prospective de l'exercice, et la prise en compte des temporalités des différents sous-systèmes en interaction et (ii) la nécessité de distinguer plusieurs types d'acteurs (par exemple les ménages en fonction de leur revenu pour rendre compte des éventuels impacts sociaux des politiques testées), nous ont

conduit à privilégier les approches quasi-dynamiques et les approches basées sur des logiques de choix discret.

3.2. Les principales options méthodologiques retenues dans SIMBAD

A partir de la revue de la littérature, du bilan des projets existants et des modèles déjà élaborés, nous avons finalement retenu la plateforme de modélisation URBANSIM développée par P. Waddell et son équipe à l'Université de Washington (Nicolas et Deymier, 2005). Outre sa bonne adéquation avec la problématique du projet SIMBAD, ce choix a été motivé par le fait qu'URBANSIM constitue une plateforme ouverte, libre d'usage, développée par une équipe de chercheurs américains qui apportent un soutien significatif aux utilisateurs et disposant d'un réseau de chercheurs européens en cours de constitution (Krivobokov *et al.*, 2008).

3.2.1. La logique d'agencement des modules d'URBANSIM

On trouvera une présentation complète et détaillée de la plateforme Opus-URBANSIM dans le Guide de l'Utilisateur disponible en ligne et publié par l'équipe d'URBANSIM (Center for Urban Simulation and Policy Analysis, 2009). Des synthèses sont également proposées par P. Waddell (Waddell, 2002 ; Waddell *et al.*, 2003), de même qu'en français, les rapports des projets SIMAURIF et SIMBAD apportent un bon éclairage sur l'outil (De Palma *et al.*, 2004, 2005 ; Nguyen-Luong, 2007 ; Nicolas *et al.*, 2009). Nous proposons ici une présentation très générale d'URBANSIM, avec l'agencement des différents modules entre eux et la théorie des choix discrets qui sous-tend l'essentiel de la modélisation, même si l'utilisateur reste libre d'utiliser ou de développer d'autres outils. Que ce soit pour la localisation des ménages comme celle des activités économiques, URBANSIM procède selon une même logique en trois phases :

1. Un module de transition permet de prendre en compte les évolutions annuelles. Il est nécessaire de lui fournir pour chaque année le nombre et la répartition des ménages selon les caractéristiques socio-économiques retenues. Le module supprime alors les ménages en trop dans la base établie pour l'année précédente et repère ceux qui sont en plus, auxquels il convient d'attribuer une localisation géographique. La procédure est la même pour les activités économiques ;

2. Un module de relocalisation permet d'estimer les ménages (ou activités économiques) changeant d'adresse durant l'année. Comme pour le module suivant, un tirage s'opère sur la base de probabilités différenciées établies à partir d'un modèle de choix discret ;

3. Enfin, un module de localisation va permettre d'attribuer une localisation géographique à tous les ménages (ou activités économiques) repérés au cours des deux phases précédentes.

Deux autres modules complètent ce premier enchaînement. Le premier est dédié à la détermination des prix du marché foncier, qui influent sur les résultats du module de localisation. L'autre module (dit « module de développement urbain ») est relatif à l'évolution des usages du sol et permet d'offrir des opportunités de localisation dans chaque zone, pour les ménages comme pour les activités économiques à la recherche d'un lieu d'implantation. Les hypothèses liées à la demande de transport sont quant à elles déterminées par la plateforme intégrée dans SIMBAD. Celle-ci fournit les distances, les temps et les temps généralisés entre les zones de l'Aire urbaine de Lyon qui servent à calculer les indicateurs d'accessibilité (au centre-ville, aux emplois, aux différents types de population, aux réseaux de transport, etc.) utilisés ensuite par les différents modules d'URBANSIM.

3.2.2. Une modélisation à partir de la théorie des choix discrets

En termes de méthode, URBANSIM se fonde préférentiellement sur des modèles de choix discrets, tant pour les modules de localisation que de développement urbain. Ces modèles sont basés sur l'utilisation de la théorie de l'utilité aléatoire sur des alternatives discrètes, avec comme objectif l'estimation d'un choix à partir de la connaissance d'un ensemble d'alternatives mutuellement exclusives et collectivement exhaustives (Domencich et McFadden, 1975 ; Ben Akiva et Lerman, 1985). On trouvera une présentation de cette approche dans le Chapitre 3 consacré au projet SIMAURIF. Dans ce cadre, un premier problème concerne la spécification de composante déterministe de la fonction d'utilité, à savoir le choix des variables à prendre en compte ainsi que de la forme fonctionnelle appropriée. Dans la plupart des cas, on utilise des fonctions linéaires, ce qui a également été le cas dans le cadre de SIMBAD.

Par ailleurs, à défaut de déterminer le terme aléatoire, la question se pose de sa distribution statistique. L'hypothèse la plus utilisée conduit aux modèles Logit selon laquelle les composantes aléatoires des fonctions d'utilité sont indépendamment et identiquement distribuées (on suppose donc que la variation due aux facteurs non observés est identique entre les individus). On peut alors montrer que sous ces conditions une variable aléatoire ε suit une distribution de Gumbel de paramètres μ et η qui s'exprime par la formule $F(\varepsilon) = \exp(-e^{-\mu(\varepsilon-\eta)})$, $\mu > 0$, avec une loi de densité $f(\varepsilon) = \mu e^{-\mu(\varepsilon-\eta)} \exp(-e^{-\mu(\varepsilon-\eta)})$. Dès lors, en fonction du nombre d'alternatives de choix dont le décideur dispose,

on aura une formulation Logit multinomiale s'écrivant $P_n(i) = e^{\mu^{V_{in}}} / \sum_j e^{\mu^{V_{jn}}}$.

La puissance de calcul nécessaire pour estimer un Logit multinomial s'accroît rapidement avec le nombre d'alternatives possibles. Elle devient même rédhibitoire pour les modèles de localisation, où le nombre de choix correspond au nombre de cellules décomposant le territoire – souvent plusieurs milliers. Pour dépasser cette limite, M. Ben-Akiva et S. Lerman (1985) ont montré qu'il est possible de réduire l'univers de choix des localisations en réalisant au préalable un tirage aléatoire d'un nombre réduit d'alternatives parmi toutes celles possibles. On s'éloigne ainsi des standards d'estimation du modèle Logit, mais les résultats obtenus restent convergents avec ceux de la méthode académique.

3.2.3. *Une modélisation en deux temps : délocalisation, localisation*

En toute logique, la décision des ménages ou des établissements en matière de localisation devrait être conçue comme un processus unique qui intègre deux composantes, le choix de changement de lieu et le choix d'une nouvelle localisation, qu'il serait théoriquement plus réaliste de représenter dans seul modèle – un Logit emboîté dans le cadre d'une modélisation des choix discrets. Cependant, pour procéder de la sorte, il est nécessaire de disposer de bases de données désagrégées à un niveau fin, qui permettent de connaître les raisons de ces deux décisions enchaînées. Or, pour les ménages comme pour les établissements, nous n'avons pu travailler qu'avec des bases séparées pour traiter des probabilités de délocalisation d'une part (respectivement l'Enquête Logement 2002 et le Répertoire des Entreprises et des Etablissements de 1998, 1999 et 2000) et des logiques de localisation d'autre part (RGP et fichier SIRENE de 1999). Cette limite n'est pas propre à notre terrain et, de fait, les deux facettes de la décision de localisation sont souvent traitées séparément dans la littérature. C'est aussi la solution proposée dans la version actuelle d'URBANSIM. Par défaut, c'est donc cette modélisation séparée des deux étapes du processus de décision de localisation qui a été retenue, même si la dynamique du choix se trouve en partie perdue.

3.3. **Localiser les activités économiques**

URBANSIM propose par défaut une modélisation des emplois et de leur localisation. Compte tenu de l'organisation générale de SIMBAD, et notamment de la prise en compte des échanges inter-

entreprises via l'intégration de FRETURB, il est apparu approprié de s'intéresser directement aux établissements qui contiennent ces emplois. En effet, ce sont eux qui génèrent les mouvements de marchandises pris en compte par ce modèle. Disposant des deux derniers fichiers SIRENE de 1999 et 2005 au niveau fin de l'IRIS (Caubel, 2006), il est possible d'intégrer des chiffres d'emplois de manière détaillée spatialement et par secteur d'activité. Un premier travail avait déjà souligné la diversité des logiques de localisation des établissements dans l'aire urbaine de Lyon (Gossmann, 2006). Il avait été repris en intégrant les logiques de modélisation d'URBANSIM (Bouvard, 2008) et un bilan global a pu être proposé dans Nicolas *et al.* (2008a).

3.3.1. *Les facteurs explicatifs de la mobilité et de la localisation des établissements*

Les entreprises décident de déménager essentiellement pour des raisons internes. En effet, la décision est surtout prise à la suite de modifications de l'activité (hausse, baisse, restructuration, etc.). A bien des égards, le transfert d'un établissement, total ou partiel, peut être considéré comme la mesure d'adaptation ultime de l'entreprise (Fischer, 1994). Autrement dit, un transfert étant toujours très coûteux, l'entreprise n'y recourt qu'une fois épuisées les possibilités d'adaptation sur place. Ce recours le plus tardif possible permet en partie de comprendre l'apparente inertie spatiale des établissements. En France, leur taux de transfert annuel est en moyenne de 4,6 % pour les années 1989-1996 (Delisle et Laine, 1998), ce qui correspond également à la moyenne observée sur la région urbaine de Lyon (Battu et Vialette, 2005). Ce taux de mobilité d'un établissement varie sensiblement suivant ses caractéristiques et quatre facteurs déterminants ressortent (Battu et Vialette, 2005 ; Jourdan, 2004 ; Merenne-Schoumaker, 2003) : le secteur d'activité, la taille, l'âge et le type d'entreprise à laquelle appartient l'établissement.

Concernant les logiques de localisation, l'approche théorique classique met en avant deux facteurs importants (Ponsard, 1988 ; Fujita et Thisse, 2003). D'une part les localisations résultent d'un arbitrage entre coûts d'accès au centre et prix du foncier (les transports et l'efficacité des réseaux jouent ici un rôle de premier plan). D'autre part, ce premier modèle se complexifie en considérant que de nombreuses entreprises ont avantage à se localiser à proximité les unes des autres, soit en se situant près d'entreprises similaires (externalités de localisation), soit en profitant d'une diversité sectorielle de leur territoire (externalité d'urbanisation).

Certains travaux empiriques (Merenne-Schoumacker, 1991, 2003 ; Aguilera *et al.*, 1999) font ressortir par ailleurs que dans l'industrie comme dans les services, les localisations sont influencées par les caractéristiques tout à la fois des établissements et des territoires. Parmi les caractéristiques des établissements, on retrouve les mêmes facteurs que ceux qui jouent sur les logiques de transferts : le secteur d'activité (qui conduit à des recherches différenciées en matière d'externalités d'agglomération), la taille (avec une contrainte croissante liée au besoin d'espace) et le type d'entreprise à laquelle appartient l'établissement (du fait des logiques d'entreprise qui dépassent celles de l'établissement). Parmi les caractéristiques des territoires, le marché de l'emploi joue un rôle sensible du fait des besoins en main-d'œuvre des entreprises. Les infrastructures de transport et l'accessibilité sont importantes. Elles peuvent par exemple se traduire par un meilleur acheminement des produits pour l'industrie ou une augmentation de fréquentation pour les services. Pour l'industrie comme les services, les économies d'agglomération jouent un rôle significatif (Million, 2004).

Plusieurs bases de données ont été utilisées pour tenter de qualifier les établissements et le territoire de l'aire urbaine et rendre compte de ces différents facteurs explicatifs. Concernant les établissements, le fichier SIRENE de l'aire urbaine de Lyon de 1999 a servi de base de travail, complété par le Répertoire des Entreprises et des Etablissements (REE) pour disposer des établissements installés dans l'année en 1998, 1999 et 2000 (venant de l'aire urbaine ou de l'extérieur) pour évaluer les taux de transferts. Ce dernier fichier ne recense que les établissements de type Industrie, Commerce, Services, excluant ainsi les classes « Administration, associations » et « Agriculture ». Au final, pour travailler sur la mobilité et la localisation des établissements, une classification en 17 secteurs a été retenue, réalisée à partir de regroupements au sein des Nomenclatures économiques de synthèse (NES) en 16 et 36 secteurs de l'INSEE (cf. Tableau 6 en annexe). Elle a servi à caractériser les 100 506 établissements de l'aire urbaine de Lyon recensés dans le fichier SIRENE, et le REE a permis de déterminer le taux de transfert d'environ 80 000 d'entre eux. La taille des établissements a également été privilégiée comme variable explicative commune, et le découpage suivant a été retenu, en fonction du nombre d'effectifs salariés : 0 salarié, 1 à 9 salariés, 10 à 19, 20 à 49, 50 à 249, 250 à 499, 500 salariés et plus, même si cette dernière classe n'a pas servi dans les calages des modèles faute d'effectifs suffisants.

Des variables descriptives des territoires ont également été retenues et testées pour la modélisation des localisations. Les données

INSEE de population (RGP) et d'établissements (fichier SIRENE) ont servi de base pour qualifier chaque IRIS, et les temps d'accès entre zones calculés par DAVISUM dans SIMBAD ont complété ces premières informations en permettant d'estimer des indicateurs d'accessibilité plus complexes. Cette accessibilité, qui constitue l'élément pivot entre le modèle de transport et le modèle d'urbanisme, a été traduite sous diverses formes. Des accessibilités isochroniques ont été établies, avec un nombre d'opportunités (population, emplois, établissements, etc.) contenues dans un temps donné à partir de l'IRIS considéré. Des accessibilités gravitaires ont également été calculées, avec une forme simple de type :

$$AO_i = \sum_{j=1}^{777} O_j / tps_{ij}$$

avec : AO_i l'accessibilité à un type d'opportunités (population, emplois, etc.) de l'IRIS i ; O_j le nombre d'opportunités contenues dans l'IRIS j et tps_{ij} le temps d'accès entre les IRIS i et j .

L'accès au centre, indicateur plus simple du modèle monocentrique, a été estimé par le temps d'accès à la préfecture en heure de pointe (le temps d'accès en heure creuse et la distance ont également été testés, mais avec de moins bons résultats). Enfin, le prix de l'immobilier a été estimé à partir des données exhaustives fournies par l'Observatoire des transactions immobilières et foncières (OTIF) sur le territoire du Grand Lyon en 1999 et complétées par le fichier Marché immobilier des notaires (MIN) pour le reste de l'aire urbaine. Cette variable a fait par ailleurs l'objet du développement d'un module particulier (Nicolas *et al.*, 2009).

3.3.2. Des résultats de modélisation encourageants

Concernant les probabilités de transfert utilisées dans SIMBAD, seules les variables apparaissant les plus déterminantes dans la décision de mobilité ont finalement été retenues, à savoir le secteur d'activité et la taille de l'établissement. L'âge de l'établissement n'a pas été repris car une fois croisé avec les autres variables, son impact apparaît beaucoup moins important, même s'il reste significatif. La taille de l'entreprise à laquelle l'établissement appartient ne pouvait quant à elle pas être retenue, faute d'un effectif statistique suffisant. La mobilité est maximale pour les établissements appartenant au secteur des services aux entreprises et qui n'ont pas de salariés (8%). Globalement, quel que soit le secteur d'activité considéré, le taux de transfert diminue lorsque la taille de l'établissement augmente. Enfin, les probabilités des grands établissements de plus de 250 salariés n'ont pas pu être calculées car les effectifs concernés étaient trop faibles. Ils restent

donc immobiliers dans SIMBAD, sauf à être déplacés « manuellement » en cas de transfert anticipé par l'utilisateur.

Le type de modélisation adopté pour représenter la probabilité de choix d'un IRIS pour un établissement donné est le Logit multinomial proposé dans URBANSIM. L'information de base qui a été utilisée pour établir ces probabilités est le nombre d'établissements d'un type donné (secteur x taille) dans chaque IRIS de l'aire urbaine.

Cependant, avant de passer à cette modélisation, nous avons cherché à affiner les logiques de localisation liées aux économies d'agglomération en cherchant à voir quels types d'établissements s'attiraient ou se repoussaient entre eux. Ceci a permis de qualifier les IRIS de manière plus synthétique, en fonction des grands types d'activités qu'ils abritent ou qui se trouvent à proximité. Ainsi, une première matrice des corrélations a été construite pour observer les relations entre les nombres d'établissements de chaque secteur d'activité dans chaque IRIS. Elle donne ainsi une mesure de la proximité spatiale des établissements. Trois groupes ont été créés en associant les secteurs qui ont des corrélations proches. Un premier groupe reprend à peu de choses près les secteurs des services définis au sens large, correspondant aux commerces, à l'administration, aux activités financières et immobilières, aux services aux entreprises et aux particuliers, à l'éducation, à la santé et à l'action sociale. Un second groupe est composé des secteurs industriels, auxquels s'ajoutent les secteurs « commerces et réparation automobile » et « commerce de gros intermédiaire » qui n'ont pas la même logique de localisation que le secteur « commerce de détail » classé dans le groupe 1. S'y ajoutent également les secteurs de la « construction » et des « transports » qui apparaissent bien corrélés. Enfin, restent trois secteurs obéissant à des logiques indépendantes ; ils ont de faibles effectifs, sont plus concentrés et peu corrélés avec les autres secteurs : l'« énergie », l'« industrie automobile » et l'« agriculture ».

Plusieurs modèles de localisation des établissements ont dès lors pu être estimés. D'une part, l'effet du secteur d'activité sur la localisation des établissements a été exploré. L'effet taille a également été pris en compte, pour voir si la contrainte qu'elle impose aux grandes entreprises n'est pas plus importante que les caractéristiques sectorielles proprement dites. Par ailleurs, différents indicateurs d'accessibilité ont été testés, calculés en heures creuses et en heures de pointe. Au final, nous avons réalisé 17 modèles différents selon les secteurs d'activités pour les établissements de taille inférieure à 50 salariés. Deux modèles supplémentaires ont été créés pour les établissements entre 50 et 249 salariés et pour ceux de plus de 250 salariés.

Les résultats obtenus en distinguant les établissements selon leur secteur d'activité sont très satisfaisants. Outre les coefficients globaux exposés ci-dessous, les coefficients des variables finalement retenues varient de manière homogène entre les secteurs et dans le sens que laissait pressentir la revue bibliographique :

- Les résultats sont excellents pour les secteurs du groupe 1, avec des pseudo- R^2 de Mac Fadden variant entre 0,52 (administrations) et 0,64 (activités immobilières et financières). Seul le secteur des industries agricoles et alimentaires donne des résultats relativement moins bons (0,32). Ce secteur apparaissait déjà en frontière du groupe dans la matrice des corrélations initiale. Son interaction spatiale, relative mais réelle, avec le secteur agricole qui, lui, est resté très mal pris en compte, fournit une piste d'explication ;

- Les résultats sont corrects pour les secteurs du groupe 2, tournés vers les productions intermédiaires. Ainsi les pseudo- R^2 varient dans ce groupe entre 0,29 (construction) et 0,51 (commerce de gros intermédiaire) ;

- Les résultats apparaissent beaucoup plus différenciés pour les secteurs restants, qui sont très hétérogènes : corrects pour l'énergie (pseudo- R^2 de 0,36), juste passables pour l'industrie automobile (0,22). Ils sont mauvais pour le secteur agricole, que les variables retenues ne représentent pas du tout¹³ ;

- Le lien entre localisation et taille des établissements a également apporté des résultats très satisfaisants. Les pseudo- R^2 varient de 0,43 pour les plus petites sociétés sans aucun salarié, jusqu'à 0,59 pour les grandes entreprises de plus de 250 salariés. Cette progression de la qualité des pseudo- R^2 souligne la contrainte spatiale forte que connaissent les plus grands établissements pour lesquels le poids de la taille finit par l'emporter sur le poids du secteur dans les logiques de localisation.

3.4. Localiser les ménages

Cette partie fait largement référence à la thèse de M. Homocianu (2009)¹⁴. Elle se présente en trois temps avec tout d'abord une revue de la littérature (pour faire ressortir les principaux facteurs explicatifs des mobilités résidentielles), puis une présentation de la construction du modèle de déménagement, et enfin celle du modèle de localisation.

13. Soulignons qu'il n'est pas envisagé de faire déménager les entreprises de ce dernier secteur (4% des établissements, 1% des emplois sur l'aire urbaine) dans le cadre de SIMBAD.

14. La thèse a été réalisée sur ce thème dans le cadre de SIMBAD grâce à Convention industrielle de formation par la recherche (CIFRE), financée par l'Agence d'urbanisme de Lyon.

3.4.1. *Les facteurs explicatifs de la mobilité et de la localisation des ménages*

Deux principaux facteurs explicatifs de la localisation résidentielle ressortent de l'analyse bibliographique (Homocianu, 2009) : les déterminants liés au profil socio-économique du ménage et des individus qui le composent d'une part, les déterminants liés à l'environnement résidentiel du logement d'autre part. De manière classique dans l'approche économique, le niveau de vie des ménages est déterminant dans leurs choix en matière de localisation résidentielle. On peut évoquer dans ce sens les apports d'Alonso, Mills et Muth, qui soutiennent l'idée que l'offre et la demande sur le marché du logement expliquent la localisation des ménages aisés et des ménages pauvres dans des lieux différents, ou ceux de Tiebout, selon lequel le jeu d'attraction et de répulsion entre différentes catégories de ménages selon leur niveau de vie structure l'espace résidentiel. Plus récemment, d'autres auteurs (Mac Fadden, 1978 ; Anas, 1982) ont accordé une grande importance aux caractéristiques socio-économiques du quartier, en soulignant une interaction avec le revenu bien supérieure à l'accessibilité aux zones d'emploi. On peut également remarquer l'homogénéité des ménages au sein des quartiers, très visible dans les paysages urbains (Bouzouina, 2008).

Les extensions apportées au modèle standard de l'économie urbaine permettent de différencier finement les caractéristiques des ménages. Par exemple, un ménage de grande taille est plus susceptible de choisir une résidence en périphérie, afin de bénéficier d'une plus grande superficie à moindre coût qu'un ménage plus petit (Debrand et Taffin, 2005). Par ailleurs, on peut constater que plus la taille du ménage est élevée, plus celui-ci a tendance à se stabiliser – le coût de sa mobilité s'élève. De même, les événements du cycle de vie des ménages influent tout à la fois sur la décision de déménager et sur le choix de la localisation ou du type de bien (logement) acheté, en fonction des impératifs comme la naissance des enfants ou la retraite (Rogers, 1988 ; Rérat, 2005). Enfin, d'autres recherches suggèrent l'existence d'une asymétrie importante entre les locataires et les propriétaires en termes de décisions de localisation résidentielle, ce qui semble logique dans la mesure où le statut d'occupation du logement est corrélé avec des variables comme le revenu du ménage ou l'âge de la personne de référence (Elder et Zumpano, 1991).

Les autres déterminants de la localisation concernent le logement lui-même, avec ses caractéristiques intrinsèques, mais aussi les aménités liées à son environnement et son accessibilité aux fonctions urbaines, comme avait pu le représenter K.J. Lancaster (1966) dans sa

nouvelle théorie du consommateur. Lorsqu'un ménage choisit un logement, il tient compte de multiples variables structurelles, quantitatives comme la superficie ou le nombre de pièces de la résidence, ou qualitatives comme le type (maison, appartement), l'âge de l'immeuble ou le niveau d'équipement. Le choix de la localisation résidentielle est également lié à la qualité de l'environnement social, économique et physique de la zone de résidence. Si l'on cherche à prendre en compte l'influence des aménités sur la ségrégation résidentielle, on peut montrer que les ménages aisés donnent une plus grande importance à la présence d'aménités que les ménages disposant d'un revenu plus faible (Bouzouina, 2008). Le choix de la localisation des ménages dépend aussi de leurs préférences concernant le cadre de vie du quartier, traduit en termes de présence d'espaces verts et de loisir, de niveau de pollution de l'air, etc. M. Thériault (2002) ou Y. Kestens (2004) ont ainsi mis en évidence la relation positive qui existe entre la présence de la végétation et la valeur des propriétés. On peut aussi noter qu'en retour, ces choix individuels affectent la qualité de leur environnement. En effet, les caractéristiques socio-économiques des quartiers influencent les chances d'accès à l'emploi de leurs habitants, de même qu'elles conditionnent d'autres décisions prises par les ménages et influencent ainsi la formation du capital humain (Ross, 2001).

Enfin, les choix de localisation des ménages, mais aussi la valeur des logements, dépendent de leur proximité aux différentes activités et services de la ville. La présence à proximité d'activités économiques, d'établissements d'enseignement ou commerciaux, l'accessibilité au centre et aux grandes infrastructures de transport, le niveau de la densité de la population, sont des facteurs qui jouent sur la décision des ménages de se localiser dans une zone.

3.4.2. *Déménager ou pas ? : un modèle Logit binomial de mobilité résidentielle*

Les données désagrégées au niveau du ménage de l'Enquête Logement 2002 ont servi à caler le modèle. En isolant les ménages de l'aire urbaine de Lyon au sein de cette base, on a estimé les coefficients de chacune des variables de la fonction d'utilité, permettant de calculer les probabilités de déménager des différents types de ménages. Sans surprise par rapport à la littérature, trois principaux facteurs ressortent de l'analyse des données et ont finalement été retenus dans le modèle : (i) le statut d'occupation du logement, (ii) la taille du ménage (prise ici à travers le nombre d'enfants du ménage) et (iii) la position dans le cycle de vie (représentée ici par l'âge du chef de ménage), sachant que

Figure 5

Localisation de la population dans l'aire urbaine de Lyon en 1999

		EGIS RAIL (TERESE)		SIMBAD (DAVISUM)	
		charge	%	charge	%
Nombre de déplacements	Matrice	217 296		217 296	
	Affecté	209 951		217 296	
Répartition modale	Bus	121 651	39,0	130 408	40,0
	Funiculaire	3 150	1,0	4 040	1,2
	Métro	155 369	49,4	157 670	48,4
	Tramway	34 582	11,0	33 676	10,3
	Total	314 752	100,0	325 794	100,0
Charges des principales lignes de transports collectifs	T1	17 750	4,25	15 298	4,70
	T2	16 832	5,35	18 378	5,64
	A	57 737	18,34	56 604	17,37
	B	28 839	9,16	34 238	10,51
	C	8 356	2,65	10 018	3,07
	D	60 437	19,20	56 810	17,44

Traitement : LET ; Sources : RGP INSEE 1999

même à statut d'occupation équivalent et à nombre d'enfants donné, cette variable restait significative pour le modèle.

La mise en correspondance entre ce qui est observé et les prédictions du modèle montre que le pourcentage de ménages dont le choix a été correctement prévu est de 87 %. La part des ménages restant sur place d'une année sur l'autre étant de 88,6 %, ce premier résultat reste cependant limité. Il est plus intéressant de noter que la prévision du modèle est correcte pour 41,2 % des ménages changeant de résidence dans l'année alors qu'ils ne sont que 11,4 % à déménager, en moyenne globale. Ce sont des changements d'états qui sont principalement la cause d'un déménagement (changement d'emploi, naissance d'un enfant, mise en couple, etc.). Les variables explicatives utilisées dans SIMBAD sont statiques et apparaissent plus indicatives de la probabilité d'un changement d'état que du changement lui-même. Les résultats révèlent donc une bonne prise en compte de la structure des variables explicatives sous-jacentes à la décision de mobilité résidentielle des ménages. Pour les améliorer, il serait nécessaire de dynamiser l'approche avec, par exemple, un module de suivi démographique pour représenter le cycle de vie de chaque ménage et les événements qui ponctuent son histoire.

3.4.3. Où se localiser ? Un fort impact des variables d'accessibilité

Pour caler le modèle de localisation, les données du RGP 1999 ont été utilisées, à savoir une population exhaustive des ménages de l'aire urbaine de Lyon, dont on connaît la localisation au niveau de l'IRIS (Figure 5). Le modèle est construit uniquement à partir des ménages

ayant déménagé dans l'aire urbaine de Lyon l'année précédent le recensement de 1999, soit 91 461 ménages sur les 662 249 de l'aire urbaine à l'époque.

Les variables qui ont pu être fournies par l'INSEE sont :

- l'IRIS de résidence au moment du recensement ;
- le déménagement l'année précédent le recensement (oui/non) ;
- l'âge de la personne de référence (moins de 30 ans ; 30-44 ans ; 45-59 ans ; 60-74 ans ; 75 ans et plus) ;
- le statut du chef de ménage (travailleur à temps plein ; travailleur à temps partiel ; chômeur ; retraité ; autres inactifs – étudiants et personnes au foyer notamment) ;
- le nombre de personnes du ménage (0, 1, 2, 3, 4, 5 ou plus) ;
- le nombre d'actifs dans le ménage (0, 1, 2 ou plus) ;
- le statut d'occupation du logement (propriétaire ou locataire) ;
- le nombre de voitures à disposition du ménage (0, 1, 2 ou plus).

Par ailleurs, un revenu par unité de consommation a été estimé, exprimé en trois classes distinguant les 20 % des ménages aux plus bas revenus, les 60 % médians et les 20 % les plus aisés (cf. point 2.2.1). Les variables descriptives des IRIS sont les mêmes que celles utilisées dans le modèle de localisation des établissements, avec une caractérisation de la proximité de la population, des emplois et des réseaux de transports, ainsi que le temps d'accès au centre et le prix de l'immobilier. Les variables caractéristiques des ménages sont ensuite introduites dans le modèle en construisant des effets croisés avec des caractéristiques des IRIS. Par exemple, les variables de profil du ménage comme l'âge de la personne de référence ou le revenu sont croisées avec des variables indiquant le pourcentage des ménages du même type dans l'IRIS concerné, afin d'évaluer le degré de mixité sociale ou, au contraire, de ségrégation dans le territoire de l'aire urbaine.

Dans le premier modèle retenu, tous les coefficients sont significatifs et le pseudo- R^2 de McFadden est de 0,40, ce qui indique un pouvoir explicatif important des variables introduites. Les coefficients correspondants aux termes d'interaction entre les caractéristiques des ménages (âge de la personne de référence, revenu et nombre de personnes) et les pourcentages des ménages ayant les mêmes caractéristiques dans l'IRIS choisi montrent que, en général, les ménages ont tendance à se localiser dans une zone où il y a plus de ménages du même profil. Les ménages à bas revenu et les ménages de taille élevée (avec des coefficients négatifs) font exception. Ils se localisent plutôt dans des zones où il y a moins de ménages résidents ayant le même niveau de revenu et respectivement de taille (en fait, il s'agit de ménages dont le niveau de vie est plutôt réduit, et il n'y a aucun intérêt pour ces ménages à

s'installer dans des zones où habitent majoritairement des ménages ayant le même profil). Le signe du coefficient du prix immobilier au m² (apparemment contre-intuitif, et par ailleurs très faible) traduit une relation positive entre le niveau de cette variable et la probabilité d'un ménage de se localiser dans une zone caractérisée par ce niveau du prix. L'explication peut résider dans le fait que le prix capitalise les externalités de la zone, qui peuvent être déterminées par des caractéristiques non introduites dans le modèle. Nous trouvons ici un résultat similaire à celui du projet SIMAURIF (Chapitre 3), qui a également estimé un coefficient positif pour le prix immobilier dans son modèle de localisation des ménages (De Palma, 2005).

Par rapport aux variables d'accessibilité, le fait que tous les coefficients soient significatifs montre que cette composante joue un rôle important dans les décisions de localisation résidentielle des ménages, et confirme l'hypothèse de l'existence d'un impact des transports sur l'urbanisation. Le signe positif des coefficients pour les variables accessibilité gravitaire aux emplois, accessibilité gravitaire aux établissements secondaires, accessibilité gravitaire aux grands commerces, nombre d'échangeurs accessibles en moins de 15 minutes et nombre de stations de métro à moins de 1000 m exprime le fait que l'utilité pour les ménages de se localiser dans un IRIS augmente quand l'accessibilité correspondant à ces opportunités est élevée. Les signes des coefficients pour les autres variables d'accessibilité sont à prendre avec précaution, car les corrélations qui existent entre les variables explicatives d'accessibilité rendent difficile leur interprétation.

Pour traiter les problèmes de corrélation entre les variables d'accessibilité, nous avons synthétisé l'information en construisant un indicateur d'accessibilité agrégé. Une Analyse en composantes principales (ACP) a fourni un premier axe qui reprend presque toute l'information des neuf variables initiales avec 85 % de la variance globale expliquée. L'indicateur synthétique ainsi obtenu a été calculé pour chaque zone et le modèle a été réestimé en ne conservant que les variables dont la significativité (p-value) est supérieure à 5 %. L'introduction dans le modèle de l'indicateur synthétique d'accessibilité à la place des variables considérées antérieurement entraîne une légère baisse du pseudo-R², qui est maintenant de 0,33. On voit alors apparaître clairement la relation positive entre l'accessibilité globale d'une zone et l'utilité retirée par les ménages de se localiser dans cette zone. Les autres constats restent les mêmes que dans le cas précédent (Figure 6).

Figure 6
**Coefficients estimés du modèle de choix de localisation résidentielle
à la cellule**

Variable	Coefficient	t de Student	p-value
Indicateur d'accessibilité agrégé	0,98	141,3	<10 ⁻³
Prix moyen de l'immobilier collectif ancien (m ²)	7 10 ⁻⁴	31,1	<10 ⁻³
Age de la personne de référence <30ans x taux de ménages à p.r.<30 ans dans l'IRIS ^(a)	6,28	37,0	<10 ⁻³
Age de la personne de référence 30-45 ans x taux de ménages à p.r. de 30-45 dans l'IRIS ^(a)	1,33	15,5	<10 ⁻³
Age de la personne de référence >75ans x taux de ménages à p.r.>75 dans l'IRIS ^(a)	3,45	5,0	<10 ⁻³
Ménage à bas revenu x taux de ménages à bas revenu dans l'IRIS ^(a)	-2,863	-16,0	<10 ⁻³
Ménage à haut revenu x taux de ménages à haut revenu dans l'IRIS ^(a)	5,19	26,6	<10 ⁻³
Ménage de 1 personne x taux de ménages de 1 personne dans l'IRIS ^(a)	2,85	32,2	<10 ⁻³
Ménage de 2 personnes x taux de ménages de 2 personnes dans l'IRIS ^(a)	6,71	23,6	<10 ⁻³
Ménage de 5 personnes et plus x taux de ménages de 5 personnes et plus dans l'IRIS ^(a)	-7,24	-15,9	<10 ⁻³

Source : Homocianu, 2009

CONCLUSION ET PROLONGEMENTS : RENFORCER L'ANALYSE DES DYNAMIQUES TEMPORELLES

La plate-forme SIMBAD est aujourd'hui constituée, et chacun de ses modules fournit des résultats satisfaisants. Il reste néanmoins à stabiliser l'ensemble en recalculant les coefficients de chaque module à partir des sorties du module précédent et en s'assurant que les résultats obtenus restent bien fidèles aux données initiales. Par exemple, les matrices OD étant modifiées, les indicateurs d'accessibilité évoluent et la modélisation des localisations doit être corrigée. Ce travail est en cours d'achèvement. Mais l'enseignement principal que nous tirons de cette première phase du projet est l'importance de la prise en compte des évolutions à long terme si l'on veut bénéficier correctement des avantages d'une intégration des interactions avec l'urbanisme dans les modèles de transport. Ainsi, trois grandes tendances de fond manquent encore à l'appel :

- Tout d'abord, l'évolution des comportements de mobilités peut rendre inopérant une modélisation appliquée sur 25 ou 30 ans. Cette question fait l'objet d'une thèse en cours¹⁵ (J. Cabrera). Le parti pris méthodologique de codification des réseaux, présenté dans la partie 2

15. financée par la Région Rhône Alpes et soutenue par le PREDIT 3.

de ce chapitre, est facilement reproductible et a permis de construire les réseaux des transports routiers et collectifs aux dates des dernières enquêtes ménages déplacements de l'agglomération lyonnaise (2006, 1995, 1986). Les différentes étapes du modèle de transport peuvent ainsi être calées à chacune de ces dates. Nous pourrions ainsi tester l'incidence des évolutions socio-démographiques, spatiales (périurbanisation) et économiques (taux de motorisation), tout en identifiant la part des évolutions comportementales « non expliquées ». Nous proposons d'utiliser pour cela la méthode de décomposition des effets, développée dans le cadre d'une précédente recherche PREDIT (Bonnel, 2000 ; Bonnel *et al.*, 2003). L'objectif est ensuite de proposer des lois d'évolution des coefficients de calage afin de traduire les évolutions comportementales, même si nous sommes conscients que trois points d'observation ne permettront pas une analyse très fine ;

– Une critique similaire peut être adressée aux modèles de localisation des ménages et des établissements. Même si le premier travail réalisé dans le cadre de SIMBAD a fourni de bons résultats, il est resté statique, et ne suffit pas pour prendre en compte les évolutions comportementales susceptibles d'apparaître sur le long terme. Nous proposons donc d'établir une rétrospective des localisations à partir des données INSEE des recensements de la population et des fichiers SIRENE de 1982, 1990, 1999 et 2005. De la même manière que pour le modèle transport, l'évolution des comportements sera analysée à travers les évolutions des coefficients de calage des modèles ;

– Enfin, la prise en compte de l'évolution de l'usage des sols, normalement réalisée dans les modèles transport-urbanisme, n'est pas encore établie dans SIMBAD. En effet, le module proposé dans URBANSIM pour traiter cette question a été conçu à partir des statistiques utilisées aux Etats-Unis, et il nous est apparu peu adapté aux données disponibles en France, où le niveau de finesse spatiale et l'historique sont moindres. Il reste donc à réaliser un travail exploratoire puis à développer un modèle de développement urbain qui rende compte de manière correcte des évolutions de l'usage des sols sur l'aire urbaine de Lyon, en intégrant l'impact des réseaux, notamment du réseau routier.

Nous préférons donc attendre l'achèvement de la seconde phase du projet pour réaliser des exercices prospectifs et des simulations de l'impact de politiques de transport et d'urbanisme sur le système de déplacements lyonnais. Celle-ci a démarré fin 2009 et s'étalera sur trois ans, en partenariat avec les mêmes acteurs que l'ors de la première phase, à savoir le LET, l'Agence d'Urbanisme de Lyon, la DRI et l'ADEME, ainsi qu'avec une contribution significative de la Région

Rhône Alpes à travers son « Cluster Transport » et ses financements doctoraux.

Références bibliographiques

- Aguilera-Belanger A., Mignot D., Bloy D., Buisson M.A., Cusset J.M., 1999, *Localisation des activités et mobilités*, Rapport de recherche, DRAST, 330 p.
- Anas A., 1982, *Residential location markets and urban transportation*, Academic Press.
- Anas A., 1983, Discrete choice theory, information theory and the multinomial Logit and gravity models, *Transportation Research B*, 17, pp. 13-23.
- Anas A., 1994, *METROSIM : a unified economic model of transportation and land-use*, Research report, Alex Anas & Associates.
- Bagard V., Château B., Crozet Y., Lopez-Ruiz H.G., 2008, *Comment satisfaire les objectifs internationaux de la France en termes d'émissions de gaz à effet de serre et de pollution transfrontières ?*, Rapport de recherche, PREDIT, 238 p.
- Battu C., Vialette P., 2005, 16 700 salariés concernés tous les ans par un transfert dans la région urbaine de Lyon, *INSEE Rhône-Alpes – La Lettre Analyses*, 35, 4 p.
- Ben-Akiva M., Lerman S., 1985, *Discrete Choice Analysis, Theory and Application to Travel Demand*, MIT Press.
- Bonnafous A., 1989, *Le siècle des ténèbres de l'économie*, Economica, 184 p.
- Bonnafous A., 2000, Les marchandises en ville : le problème méthodologique de l'appréhension statistique. In : Patier, D. (ed.), 2000, *L'intégration des marchandises dans le système des déplacements urbains*, Études et Recherches, 15, Actes des 13^e Entretiens Jacques Cartier, Montréal, Canada, pp. 85-92.
- Bonnafous A., Masson S., 2003, Evaluation des politiques de transport et équité spatiale, *Revue d'Economie Régionale et Urbaine*, 4, pp. 547-572.
- Bonnafous, A., Puel H., 1983, *Physionomies de la ville*, Les Editions ouvrières, 165 p.
- Bonnel P., 2003, Estimation of aggregated modal split model, *European Transport Conference*, Strasbourg, France, 20 p.
- Bonnel P. (ed.), Cabanne I., Massot M-H., 2003, *Evolution de l'usage des transports collectifs et politiques de déplacements urbains*, La Documentation Française, 81 p.
- Bonnel P. 2004, *Prévoir la demande de transport*, Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, 425 p.
- Bouzouina L., 2008, *Ségrégation spatiale et dynamiques métropolitaines*, Thèse de doctorat de sciences économiques, Université de Lyon, 323 p.
- Cabanne I., Durand S., Hennebelle P.-Y., Masson S., Routhier J.-L., Saliou E., 2000, *Télescope : Modèle de simulation des trafics de marchandises et de personnes locaux et interurbains dans un espace région-ville*, Rapport de recherche, ADEME – PREDIT, 171 p.
- Caubel D., 2006. *Politique de transports et accès à la ville pour tous ? Une méthode d'évaluation appliquée à l'agglomération lyonnaise*, Thèse de doctorat en sciences économiques, Université de Lyon, 444 p.
- Center of Urban Simulation and Policy Analysis, 2009, *The Open Platform for Urban Simulation and URBANSIM Version 4.2.2. Reference Manual and Users Guide*. University of Washington, Evans School of Public Affairs. Lien

- internet consulté en décembre 2009 : <http://www.urbansim.org/opus/releases/latest-stable-release/docs/opus-userguide.pdf>
- CERTU, 2005, *Etablir un compte déplacement à l'échelle locale*, CERTU, 128 p.
- CERTU, 2009, *Les derniers chiffres de la mobilité à jour des EMD 2007*, Lien internet consulté en décembre 2009 : http://www.certu.fr/fr/_Mobilité_et_déplacements-n25/Connaissance_de_la_mobilité-n41/Données_de_la_mobilité-n43/IMG/pdf/Tabl_Mob_SiteCertu_AVRIL08.pdf
- Costanza R., Cumberland J., Daly H., Goodland R., Norgaard R., 1997, *An introduction to Ecological Economics*, St. Lucie Press, 275 p.
- Crozet Y., Massot M.H., Orfeuil J.P. et le « Groupe de Batz », 2001, Mobilité urbaine : cinq scénarios pour un débat, DRAST, *Notes du CPVS* n° 16.
- De la Barra T., Perez B., Vera N., 1984, Tranus-J : Putting large models into small computers, *Environment and Planning B*, 11, pp. 87-101.
- De Palma A., Nguyen-Luong D., Motamedi K., Moyano J., 2004, *SIMAUURIF : Modèle dynamique de SIMulation de l'interAction Urbanisation-transports en Région Ile-de-France. Application à la Tangentielle nord*, Rapport de recherche, PREDIT, 148 p.
- De Palma A., Nguyen-Luong D., Motamedi K., Picard N., Moyano J., Waddell P., Chauchard-Lefèvre F., Ouaras H., 2005, *SIMAUURIF : Modèle dynamique de SIMulation de l'interAction Urbanisation-transports en Région Ile-de-France. Application à la Tangentielle nord*, Rapport de recherche, PREDIT., 124 p.
- Debrand T., Taffin C., 2005, Les facteurs structurels et conjoncturels de la mobilité résidentielle depuis 20 ans, *Economie et Statistique*, 381-382, pp. 125-146.
- Delisle J.-P., Laine F., 1998, Les transferts d'établissements contribuent au desserrement urbain, *Economie et Statistique*, 311, pp. 91-106.
- DMBR, 2009, *UK Highways Agency's Design Manual for Roads & Bridges*, Lien consulté en décembre 2009 : <http://www.standardsforhighways.co.uk/dmrb/index.htm>.
- Domencich T. A., McFadden D., 1975, *Urban travel demand : a behavioural analysis*, Elsevier.
- Dupont G., Hagnere C., Touze V., 2003, *Les modèles de micro-simulation dynamique dans l'analyse des réformes de systèmes de retraites : une tentative de bilan*, Document de l'OFCE.
- Echenique M.H., Flowerdew A.D.J., Hunt J.D., Mayo T.R., Skidmore I.J., Simmonds D.C., 1990, The MEPLAN models of Bilbao, Leeds and Dortmund, *Transport Review*, 10, pp. 309-322.
- Elder H.W., Zumpano L.V., 1991, Tenure choice, housing demand and residential location, *The Journal of Real Estate Research*, 6, 3, pp. 341-356.
- Fischer A., 1994, *Industrie et espace géographique : introduction à la géographie industrielle*, Masson. 137 p.
- Fujita M., Thisse J-F., 2003, *Économie des villes et de la localisation*, De Boeck, 560 p.
- GESMAD, 2000, *Evaluation des modèles de prévision de trafic*, Rapport de recherche, PREDIT, 125 p.
- Geurs K. T., Van Eck R., 2001, *Accessibility measures : review and applications. Evaluation of accessibility impacts of land-use transport scenarios, and related social and economic impacts*. Bilthoven, Rapport RIVM, 265 p.
- Giorgi L., 2003, Mobilités durables, *Revue internationale des sciences sociales*, 176, 403 p.

- Gitton F., 2006, *Comportements de mobilité et simulation de déplacements sur l'agglomération lyonnaise*, Rapport de stage, ENSAE, 79 p.
- Godet M., 2004, *Manuel de prospective stratégique*, Dunod.
- Gudmunsson H., Hojer M., 1996, Sustainable development principles and their implications for transport, *Ecological Economics*, 19, pp. 269-282.
- Hansen W. G., 1959, How accessibility shapes land-use, *Journal of the American Institute of Planners*, 25, pp. 73-76
- Hardi P., Muyata P., 2000, *Examen des cadres choisis pour les indicateurs de développement durable*, Institut International du Développement Durable, Ottawa, 62 p.
- Hatem F., 1993, *La prospective. Pratiques et méthodes*, Economica.
- Homocianu M., 2009, *Modélisation de l'interaction transport-urbanisme. Choix résidentiels des ménages dans l'aire urbaine de Lyon*, Thèse de doctorat en sciences économiques, Université de Lyon.
- Hunt J-D., Kriger D-S., Miller E-J., 2005, Current operational urban land-use-transport modeling frameworks : a review, *Transport Reviews*, 25, 3, pp. 329-376.
- Hyman G. M., 1969, The calibration of trip distribution models, *Environment and Planning*, 1, pp. 105-112.
- Joumard R., Nicolas J.P., 2010, Transport project assessment methodology within the framework of sustainable development, *Ecological Indicators*, 10, 2010, pp. 136-142.
- Jourdan N., 2004, Les transferts interrégionaux d'établissements : Forte progression entre 1996 et 2001, *Insee Première*, 949, 4 p.
- Kestens Y., 2004, *Utilisation du sol, accessibilité et profil des ménages : effet sur le choix résidentiel et la valeur des propriétés*, Thèse de doctorat en aménagement du territoire et développement régional, Université de Laval.
- Krivobokov M., Marchal F., Nicolas J.-P., Zuccarello P., 2008, The Lyon Experience with URBANSIM, *European URBANSIM User Group meeting*, Swiss Federal Institute of Technology, Zurich, 17-18 March 2008.
- Lancaster K.J., 1966, A new approach to consumer theory, *The Journal of Political Economy*, 54, 2, pp. 132-157.
- Lichere V., Godinot C., Masson S., Raux C., 1997, *Développement d'un modèle stratégique de simulation des déplacements. Tome 1 : Présentation générale. Tome 2 : Vingt ans de rétrospective à travers les enquêtes-déplacements de l'agglomération lyonnaise (1976 – 1986 – 1995)*, Rapport de recherche, PRE-DIT, 181 p.
- Martinez F.J., Donoso P.P., 1995, MUSSA model : the theoretical framework. In : Hensher D.A., King J., (eds.), 1995, *Proceedings of the 7th World Conference on Transportation Research*, 2, Pergamon.
- Masson S., 2000, *Les interactions entre système de transport et système de localisation en milieu urbain et leur modélisation*, Thèse de doctorat en sciences économiques, Université de Lyon, 570p.
- McFadden D., 1978, Modelling the choice of residential location. In : Karlqvist A, Lundqvist L, Snickars F, Weibull J (ed.), 1978, *Spatial Interaction Theory and Planning Models*, North Holland, Amsterdam, pp. 75-96.
- Merenne-Schoumaker B., 1991, *La localisation des industries : mutations récentes et méthodes d'analyse*, Nathan, 192 p.
- Merenne-Schoumaker B., 2003, *Géographie des services et des commerces*, Presses Universitaires de Rennes. 239 p.

- Nguyen-Luong D., Motamedi K., Ouaras H., Picard N., Fernandes M., 2007, *SIMAUURIF : Modèle dynamique de SIMulation de l'interAction Urbanisation-transports en Région Ile-de-France*, Rapport de recherche, PREDIT, 142 p.
- Nicolas J.P. (dir.), Bonnel P. (dir.), Routhier J.L., Cabrera J., Zuccarello P., Godinot C., Toilier F., Homocianu M., 2009, *Simuler les MoBilités pour une Agglomération Durable*, Rapport de recherche, ADEME – DRAST.
- Nicolas J.P., Homocianu, M., Marchal F., Routhier J.L., 2006, *L'architecture du modèle au sein du projet SIMBAD*, Rapport de recherche, ADEME – DRAST, 36 p.
- Nicolas J.P., Deymier G., 2005, *Modèles d'interaction entre transport et urbanisme : état de l'art et choix du modèle pour le projet SIMBAD*, Rapport de recherche, ADEME – DRAST, 47 p.
- Nicolas J.P., Morice N., 2006, *Scénarios prospectifs pour le projet SIMBAD*, Rapport de recherche, ADEME – DRAST, 92 p.
- Ortuzar J. de D., Willmussen L. G., 2001, *Modelling transport*. UK, Third edition, John Wiley & Sons.
- Patier D., Routhier J.L., 2000, *Transport de marchandises en ville : Enquêtes quantitatives réalisées à Dijon et Marseille*, Rapport de recherche, MELT-DRAST, 2 x 120 p.
- Patier D., Routhier J.L., Ambrosini C., Durand S., Bossin P., Gelas P., Le Nir M., 1997, *Transport de marchandises en ville : Enquête quantitative réalisée à Bordeaux*, Rapport de recherche, MELT-DRAST, 230 p.
- Pezzey J., Toman M. 2002, *The economics of sustainability : a review of journal articles*. Washington, Resources for the future, 31 p.
- Plassard F., 2003, *Rétrospective de la prospective – Prospective dans le domaine des transports – Recherche critique*, Rapport de recherche, PREDIT.
- Ponsard C., 1988. *Analyse économique spatiale*, Presses universitaires de France, 452 p.
- Putman, S. H., 1995, EMPAL and DRAM Location and land use models : a technical overview, *Land use modeling Conference Proceedings*, Dallas, Texas.
- Raux C., Lichere V., Masson S., 1998, *Modèle stratégique de déplacements de l'agglomération lyonnaise, tests de sensibilité, erreurs et incertitudes liées à la prévision*, Rapport de recherche, Région Rhône-Alpes, 64 p.
- Raux C., Mercier A., Ovtracht N., 2008, Evaluation économique des politiques de transport et indicateurs d'accessibilité spatiale : l'apport des SIG, *Cybergeo : European journal of geography*, 435. 17 p.
- Rerat P., 2005, Age et mobilité résidentielle dans les villes suisses, *XLIIe colloque ASRDLF, Villes et territoires face aux défis de la mondialisation*, Dijon, France.
- Rogers A., 1988, Age patterns of elderly migration : an international comparison, *Demography*, 25(3), pp. 355-370.
- Ross S.L., 2001, Employment access, neighborhood quality, and residential location choice, *International Seminar on Segregation in the City*, Lincoln Institute of Land Policy.
- Routhier J.L., Segalou E., Durand S., Alligier L., Toilier F., 2001, *Mesurer l'impact du transport de marchandises en ville – le modèle de simulation FRETURB (version 1)*, Rapport de recherche, ADEME – DRAST, 103 p.
- SEMALY, 2000, *TERESE, modèle d'affectation de voyageurs dans les études de transport collectif*, Université Lumière Lyon 2 et l'ENTPE, document pédagogique, cours analyse et prévision de la demande de transport du DESS Transports Urbains et Régionaux de Personnes.

- Simmonds D., Echenique M., Bates J., Oosterhaven J., 1999, *Review of land-use/transport interaction models*, Reports to The Standing Advisory Committee on Trunk Road Assessment, Department of the Environment, Transport and the Regions, London, UK.
- Therriault M., 2002, *Modélisation des choix de localisation et des valeurs résidentielles dans la région de Québec : Apports combinés de la géomatique et de la statistique pour analyser et modéliser les dynamiques urbaines*, Université Laval, Québec.
- Theys J., 2000, Développement durable, villes et territoires, Innover et décroïsonner pour anticiper les ruptures, DRAST, *Note du CPVS*, 13, 135 p.
- Toillier F., Alligier L., Patier D., Routhier J.L., 2005, *Vers un modèle global de simulation de la logistique urbaine : FRETURB, version 2*, Rapport de recherche, DRAST, 109 p.
- Verry D., Nicolas J.P., 2005, *Indicateurs de mobilité durable : de l'état de l'art à la définition des indicateurs dans le projet SIMBAD*, Rapport de recherche, ADEME-DRAST, 96 p.
- Vivien F.D., 2005, *Le développement soutenable*, La Découverte, 128 p.
- Waddell P., 2001, URBANSIM : Modeling Urban Development for Land-Use, *Transportation and Environmental Planning*, 68, 3, pp. 297-314.
- Waddell P., 2002, URBANSIM : Modeling Urban Development for Land Use, Transportation and Environmental Planning, *Journal of the American Planning Association*, 68, 3, pp. 297-314.
- Waddell P., Borning A., Noth M., Freier N., Becke M., Ulfarsson G., 2003, *Microsimulation of Urban Development and Location Choices : Design and Implementation of URBANSIM*. Washington, Université de Washington Seattle, Networks and Spatial Economics, Vol. 3, No. 1, pp. 43-67. Lien internet valide en décembre 2009 : http://www.urbansim.org/papers/UrbanSim_NSE_Paper.pdf
- Wannel T., Gravel M., 2002, *Expérience en gestion et diversité dans une organisation qui vieillit : une analyse de micro-simulation*, Statistiques Canada, Document de recherche.
- Wegener M., 2000, Land-use transport interaction : state of the art : what can we learn from North America ?, *STELLA Genesis Kick-off meeting*, 21 p.
- Wegener M., Fürst F., 1999, *Land use transport interaction : state of the art*, TRANSLAND, IRPUD Report, 119 p.
- Zuindeau B., 2006, Spatial approach to sustainable development : challenges of equity and efficacy, *Regional Studies*, 40(5), pp. 459-470.

CHAPITRE 5

PIRANDELLO® : UN MODÈLE D'ÉQUILIBRE URBAIN

Vincent Piron⁽¹⁾ et Jean Delons⁽²⁾

⁽¹⁾VINCI Concessions, ⁽²⁾COFIROUTE
jean.delons@cofirote.fr

En France, dans le monde des transports et de l'urbanisme, la Déclaration d'utilité publique (DUP) a représenté pendant longtemps un des temps forts du développement de projet. Pour l'obtenir, il « suffisait » de montrer que l'ensemble des avantages (supposés pour l'essentiel être des gains de temps dans le cas des infrastructures) liés à la réalisation du projet était supérieur à l'ensemble des coûts d'investissement. Cette logique de « critère économique unique (et monétaire) », qui permet de hiérarchiser les projets entre eux, a sous-tendu de nombreuses réalisations importantes, et notamment le développement efficace du réseau autoroutier inter-urbain. Mais elle apparaît aujourd'hui insuffisante pour permettre le développement des projets urbains (de transport et d'urbanisme) pourtant nécessaires au développement des grandes agglomérations, au maintien de la qualité de vie des résidents et de l'efficacité des emplois.

Car même si la DUP représente encore aujourd'hui le cadre juridique prévalent, il faut reconnaître qu'elle ne correspond plus à l'attente des décideurs politiques et des associations de défense : depuis quelques années s'est en effet imposée, dans le développement des projets urbains, une logique « gagnant/gagnant », suivant laquelle il n'est plus suffisant de montrer que le projet ou l'aménagement génère un certain bien-être (un « surplus » dans le vocabulaire économique) ; il faut maintenant être beaucoup plus explicite, et décrire comment ce bien-être est distribué dans la société (entre les riverains et les usagers de la voirie, entre les riches et les pauvres, etc.), dans le temps (demain, mais aussi pour les générations futures, etc.) et dans l'espace (dans la zone étudiée, mais pas seulement).

En d'autres termes, en milieu urbain, il n'y a plus de « projet local », et chaque aménagement doit être envisagé par l'ensemble de ses

conséquences sur la vie quotidienne des habitants et sur l'environnement, avec, comme conséquence, le fait de devoir montrer qu'il n'y a pas de perdant : les associations de défense ont aujourd'hui très bien compris ce mécanisme et tout le parti qu'elles pouvaient tirer de l'absence d'études adéquates et partagées pour bloquer l'avancement des projets. Pour reprendre les termes de la théorie des jeux, on est donc passé d'un critère « en espérance » limité à la sphère économique à un critère de type « max-min » englobant l'aspect environnemental. Ce changement profond de paradigme a naturellement une contrepartie, celle de nécessiter de nouveaux outils d'analyse et de modélisation, capables de prolonger les analyses habituelles à de nouvelles dimensions : l'urbanisme et l'environnement. C'est l'objectif essentiel du « modèle d'équilibre général urbain » PIRANDELLO®¹ (Programme Interdisciplinaire de Recherche et d'Analyse Numérique sur les DETERminants de La LOCALisation) qui propose une anticipation de la modification de la ville induite par ces projets d'infrastructures ou d'urbanisme.

Le contexte de quasi absence de projet réalisé dans lequel le modèle Pirandello® a été développé² a conduit à donner à ce modèle une vocation clairement opérationnelle : il est « volontairement le plus simple possible », de manière à être « utilisable et compréhensible » tant par le secteur public que par l'ensemble des forces économiques du secteur privé, tout en conservant une rigueur scientifique indispensable³.

Ce parti pris de simplicité est un point très important de la démarche qui a abouti au modèle PIRANDELLO®, et qui le place à part dans la famille des modèles LUTI (*Land-Use and Transport Integrated*). En effet, classiquement, les modèles qui cherchent à modéliser simultanément les transports et l'urbanisme sont de type « dynamique », c'est-à-dire qu'ils s'intéressent à l'évolution dans le temps de ces

1. Le modèle PIRANDELLO® est déposé par VINCI Concessions. Il a été développé par COFIROUTE et VINCI Concessions, avec le concours notamment de l'ANR, du STIF, de l'IAURIF, du LVMT et du LET.

2. Dans le domaine des transports, en 25 ans en Ile-de-France, seules les autoroutes A 14 et A 86, et quelques extensions de réseaux de transports en commun en site propre ont été réalisées, alors que la demande est considérable et que beaucoup de projets présentant une efficacité économique élevée ont par ailleurs été étudiés sérieusement comme Orbital/Arc Express, Laser, Hysope, Villexpress, RSP, Muse, etc.

3. Le modèle a été progressivement développé sous le contrôle et avec l'appui de spécialistes en économie, en logements et en transports : nous citerons et remercions chaleureusement les professeurs R. Prud'homme, J.P. Orfeuill, O. Morellet, F. Leurent, M.H. Massot, J.C. Driant... avec une mention spéciale pour O. Piron, qui nous ont apporté chacun dans leur domaine respectif des idées, et un contrôle d'une valeur inestimable. L'introduction dans le modèle d'une loi spécifique concernant le marché des HLM ainsi que le calcul par une loi de type Cobb Douglas de la localisation des entreprises leur doit beaucoup.

phénomènes, ce qui nécessite de faire des hypothèses nombreuses et en fait assez déterminantes sur les résultats. La lisibilité et la crédibilité de ce type d'approches restent donc en pratique délicates et difficiles d'un point de vue opérationnel. Sans compter que les équations de transfert qu'il faut alors mettre en œuvre sont difficiles à spécifier, et que leur performance économétrique est assez limitée. *A contrario*, le modèle PIRANDELLO® cherche une situation d'équilibre, de long terme, sans se préoccuper du « chemin » emprunté, qui d'un certain point de vue, dépend aussi beaucoup de considérations politiques, difficiles souvent à anticiper. Cet objectif de modélisation plus restreint permet de mettre en œuvre des équations plus simples et des principes micro-économiques bien établis et facilement explicables. En d'autres termes, le modèle répond à un triple objectif :

- Améliorer les prévisions de trafic long terme par la prise en compte de l'évolution locale de la population et des emplois (comme le montre l'exemple de l'autoroute A86) ;
- Tenir compte dans les analyses économiques de l'ensemble des comportements micro-économiques, et non pas seulement des gains de temps (ou d'accessibilité) ;
- Avoir un outil de dialogue et d'analyse des grands projets qui soit opérationnel, c'est-à-dire suffisamment précis et compréhensible pour discuter des opérations d'envergure (type villes nouvelles ou grandes infrastructures) et global (notamment environnemental) ;

Parallèlement, il vérifie une triple contrainte :

- Le modèle doit être compréhensible par des élus et des décideurs ;
- Il doit être micro-économiquement correct (c'est-à-dire compréhensible par des experts) ;
- Il doit être utilisable (c'est-à-dire d'une complexité qui ne dépasse pas celle d'un modèle de trafic habituel et qui reste compréhensible par l'ingénieur d'étude) ;

1. DE L'ÉQUILIBRE DES TRAFICS À L'ÉQUILIBRE URBAIN

Dans les modèles de trafic classiques, sans trop radicaliser la démarche, on part généralement des populations et des emplois desquels on déduit les besoins de transport, ce qui constitue déjà un problème complexe, qui fait appel à la notion d'équilibre des trafics (équilibre de Wardrop). On considère qu'un « système de transport est à l'équilibre lorsqu'aucun usager n'a intérêt à changer unilatéralement d'itinéraire ou de mode ». Ce faisant, on suppose généralement que les seuls

comportements à la disposition des résidents face à une modification des conditions de transport sont le changement d'itinéraire, voire de mode, et la diminution de leur mobilité, ce qui est en contradiction totale avec l'observation : la mobilité tous modes confondus est en effet constante dans le temps, et les usagers changent très peu d'itinéraire et de mode. Il faut donc prendre en compte dans les représentations des comportements des usagers et des riverains trois nouveaux mécanismes importants :

- le premier est la sélection des destinations des trajets, en fonction des temps et des coûts de transport : une augmentation des temps réduit la « portée » des déplacements, mais pas leur nombre ; c'est la déclinaison de la « théorie de l'accessibilité » développée par J.G. Koenig (1974) et J. Poulit (1974, 2005) et qui permet de prendre en compte la constance de la mobilité ;

- le deuxième est le choix de la localisation des ménages et des entreprises. En fonction du prix du m², de l'accessibilité et de leur revenu, les ménages cherchent un lieu de résidence qui maximise leur satisfaction. En tenant compte de l'accessibilité, de la surface des bâtiments et de leur prix, les entreprises recherchent quant à elles la localisation qui leur permet de maximiser leur productivité. C'est une extension du « modèle monocentrique », qui postule un invariant entre « le confort domestique » et « l'accessibilité à la zone d'emploi » ;

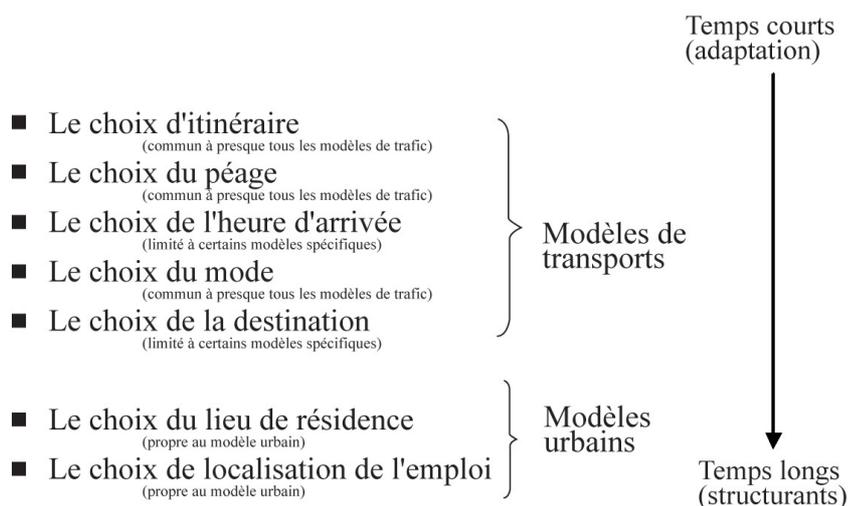
- le troisième est le mécanisme de formation des prix de l'immobilier et des constructions neuves, les deux étant liés au niveau de la demande.

De cette manière, on obtient une représentation élargie du système urbain, dans laquelle on peut à nouveau définir un équilibre, plus général cette fois, car il porte à la fois sur le système de transport et sur l'urbanisme : « le système urbain est à l'équilibre si aucun résident et aucun emploi n'ont intérêt à changer unilatéralement de localisation ou de moyen de déplacement ». Cette définition peut être étendue au cas des modèles à utilité aléatoire. En d'autres termes, « le système urbain est à l'équilibre si la satisfaction de chaque résident et de chaque emploi est constante sur le territoire étudié ». L'« équilibre urbain » prend donc en compte l'ensemble des comportements classiques des ménages (sauf le choix de l'heure de départ, mais celui-ci pourrait être ajouté sans modifier la structure générale du modèle), des entreprises, et des propriétaires immobiliers. Pirandello® permet donc de réaliser une prévision des « déplacements de l'équilibre urbain », et par conséquent de proposer des analyses socio-économiques plus pertinentes que celles réalisées jusqu'ici.

Figure 1

Temporalités de PIRANDELLO®

PIRANDELLO® : des acteurs urbains en quête de localisation...



Problème : Quelle est l'attractivité d'une zone?

L'« équilibre urbain » est naturellement une approximation (qui pourra être levée dans l'avenir) : tout le monde sait qu'une ville est un organisme vivant et évolutif. Mais les modélisations dynamiques récentes, même très développées, par des logiciels comme MEPLAN, TRANUS ou URBANSIM, qui se sont attachés à représenter l'évolution des affectations de terrain ou leur valeur foncière, n'ont pas réellement donné satisfaction, car ces logiciels sont très délicats à utiliser et font preuve d'instabilité. L'hypothèse d'équilibre que nous avons développée, bien que très simplificatrice, rend la modélisation réellement opératoire. Elle s'appuie sur la lenteur des évolutions urbaines.

La Figure 1 résume la temporalité de PIRANDELLO®⁴ : ce n'est pas une temporalité courte comme celles que l'on observe dans un modèle de trafic (les trafics se stabilisent après l'ouverture d'un projet en environ deux ans), mais une temporalité longue dont l'ordre de grandeur est la décennie, voire plus.

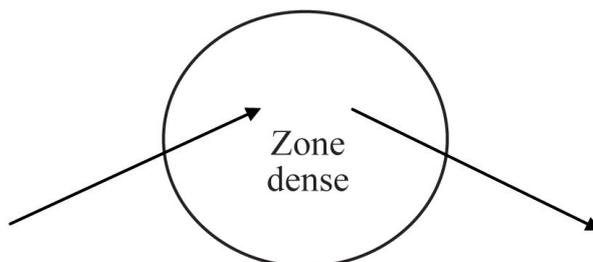
4. Le groupe VINCI a créé un « think tank », appelée la Fabrique de la cité, pour étudier les problèmes urbains dans leur ensemble, et notamment les raisons de l'attractivité des territoires. Le modèle Pirandello® y a été exposé.

Figure 2

L'équilibre urbain résultante des forces centripète et centrifuge

La recherche de l'accessibilité concentre les populations et conduit à une augmentation du foncier

La recherche de surfaces habitables conduit à déconcentrer les populations



Pirandello® simule donc une « agglomération à l'équilibre », c'est-à-dire que les forces centripètes tendant à concentrer les ménages et les entreprises en ville sont équilibrées par les forces centrifuges (principalement sociales et économiques) tendant à chasser du centre les ménages et les entreprises qui veulent s'offrir la surface qu'elles désirent tout en respectant leur contrainte budgétaire (Figure 2). Cette hypothèse d'équilibre semble particulièrement pertinente à l'heure actuelle en France, du fait de l'absence de réalisations urbaines d'envergure.

Bien entendu, tous les ménages n'ont pas les mêmes contraintes budgétaires. Nous avons donc divisé la population en huit niveaux de revenus, ce qui correspond à une approximation de la dimension sociologique du problème. De même, pour les emplois, nous avons, dans une première phase, réparti les emplois en deux familles de volume identique selon le niveau de revenu. Pour trouver cet équilibre, PIRANDELLO® simule le comportement des ménages et des entreprises avec une hypothèse centrale : ils cherchent, par leurs choix d'implantation géographique, à maximiser leurs bénéfices (richesse financière pour les entreprises et bien-être pour les ménages) sous contrainte budgétaire.

2. LES ÉQUATIONS DE BASE DU MODÈLE

2.1. L'accessibilité

L'évolution de la densité urbaine (qu'elle soit envisagée sous la forme de la densité de population, de la densité d'emplois ou encore de la densité « emplois+population », ce qui est nettement préférable),

est un processus assez lent, qui répond à l'évolution des attentes micro-économiques des résidents, avant même de répondre à des évolutions réglementaires ou planifiées : il est pratiquement impossible d'aller contre les attentes d'une population entière et de l'ensemble des entreprises d'un territoire. Ces attentes sont simultanées, mais de natures opposées : elles concernent à la fois l'accessibilité au centre-ville et le désir de confort domestique (désir d'espace).

Pour modéliser la satisfaction liée à un niveau d'accessibilité, le modèle se fonde sur la théorie de l'accessibilité⁵. Pour la résumer sommairement, cette théorie exprime le fait qu'il y a d'autant plus de richesses créées dans une agglomération que les interactions entre les différents partenaires habitant la ville y sont nombreuses et peu coûteuses en temps ou en argent. La formulation classique à l'aide de la théorie maintenant très classique des choix discrets conduit à l'expression suivante de l'accessibilité urbaine :

$$u(i,r)^{acc} = \frac{\theta \cdot r^\alpha}{\lambda} \log \left(\sum_{dest} p_j e^{-\frac{\lambda}{\theta \cdot r^\alpha} (\theta \cdot r^\alpha \cdot tt_{ijr} + c_{ij})} \right)$$

où $u(i,r)^{acc}$ est l'accessibilité de la zone i pour la classe de revenus r , θ est le facteur de proportionnalité de la valeur du temps au revenu horaire, α et λ_r sont des constantes définies par ajustement, tt_{ijr} est le temps de transport de la zone i à la zone j pour le revenu r , c_{ijr} est le coût de transport de la zone i à la zone j pour le revenu r et p_j est la population de la zone j ;

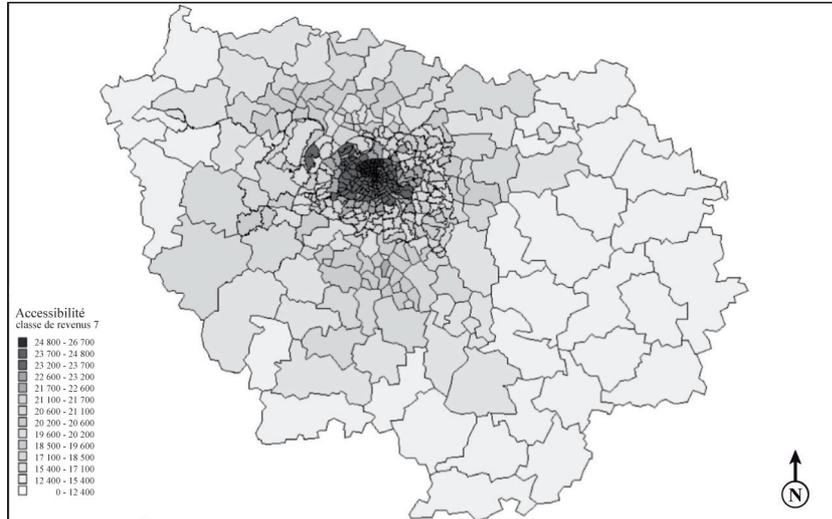
L'accessibilité se calcule donc dans un cadre théorique rigoureux, et peut s'exprimer monétairement. Elle correspond à la « grandeur » que les personnes maximisent lorsqu'elles désirent se rendre « en ville ». L'accessibilité tend à concentrer tant les populations et les emplois. En région Ile-de-France, les résultats sont présentés sur la Figure 3.

2.2. Le confort domestique

A contrario, les ménages ont besoin de surface pour vivre. Leur « confort domestique » sera d'autant plus grand qu'ils disposeront de surfaces pour habiter et pour les différentes activités de la vie courante telles que l'école, les espaces ludiques et culturels, les espaces réservés aux activités sociales communes, etc. La formulation retenue est « à élasticité constante » ; on a en effet supposé que la satisfaction, mesu-

5. Développée par J.G. Koenig (1974) et J. Poulit (1974), et simultanément par D. Mc Fadden (1978) aux Etats Unis.

Figure 3
Accessibilité des ménages en région Ile-de-France



rée directement par son consentement à payer, est liée à la surface, à la part de résidences individuelles (PLI) et au revenu de la manière suivante :

$$u(s, r, \chi)^{\text{espace}} = k p_0 s_0 \cdot \left(\frac{s}{s_0} \right)^{\alpha} \left(\frac{r}{r_0} \right)^{\beta + \chi} (1 + \gamma \cdot pli)$$

où χ est une distribution de probabilité, non nécessairement normale, mais centrée ;

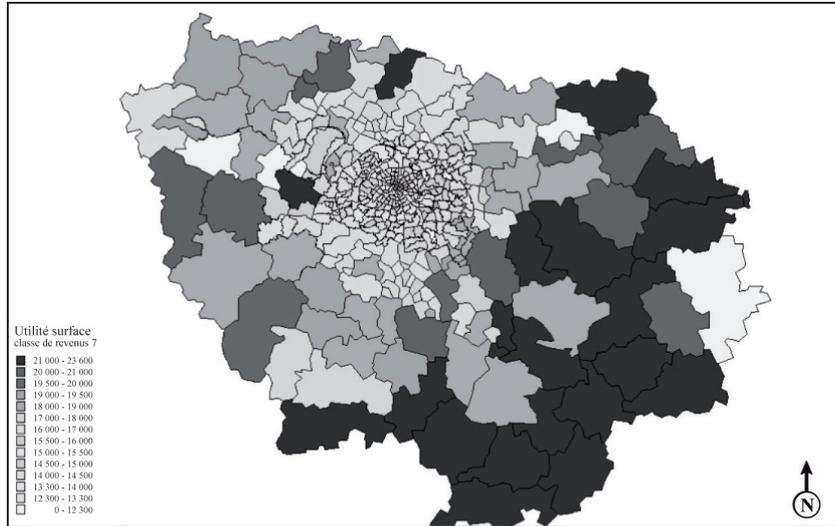
pour les immeubles de faible standing $\chi < 0$;

pour les immeubles de haut standing $\chi > 0$;

p_0 , s_0 , k , α , β et γ sont des constantes déterminées lors de l'ajustement ;

La distribution des χ a pour objectif de prendre en compte le « standing » d'un appartement, dont le service rendu ne se limite pas tout à fait à la mesure de sa surface, mais inclut d'autres paramètres : l'ensoleillement, le type de construction, l'étage, l'équipement, la qualité des prestations, etc. Pour fixer les ordres de grandeur, l'écart-type de la distribution est de l'ordre de 20 %. En résultat, la Figure 4 présente une cartographie du confort domestique par commune dans la région Ile-de-France.

Figure 4
Répartition du confort domestique



2.3. La productivité des emplois

Il en va de même pour les entreprises. Si l'accessibilité aux emplois et aux marchés est fondamentale, la localisation d'une entreprise est décidée par ses dirigeants en fonction de plusieurs paramètres principaux, dont le coût correspondant aux surfaces louées ou achetées. Là encore, nous avons représenté le processus de décision des entreprises par une équation d'équilibre très simple. Bien entendu, des aspects fiscaux, tant pour les entreprises que pour les ménages, jouent un rôle important dans les décisions d'implantation et sont introduits comme des éléments complémentaires des équations. L'expression retenue pour expliquer la productivité est la suivante :

$$u(i, S) = k \cdot S^\alpha \cdot e^{\beta \cdot A(i, S)} - S - (\phi(i) + \pi(i)) \cdot Surf(i) + \varepsilon_{is} \eta(r)$$

où S est le salaire de l'emploi considéré, $A(i, S)$ est l'accessibilité (mesurée par le surplus) de la zone i pour le salaire S ; k , a et b sont des constantes déterminées par ajustement; $p(i)$ est le prix du m^2 de bureaux dans la zone i ; $\phi(i)$ est le taux de fiscalité locale de la zone i ; $Surf(i)$ est la surface de bureaux par personne; χ est un paramètre d'ajustement local; et $\eta(r)$ est l'aléa suivant une loi de Gumbel dépendant de la classe de revenu r .

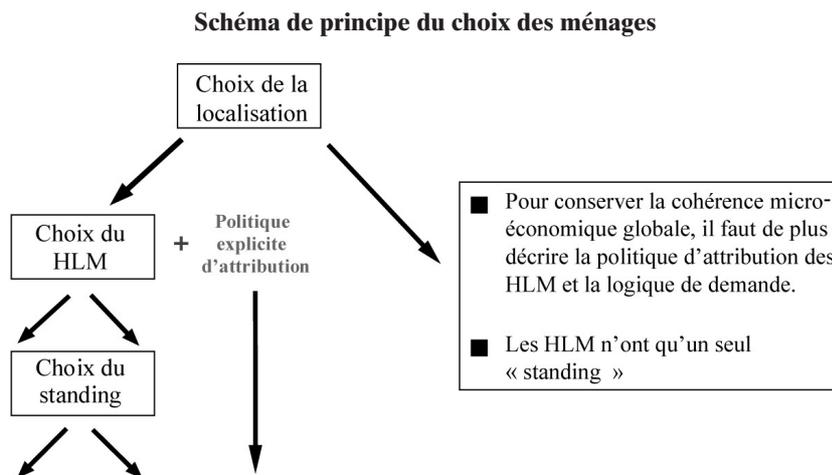
Avec les paramètres obtenus économétriquement sur la région Ile-de-France, il a été mis en évidence que la productivité d'un emploi en zone centrale est supérieure de 40 % à celle d'un emploi de même revenu en zone périphérique. Ce résultat est très important et souligne l'importance de l'accessibilité dans les politiques urbaines.

2.4. Une multiplicité de choix de localisation

En milieu urbain, les résidents sont conduits, pour se loger et se déplacer, à réaliser une multitude de choix : surface, résidence, choix du logement HLM ou non, standing, mode de transport, motorisation, etc. Dans le modèle Pirandello®, les choix des résidents ont été hiérarchisés de la manière suivante, de manière à pouvoir les traiter au moyen d'un modèle Logit emboîté (Figure 5) :

- au premier niveau, est pris en compte le choix de localisations en fonction de l'accessibilité et du confort domestique global résultant du choix entre logement HLM et logement « sur le marché libre » ;
- au deuxième niveau, est pris en compte le choix entre le logement HLM et le « marché libre ». Ce choix n'est pas identique à un choix de standing, car il met en jeu des mécanismes de régulation et d'attribution par la puissance publique différents ;
- au troisième niveau, le résident choisit son standing, ce qui conduit à déterminer un prix de l'immobilier pour chacun des standings. Il y a un prix par standing et par zone.

Figure 5



3. DE L'ÉQUILIBRE À L'ÉVALUATION DE CRITÈRES

3.1. Les équations de l'équilibre

Une fois décrites les fonctions d'utilité, et la hiérarchisation des critères de préférence, il est important de décrire les différents mécanismes d'équilibre de PIRANDELLO® :

- pour le modèle d'affectation routier, le principe est celui de l'équilibre de Wardrop ; il a été appliqué aux transports collectifs, en retenant un facteur d'inconfort fonction de la congestion de la ligne, ou en d'autres termes du niveau de service ;

- l'équilibre du choix entre les modes est analysé au moyen d'un modèle de type Logit non linéaire, qui fait intervenir la motorisation ; les résidents ont la possibilité de choisir leur mode de transport, sur une base utilitariste, en fonction notamment de l'écart des temps de transport et de l'accès à un véhicule, du parking, etc. ;

- la motorisation est elle-même endogénéisée à partir d'une estimation faisant intervenir le différentiel d'accessibilité entre les transports collectifs et la voiture individuelle ;

- la répartition des surfaces de logements entre les différentes catégories de revenus est effectuée localement dans chacune des zones. Le principe du modèle local consiste à établir une dépendance entre les revenus et les surfaces de logement : un ménage aisé utilisera un appartement de 100 m² pour deux personnes dans Paris, tandis qu'un ménage nettement moins aisé ne pourra habiter « que » dans 50 m² à Paris, voire dans une surface plus petite encore. Symétriquement, compte tenu de la distribution des tailles de ménages, une même surface de 50 m² pourra être utilisée indifféremment par une personne seule de revenu élevé, un ménage de deux personnes ayant des revenus moyens, et une famille de revenus faibles, etc.

Il y a donc une réelle compétition pour l'accès à un appartement, tout au moins pour l'essentiel du parc immobilier. En termes plus techniques, l'affectation n'est donc pas réalisée suivant un schéma « en tout ou rien », les plus hauts revenus « dominant » alors tous les autres, mais suivant un principe d'équilibre, fonction de la surface disponible. Le problème n'est pas propre aux ménages, car la compétition existe aussi pour les surfaces de bureaux.

En ce qui concerne l'équation de l'équilibre représentant la localisation des ménages, l'arbitrage se fait selon quatre composantes : (i) le désir de services et de proximité mesurée par l'accessibilité (densité+transport), (ii) l'environnement immédiat, (iii) le désir de surface, mesuré par l'utilité des m² (confort domestique) et (iv) les

coûts financiers mesurés par le coût immobilier auquel s'ajoutent la fiscalité et le coûts des déplacements. L'équation s'écrit alors :

$$(\text{Accessibilité}) + (\text{Confort domestique}) + (\text{Environnement})^6 - (\text{Coûts}) \\ \# \text{ constante}$$

En ce qui concerne l'équation de l'équilibre représentant la localisation des entreprises, l'arbitrage se fait selon trois composantes : (i) la productivité, qui dépend de l'accessibilité et du salaire (densité+transport) ; (ii) la fiscalité locale et (iii) le coût de l'immobilier de bureaux. L'équation s'écrit alors :

$$(\text{Productivité}) - (\text{Salaires}) - (\text{Fiscalité}) - (\text{Coûts}) \# \text{ constante}$$

3.2. Les entrées et les sorties du modèle

Nous avons insisté sur le fait que Pirandello® devait être un modèle utilisable, qui sera enrichi au fur et à mesure de la poursuite de nos études⁷, et qui restera toujours et avant tout un modèle capable de donner des résultats pratiques sur une ville donnée. En entrée du modèle, nous disposons de la description de la ville « physique » c'est-à-dire :

- des réseaux de transport (capacité, vitesse, origines et destinations indicatives) ;
- des surfaces habitables et des bureaux avec leur localisation ;
- de la population totale ;
- de l'emploi total ;
- de la répartition des revenus ;
- des paramètres comportementaux ;
- de la politique tarifaire des transports publics ;
- des politiques fiscales locales.

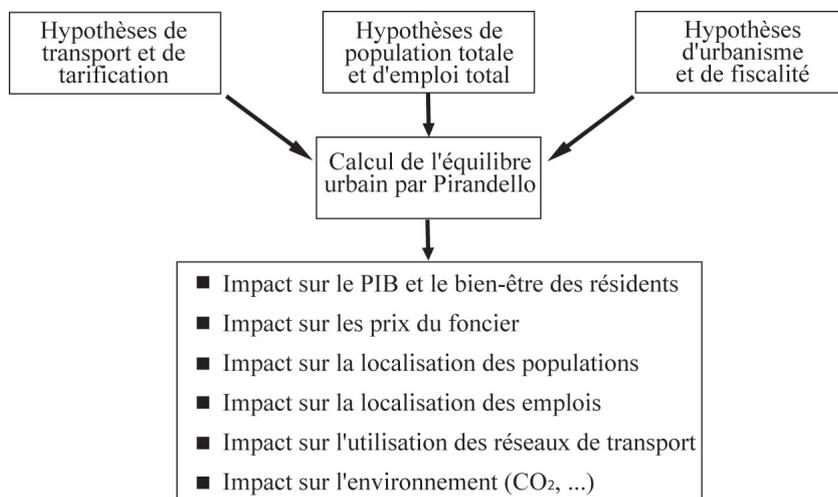
En sortie, nous obtenons :

- les populations localisées par zones ;
- les emplois localisés ;
- la charge des réseaux routiers et de transport en commun ;
- les motorisations par zone ;
- le prix de l'immobilier également par zone ;
- le confort domestique et l'accessibilité par zone.

6. La variable d'environnement représente la désirabilité de la localisation. C'est un paramètre d'ajustement.

7. Par exemple, de nouveaux éléments de la base de données des Déclarations automatisées des données sociales (DADS) seront exploités et permettront d'ajuster certains paramètres qui sont aujourd'hui seulement approximés.

Figure 6

Six critères estimés par le modèle

Il est bien entendu possible d'obtenir grâce au modèle un certain nombre de données macro-économiques concernant l'agglomération étudiée (Figure 6), telles que le PIB (Production intérieure brute), le bien-être des habitants, les émissions de CO₂, les recettes de péage et de transport en commun, les recettes fiscales, etc.

4. UNE APPLICATION À LA RÉGION ÎLE-DE-FRANCE

Le modèle a été calé par l'utilisation des données sur l'Île-de-France recueillies entre 2003 et 2005. C'est essentiellement l'Enquête générale des transports (EGT) de 2003 qui a fourni les données principales sur les transports et les logements. Cette enquête a été complétée par la suite par une utilisation du compte annexe du logement tel que présenté par le Ministère de l'écologie (MEEDDM). Le modèle de transport routier sous-jacent est celui établi par COFIROUTE, qui a fait l'objet d'un calage particulièrement soigneux. Il réalise un zonage de la région en environ 450 zones. Le modèle de transport collectif a quant à lui été élaboré à partir des informations transmises par le Syndicat des transports d'Île-de-France (STIF), qui organise le transport public des franciliens. Il fonctionne à contrainte de capacité, suivant un principe analogue au modèle routier et réalise un zonage en environ 1400 zones. En ce qui concerne les revenus des ménages, nous avons utilisé la base de données de la Direction générale des impôts

(DGI) et en ce qui concerne le prix du logement, nous avons utilisé la base BIEN de la Chambre des Notaires. L'agglomération francilienne est représentée par 415 zones (qui correspondent à des territoires homogènes). Ce nombre est relativement faible, mais lorsqu'il est combiné aux huit classes de revenus et aux deux familles d'emplois, il conduit à la construction d'une matrice de 4150 x 4150 (qu'il faut mobiliser pour les calculs, ce qui représente un temps de calcul important). A partir de cette base, deux lois spécifiques de calage ont été mises au point :

- l'une pour représenter le fait qu'une même surface, suivant qu'elle est en maison individuelle ou en appartement, n'a pas la même fonction d'utilité pour le ménage ;
- l'autre pour représenter les affinités de localisation par familles sociales homogènes : la tranche de salaire N aura tendance à se regrouper avec la même tranche de salaire N , un peu moins avec les tranches $N-1$ et $N+1$, et ainsi de suite.

Le modèle a été calé sur la période 2003-2005, avec la description de la ville physique telle qu'elle était à ce moment-là. Il est aisé de modifier cette description physique – ou réglementaire – et de lancer une simulation pour voir l'effet d'une décision publique correspondant à une modification des entrées, comme par exemple :

- la création d'une infrastructure nouvelle de transport, (transport routier ou transport en commun) ;
- la création d'une nouvelle zone de bureaux ;
- la construction d'un ensemble de logements ;
- un changement de politique tarifaire dans le réseau de transport ;
- un péage de zone, etc.

Bien entendu, il importe que les modifications de ces grandeurs soient visibles par rapport aux grandeurs concernant la totalité de l'Ile-de-France. Ajouter 500 logements sur une zone ne se verrait pas. Il faut au moins 5 000 logements pour observer un effet sensible, qui interagira alors sur l'ensemble de l'aire étudiée.

Les résultats du modèle sont présentés d'une façon de façon à ce que les décideurs puissent visualiser facilement les conséquences sociales et économiques d'une décision concernant les transports ou l'aménagement du territoire, et les expliquer à leurs mandants. Dans le domaine des transports, le calcul économique est souvent à la base de la décision publique, mais il est peu convainquant pour les électeurs et leurs mandants qui, par voie de conséquence, hésiteront à soutenir même les bons projets. Pirandello® propose une illustration différente des projets : il traduit les décisions concernant les transports ou l'aménagement en termes de modification des localisations de la population,

des emplois, ainsi que la conséquence sur le prix de logements. Nous présenterons quatre exemples (les trois derniers sont volontairement excessifs, mais permettent d'illustrer l'usage du modèle et les raisonnements auxquels il conduit) :

- un scénario de dégradation des conditions de transport ;
- un scénario au « fil de l'eau » ;
- un scénario de mise en place, autour de la Ville de Paris, d'un péage cordon tel que celui qui a été mis à Londres autour de la City ;
- un scénario d'augmentation du parc de logements de 40 % par rapport à la situation actuelle.

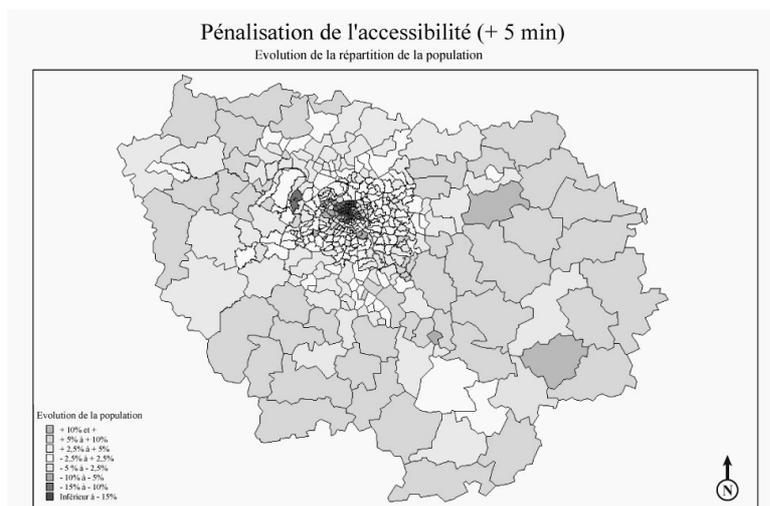
4.1. Scénario de dégradation des conditions de transports

Ce premier scénario (Figure 7) propose d'anticiper ce qu'impliquerait la perte d'efficacité du système de transport. On a ainsi simulé à titre illustratif un allongement de 5 minutes de tous les déplacements (y compris des déplacements « courts », très nombreux en réalité, et qui se trouvent ainsi particulièrement pénalisés). Le modèle détermine

Figure 7

Scénario de dégradation des conditions de transport

La perte d'efficacité du transport coûterait cher à la région...



Hypothèses : tous les déplacements allongés de 5 minutes

Il y a alors une perte d'efficacité économique de 25 milliards d'euros (5% du PIB régional), et une perte "d'accessibilité" de 5 milliards d'euros.

alors une nouvelle répartition des populations et des emplois, et une perte de PIB régionale de l'ordre de 5 %.

4.2. Scénario au fil de l'eau

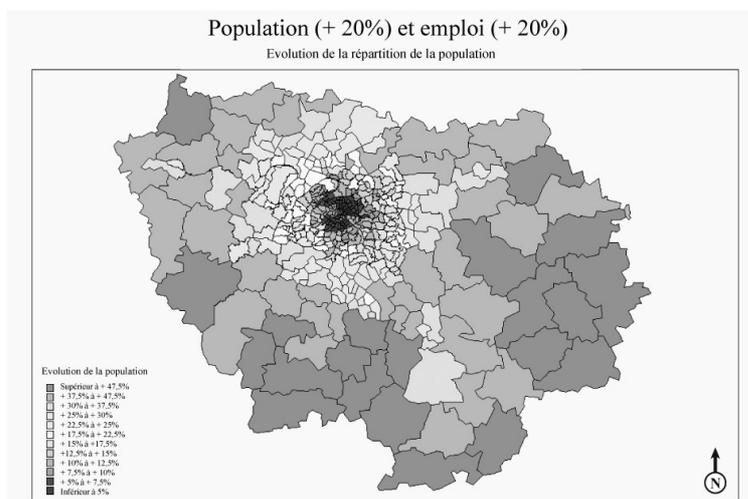
Un scénario au « fil de l'eau » (Figure 8) a été testé en supposant une augmentation de 20 % de la population et des emplois, ainsi qu'un gel des réseaux de transport et une évolution très modérée du parc de logements. Le modèle montre alors une dégradation sensible des conditions de circulation et d'étalement urbain, avec une augmentation très forte des populations en grande couronne, et une quasi stagnation dans la zone centrale.

Le résultat le plus préoccupant est probablement la baisse de l'efficacité économique : le PIB par habitant décroît de 1,3 %, alors que mécaniquement il devrait croître, du fait de l'augmentation des populations et des emplois, de l'ordre de 0,5 %. Ce résultat est lié à la dégradation des temps de parcours (ici d'autant plus forte que le trajet est plus long) ; il provient à la fois de la nouvelle spatialisation des

Figure 8

Scénario au fil de l'eau

Le desserrement probable des populations et des emplois



Hypothèses : Réseau stable

Population et emplois + 20%

30 000 logements de plus par an

Le PIB croît moins vite que la population (- 1,3%)
ainsi que l'accessibilité et le confort domestique

populations et des emplois et de la baisse des vitesses sur le réseau routier. Une fois encore, on observe que les effets de l'urbanisme et des transports sont indissociables.

4.3. Simulation d'un péage cordon autour de Paris

Ce scénario suppose la mise en place d'un péage type « octroi » ou « cordon » autour de Paris, d'une valeur de 20 €, que devrait payer tout véhicule franchissant le boulevard périphérique, dans un sens ou dans l'autre (y compris les véhicules des résidents parisiens). Le choix de cette valeur élevée est arbitraire et purement illustratif, mais il a l'avantage de mettre en évidence certains mécanismes, notamment à long terme. Les paramètres comportementaux sont ceux des études de trafic usuelles. En particulier, il est tenu compte du financement partiel des déplacements des salariés par les entreprises.

Sur le modèle de trafic, donc sur le « court terme », on observe un allègement du trafic à l'intérieur du boulevard périphérique, et une saturation corrélative des voiries en petite couronne. On remarque ici

Figure 9

Simulation d'un péage cordon : un test théorique

Test théorique (20 euros par sens, tous trajets payants) d'un péage cordon autour de Paris : Paris se fluidifie, la couronne s'embouteille

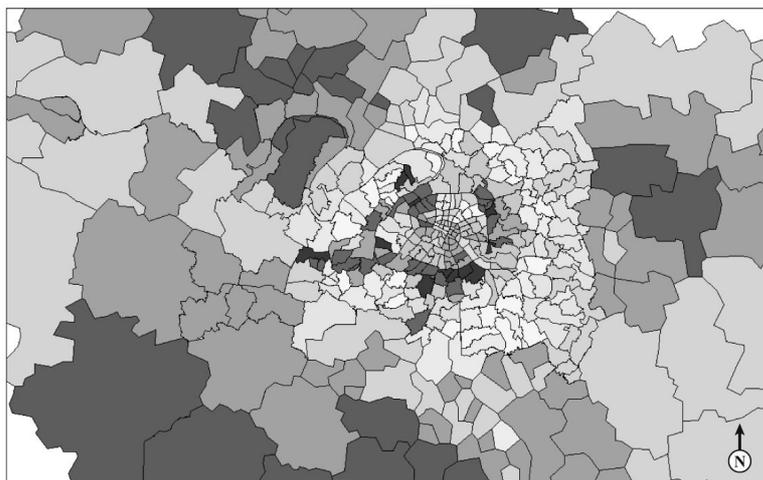
Comparaison E,V,C = Débits



Figure 10

Simulation d'un péage cordon : la population diminue au centre

Evolution de la population en situation de péage central



un phénomène important : dans ce scénario, Paris « exporte » sa congestion vers les communes riveraines. Dans un système à l'équilibre, il n'y a pas en effet de décision locale, mais toute décision d'envergure suffisante rétroagit sur le comportement de l'ensemble des résidents.

Sur le long terme, la mise en place d'un cordon à péage se traduit par une baisse de la population dans Paris, qui perd une fraction importante de son accessibilité (Figure 10). Ce phénomène est encore plus marqué pour les communes riveraines, qui perdent leur accès favorisé à Paris.

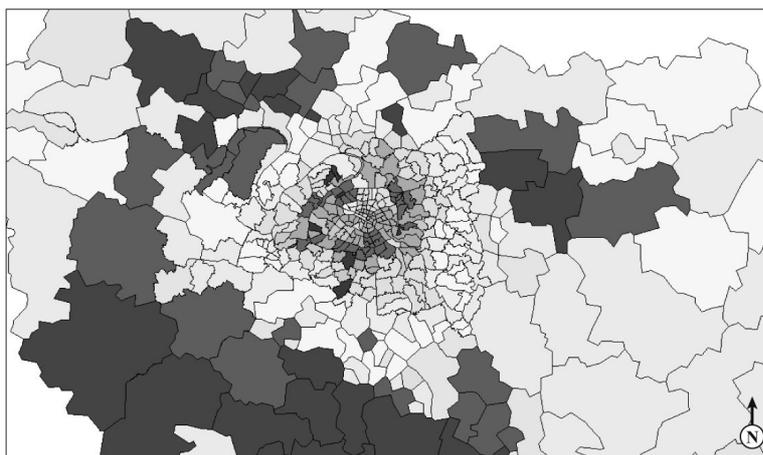
Plus précisément, cette baisse de la population n'est pas identique en fonction des revenus, car le péage n'est pas ressenti de la même manière par les ménages aisés et les ménages les plus pauvres. On voit donc un déplacement en grande couronne des populations les plus pauvres.

Pour finir, en ce qui concerne le volet « économique », la mise en place du cordon a un impact négatif sur la productivité des emplois franciliens.

4.4. Simulation d'une augmentation du parc de logements

Le prix des logements a considérablement augmenté depuis 2003. Il y a certainement un double effet derrière cette augmentation : celui

Figure 11
Simulation d'un péage cordon :
les ménages les moins aisés partent en grande couronne
 Evolution de l'accessibilité - Classe de revenus 2



d'un excès de liquidités au niveau mondial, qui a conduit les banques à prêter à taux bas et sur des durées longues, et celui d'un manque chronique de logements en Ile-de-France, qui rend le marché de plus en plus tendu. On observe à l'heure actuelle un début de détente sur les prix, mais les spécialistes ne les voient cependant pas revenir dans le « tunnel » observé par J. Friggit dans ses études sur l'évolution des prix du logement sur une période longue.

Nous avons simulé avec le modèle ce que pourrait provoquer une baisse des prix due à la construction de 20 %, et 40 % de logements en plus de l'existant dans chacune des communes de l'Ile-de-France (Figure 12). Bien entendu, cette hypothèse n'est pas très opérationnelle, mais le scénario donne des indications sur les zones où l'impact serait le plus important. Une augmentation du nombre de logements construits de 20 % montre des baisses de prix importantes, mais également des hausses dans certaines communes, car elles sont attractives et disposent de plus de surfaces pour plus d'habitants, donc plus d'accessibilité. En moyenne, ajouter 20 % de logements de façon uniforme ferait baisser les prix de 4 %, et en ajouter 40 % le ferait baisser de 17 % (Tableau 1).

Tableau 1
Simulation de l'évolution du prix des logements

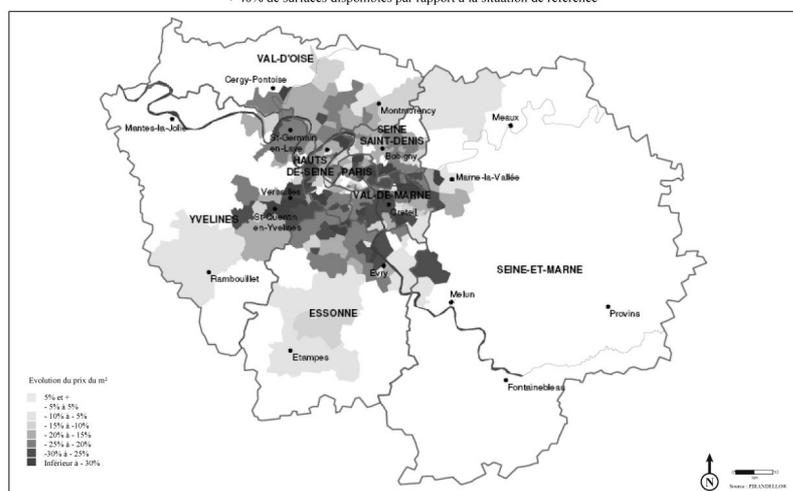
	Référence	Surface + 20%	Surface + 40%
Prix moyen par m ²	2969	2849	2453
Evolution	/	- 4,0%	- 17,4%

Figure 12

**Simulation d'une augmentation du parc de logements :
impact des surfaces disponibles sur le prix au m²**

Impact des surfaces disponibles sur le prix du m²

+ 40% de surfaces disponibles par rapport à la situation de référence



CONCLUSION : DE NOUVEAUX CHAMPS DE MODÉLISATION

Le modèle Pirandello® apparaît donc comme une extension logique des modèles de trafic à la problématique urbaine actuelle. Il se veut un outil à la fois scientifique et opérationnel. Il hérite de plusieurs formulations partielles (modèle monocentrique, modèles d'équilibre de trafic, théorie de l'accessibilité), mais innove dans de nombreux domaines (formalisation et calcul de l'équilibre urbain, choix modal innovant, etc.). Nous ne sommes qu'au début de l'utilisation de ce modèle, mais déjà le potentiel de cet outil apparaît clairement.

D'une part, la bonne restitution des situations de calage légitime les hypothèses de fond, à savoir que les comportements des ménages et des entreprises sont en moyenne économiquement rationnels, et que les lois retenues pour les représenter sont *a priori* transférables dans d'autres villes des pays développés. D'autre part, par son évaluation

chiffrée de la modification des prix des logements à l'ouverture d'une infrastructure augmentant leur accessibilité, il ouvre des pistes au financement des infrastructures par une récupération d'une partie de la rente foncière ainsi créée. C'est un sujet très ancien, mais qui mérite probablement d'être analysé à la lumière de ce nouvel outil, d'autant que les évaluations à ce sujet sont aujourd'hui très contrastées. Enfin, et de façon directe, Pirandello® explicite l'impact urbain des décisions publiques touchant les transports de manière aisément compréhensible par les décideurs et élus locaux, car il porte sur des données « concrètes », telles que la localisation des ménages et des emplois ou la valeur de l'immobilier.

Références bibliographiques

- Alonso W., 1964, *Location and land use*, Harvard University Press.
- Anderson S.P., de Palma A., Thisse J.F., 1992, *Discrete choice theory of product differentiation*, Cambridge, MIT Press.
- Barbier-Saint-Hilaire F., 2008, *Le modèle d'affectation DAVIS/AELD*, Manuel de référence.
- Beckmann M.J., 1973, Equilibrium models of residential land use, *Regional and Urban Economics*, 3, pp. 361-368.
- Ben-Akiva M., Lerman S., 1985, *Discrete choice analysis : theory and application to travel demand*, MIT Press.
- Cavailhès J., 2005, Le prix des attributs du logement, *Economie et Statistique*, 381-382, pp. 91-123.
- Driant J.C., 2003, Le schéma directeur de l'Île-de-France et la recherche sur les marchés du logement. In : SDRIF, 2003, *Les apports de la recherche urbaine*, Volume 2 : Les échelles dans la ville : mobilité, mixité et choix résidentiels, pp. 7-36.
- Fujita M., 1989, *Urban economic theory : land use and city size*, University of Cambridge Press.
- Fujita M., Thisse J.F., 2002, *Economics of Agglomeration : cities, industrial location, and regional growth*, Cambridge University Press.
- Fujita M., Thisse J.F., 2003, *Economie des villes et de la localisation*, De Boeck.
- Garcia Castello F.J., Leurent F., 2006, Avancées dans la modélisation des choix discrets de déplacement : une revue critique internationale, *Congres international ATEC'07*.
- Hansen W.G., 1959, How accessibility shapes land use, *Journal of the American Institute of Planners*, 25, pp.73-79.
- Koenig J. G., 1974, Théorie économique de l'accessibilité urbaine, *Revue Economique*, 2, pp. 275-297.
- McFadden D., 1978, Modelling the choice of residential location. In : Karlqvist A, Lundqvist L, Snickars F, Weibull J (ed.), 1978, *Spatial Interaction Theory and Planning Models*, North Holland, Amsterdam, pp. 75-96.
- Poulit J., 1974, *Urbanisme et transport : les critères d'accessibilité et du développement urbain*, SETRA, Ministère de l'équipement.
- Poulit J., 2005, *Le territoire des hommes*, Bourin.

CHAPITRE 6

MOSART ET LE PROJET PLAINSUD : UNE PLATE-FORME DE MODÉLISATION ET DE SIMULATION DE L'ACCESSIBILITÉ POUR L'AIDE À LA DÉCISION ET L'AMÉNAGEMENT DU TERRITOIRE

Alain Bonnafous, Yves Crozet, Aurélie Mercier,
Nicolas Ovtracht, Pierre-Yves Péguy et Florence Puech

Laboratoire d'Economie des Transports
UMR 5593 CNRS, ENTPE, Université de Lyon
14 rue Berthelot – 69363 Lyon cedex 07
yves.crozet@let.ish-lyon.cnrs.fr

Dans la perspective du gouvernement local, la ville durable ne peut être qu'un objectif incertain et complexe. Il est incertain car, à l'évidence, plusieurs dimensions du développement durable ne relèvent pas seulement du gouvernement local. Il en va ainsi de la croissance économique, des politiques européennes ou nationales de l'environnement ou du traitement des inégalités sociales. En se référant au seul niveau local de gouvernement, cet objectif est également complexe car, si chacun des pouvoirs détenus par les collectivités territoriales est susceptible d'infléchir la vie dans la ville ou même les mécanismes profonds de la dynamique urbaine, on ne connaît pas toujours l'ampleur, ni même parfois le sens de ces inflexions.

Face à l'incertitude et à la complexité, la modélisation vise à fournir aux décideurs des outils d'aide à la décision capables de clarifier une partie des relations causales que met en jeu la notion de mobilité urbaine durable (Wegener et Fürst, 1999). Dans cette perspective, notre équipe développe depuis quelques années au Laboratoire d'Économie des Transports (LET – CNRS, Université de Lyon, ENTPE) une plate-forme de modélisation et de simulation innovante : MOSART – MOdélisation et Simulation de l'Accessibilité aux Réseaux et aux Territoires. Cet outil d'aide à la décision s'inscrit aussi dans un projet de recherche financé par l'ANR, projet dont l'acronyme est PLAINSUD (PLAteformes numériques INnovantes de Simula-

tion Urbaine pour le Développement Durable) et qui rassemble, outre le LET, le groupe VINCI, la SSII Géomod et l'IAURIF. MOSART possède un site internet : <http://mosart.let.fr> présentant les dernières avancées du projet.

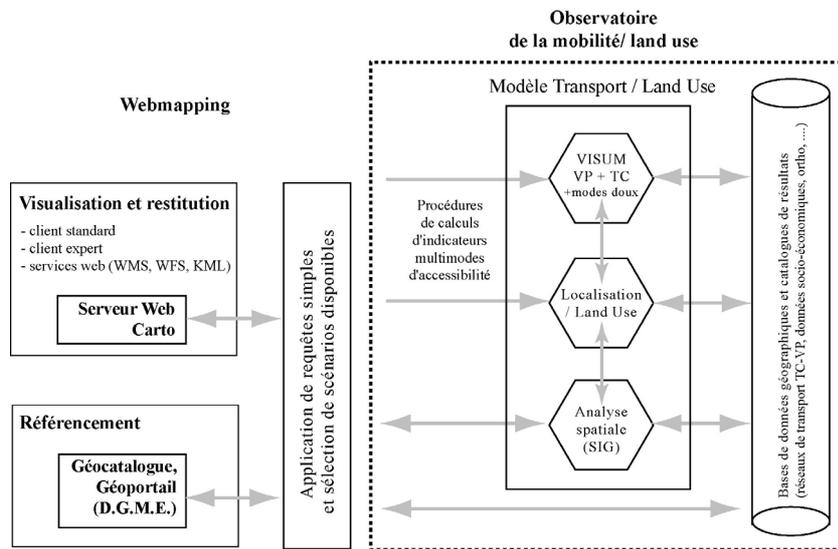
Ce projet a été labellisé par le pôle de compétitivité LUTB (*Lyon Urban Truck and Bus*) en 2007. C'est un outil d'aide à la décision et à l'aménagement du territoire (Crozet *et al.*, 2008) permettant d'étudier l'accessibilité des populations aux services et aux emplois par les différents réseaux (voiture particulière, transports en commun, marche à pied). Plus précisément, les principaux objectifs du projet sont :

- la modélisation et la simulation des niveaux de services offerts par les différents réseaux de transports ;
- l'étude et l'analyse de la mobilité des personnes ;
- la comparaison de scénarios de politique de transport et d'aménagement du territoire dans un cadre de développement durable ;
- la mise en place d'un observatoire des accessibilités spatiales (à travers la création d'un portail géographique).

Au-delà de ces ambitions toutes plus ou moins liées à la notion d'accessibilité et largement illustrées dans les pages qui suivent, cet outil vise à proposer aux habitants et usagers de la ville une autre vision de la mobilité urbaine, qui prenne en compte non seulement les raisonnements de court terme liés à l'accessibilité, mais également les choix publics ou privés de long terme. Dans ce but, MOSART s'est enrichi progressivement de plusieurs modules qui permettront de prendre en compte les dimensions personnelles (programmes d'activités), environnementales (calcul des émissions), foncières (notamment les prix) et toutes les implications de l'évolution des localisations, celles des ménages et celles des entreprises. Afin de répondre aux quatre objectifs précédemment mentionnés, MOSART se devait d'associer des technologies de pointe en matière de Systèmes d'informations géographiques (SIG), de géolocalisation et de dissémination via des géo-portails. L'utilisation conjointe de modèles de transport performants, de fonctions SIG (analyse spatiale, gestion des couches thématiques de données) et d'un *webmapping* fait la force de ce projet (Miller et Shaw, 2001). MOSART s'est également développé avec le souci de mobiliser autant que possible des standards industriels afin d'assurer une transférabilité maximale vers d'autres communautés scientifiques.

L'architecture de MOSART est présentée dans la Figure 1. Les deux principales composantes de la plate-forme sont nettement identifiables. La première permet de construire des scénarios de simulation de nouvelles infrastructures ou des scénarios de prospective. Cela est

Figure 1
**Architecture générale de la plate-forme numérique de modélisation
 MOSART**



rendu possible par la prise en compte des modèles de transport et d'occupation des sols regroupant un logiciel de planification des transports VISUM et des modules de localisation et d'analyse spatiale (SIG). Les bases de données spatiales sous PostGIS complètent cette première composante. L'aspect visualisation des scénarios et des couches thématiques SIG à l'aide d'une application internet de type *web-mapping* est développé en partenariat avec GEOMOD¹ et constitue la seconde composante de MOSART.

Le projet MOSART, est aujourd'hui développé pour l'aire urbaine de Lyon (296 communes – 3 316 km²). Toutefois, les développements récents notamment dans le cadre de notre travail PLAINSUD de l'ANR « Villes Durables » visent à élargir notre zone d'étude à d'autres territoires en France métropolitaine (comme l'Ile-de-France).

Nous présentons ci-après différentes analyses effectuées à l'aide de cet outil. Dans une première partie, nous illustrons plusieurs résultats obtenus concernant les mesures d'accessibilité isochrones croisées à des couches de données socio-économiques du SIG (Thill, 2000). La lisibilité des résultats est valorisée par la production de cartes de synthèse, facilement interprétables dans le cadre de scénarios pour la

1. Société de services en ingénierie informatique spécialisée dans les interfaces graphiques.

mise en place de nouvelles infrastructures de transport. La seconde partie explicite le saut méthodologique correspondant au calcul d'accessibilité gravitaire (Hansen, 1959). Cette dernière découle directement du calcul économique traditionnel et est fondée sur les gains de temps individuels. Mais elle débouche sur une interrogation collective concernant l'espace, les réseaux et les priorités d'usage. Pour contribuer à cette réflexion sur l'intérêt collectif, nous testons pour l'aire urbaine de Lyon des scénarios de politique publique dans une perspective de mobilité durable. Enfin, dans la dernière partie, nous soulignons l'utilité de la plate-forme dans la compréhension de la localisation des activités économiques, ouvrant ainsi la voie aux prochaines étapes de la recherche : comprendre et simuler, via l'accessibilité, la dynamique entre mobilité et localisation.

1. DE L'ACCESSIBILITÉ SPATIALE AUX CARTES ISOCHRONES

La notion d'accessibilité territoriale (ou spatiale) se trouve au croisement de plusieurs disciplines (géographie, économie régionale et urbaine, économie des transports) qui ont chacune contribué à son développement. Si sa « multi-disciplinarité » lui confère une variété d'approches associée à des perspectives de développement, elle la confronte au problème de sa définition.

Ainsi, définir l'accessibilité spatiale n'est pas une chose aussi aisée qu'il y paraît. Une définition de l'accessibilité, dans son acception générale, est donnée par J.M. Morris *et al.* (1979) qui l'envisagent comme une « mesure de la séparation spatiale des activités humaines qui traduit la facilité avec laquelle les activités peuvent être atteintes étant donné un lieu d'origine et un système de transport ». K.P. Geurs et G.T. van Wee (2004) ajoutent que l'accessibilité doit refléter l'organisation spatiale et la qualité du système de transport qui offrent aux individus (pris isolément ou par groupes) la possibilité de participer à des activités localisées en différents points du territoire. L'accessibilité présente ainsi quatre grandes dimensions :

- une dimension spatiale, à savoir l'organisation du territoire ;
- une dimension « technique » concernant le système de transport ;
- une dimension temporelle qui se matérialise par les coûts de transport et les emplois du temps des individus ;
- une dimension individuelle ou comportementale, sous-jacente aux trois dimensions précédentes.

Une première façon de mesurer l'accessibilité consiste à s'intéresser essentiellement aux temps de parcours, visualisés sur une carte par

des aires dites « isochrones ». Le calcul de l'accessibilité suivant la méthode des isochrones est une mesure intuitive et simple. A partir d'un point de départ ou d'origine, on calcule la zone de chalandise pouvant être atteinte à travers un réseau de transport et avec un crédit-temps donné ou une distance donnée. Ainsi, avec les courbes isochrones de 5mn, 10mn, 15mn, nous avons une idée précise des destinations accessibles dans un laps de temps et au départ d'un point donné. Ce type d'accessibilité est souvent utilisé pour qualifier l'accès à des équipements, des services ou à des organismes de secours ou d'urgence (pompier, ambulance, etc.) afin de bien « quadriller » le territoire. Ce type d'accessibilité est utilisé aussi pour l'établissement de Plan de déplacement d'établissement (PDE) pour évaluer l'accessibilité des employés à un établissement.

Cette méthode est très visuelle. Elle peut-être développée à l'aide d'un SIG et d'un module dédié à l'analyse des réseaux ou bien à l'aide d'un logiciel spécialisé dans la planification des transports (comme par exemple VISUM, CUBE, EMME2). Les modèles de transport sont plus complets car ils permettent des analyses plus fines. La meilleure solution est d'utiliser les deux applications car les résultats issus d'un modèle de transport peuvent être réintégrés dans un SIG. En effet, l'utilisation des SIG offre plus d'opportunités d'analyse spatiale et de croisement des couches thématiques avec les couches isochrones. Des exemples d'applications d'accessibilité isochrones sont présentés dans les Figures 2 et 3. Ils sont issus du projet PLAINSUDD-MOSART :

- La Figure 2 présente une accessibilité isochrone simple avec les transports en commun. Le point de départ est la station Vieux-Lyon avec un crédit-temps de 30 mn et des isochrones toutes les 5 mn ;

- La Figure 3 illustre un scénario d'accessibilité de la périphérie Est de Lyon vers le centre ville (zone de la Part Dieu) avec les transports en commun et un budget temps déterminé. Dans cette étude, nous avons voulu étudier la mise en place d'une nouvelle infrastructure de transport, une ligne de tramway (T3). Ce nouvel équipement offre plus de possibilités d'atteindre le centre ville à partir de la zone de Meyzieu.

Dans cet exemple, nous avons combiné l'accessibilité avec le réseau des vélo'V de la ville de Lyon². Le résultat de cette simulation est présenté sur la Figure 3. Nous y voyons, figurées par un vélo, l'emplacement des stations Vélo'V, mais aussi, représentées par des hachures rouges, la zone accessible par un voyageur qui souhaiterait,

2. Depuis 2006, a en effet été mis en place un système de vélos en libre service appelé Velo'V (340 stations).

Figure 2
**Accessibilité isochrone en transport en commun
 dans l'agglomération lyonnaise**

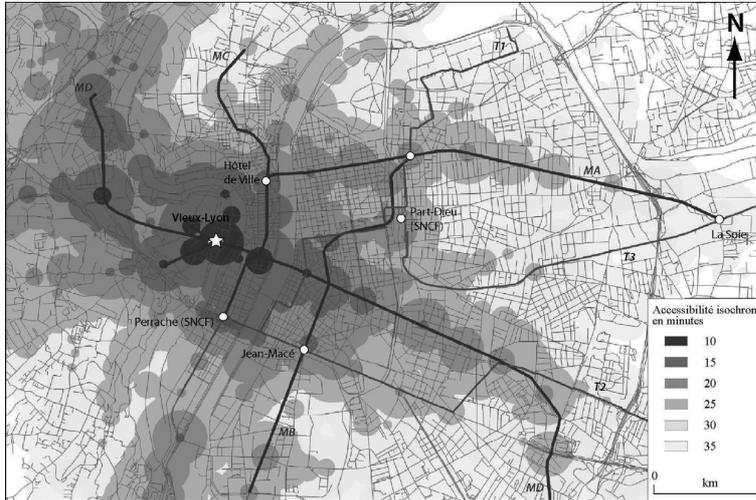
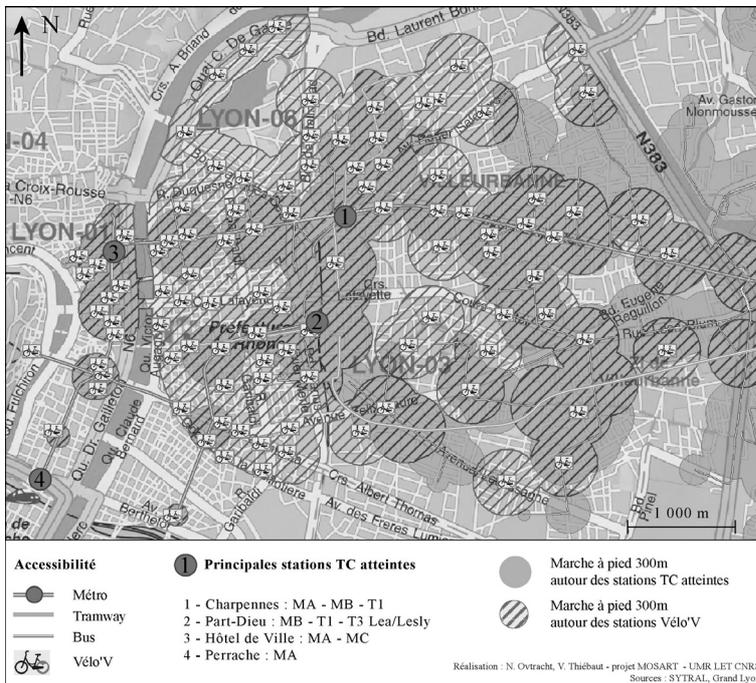


Figure 3 (voir le hors-texte en couleurs)
**Accessibilité isochrone en utilisant les transports en commun
 et les stations Vélo'V de Lyon**



après son trajet en transport en commun, recourir à un vélo en libre service pour étendre sa zone accessible, tout en restant dans l'enveloppe d'un budget temps déterminé.

Bien qu'il s'agisse d'un mode lent (moyenne de 12 km/h), il apparaît que le vélo accroît sensiblement la zone accessible en autorisant notamment l'accès à des zones relativement éloignées des stations de métro (des zones qui seraient inaccessibles à pied dans la mesure où, pour des raisons de confort, nous avons, par construction, limité à 300 mètres la distance effectuée à pied). La Figure 3 tient compte de l'emplacement des stations Vélo'V pour l'emprunt mais aussi pour la restitution du vélo en libre service. De ce fait, certaines zones sans station sont en dehors de la zone accessible. D'une certaine façon, le SIG indique les zones où il serait nécessaire d'implanter de nouvelles stations.

Mais l'intérêt de MOSART va au-delà d'une présentation de l'accessibilité spatiale. Anticipant quelque peu sur la logique de l'accessibilité gravitaire, nous pouvons nous intéresser à l'accès aux diverses « masses attractives » d'une zone, notamment le nombre d'habitants, les commerces et les emplois. A l'aide des fonctions du SIG, nous pouvons croiser les couches des bases de données spatiales concernant les isochrones calculés et celles de la localisation des populations.

2. L'ACCESSIBILITÉ GRAVITAIRE

Les mesures gravitaires sont parmi les plus fréquemment mentionnées dans la littérature. Bien qu'apparu en sciences sociales dès le milieu du 19e siècle, il faut attendre les années 1950 pour que le concept d'accessibilité soit véritablement utilisé, notamment dans plusieurs travaux sur le développement urbain et la localisation spatiale.

2.1. Présentation générale

C'est W.G. Hansen (1959) qui, le premier, s'est attaché à mobiliser l'accessibilité gravitaire pour concevoir et mesurer les impacts de l'évolution des systèmes de transport sur l'utilisation de l'espace. Il conçoit l'accessibilité gravitaire comme une mesure de la séparation spatiale des activités autour d'un point, ajustée par la capacité et la volonté des individus, ou des firmes, de franchir cette barrière spatiale. Ainsi, selon E. Bloy *et al.* (1977) l'accessibilité gravitaire « repose sur l'idée que la répartition des trafics entre zones dépend des “masses attractives” de chaque zone et des difficultés de liaisons entre les

centroïdes ». L'accessibilité depuis la zone i aux emplois localisés dans la zone j , est donc directement proportionnelle au nombre d'emplois de la zone j et inversement proportionnelle à la distance séparant les deux zones. L'accessibilité gravitaire apparaît ainsi comme le produit de deux facteurs antagonistes que sont la présence d'opportunités (emplois, logements, lieux de loisirs), qualifiées « d'éléments moteurs du déplacement », et le coût du déplacement (distance, temps généralisé ou coût généralisé) envisagé comme « l'élément résistant du déplacement » (Koenig, 1974). On retrouve ainsi une certaine analogie entre ces mesures de l'accessibilité et le modèle gravitaire courant en économie spatiale ou en géographie. Deux « corps » de masses différentes s'attirent avec une force proportionnelle à chacune des masses, et inversement proportionnelle au carré de la distance qui les sépare. De façon générale, l'accessibilité gravitaire prend la forme suivante :

$$A_i = \sum_{j=1}^n D_j e^{(-\beta C_{ij})}$$

où D_j est le nombre d'emplois dans la zone j , C_{ij} est le coût généralisé du déplacement entre les zones i et j , avec $C_{ij} = P_{ij} + vT_{ij}$ où P_{ij} correspond au coût monétaire, v à la valeur du temps et T_{ij} au temps de déplacement, β un est paramètre traduisant la sensibilité des individus au coût généralisé, et n est le nombre de zones.

Parmi les questions soulevées par l'utilisation des mesures d'accessibilité gravitaire, la question de la sensibilité des individus au coût généralisé et celle de la prise en compte de la congestion méritent d'être explicitées.

2.2. Considérations méthodologiques

La formule de l'accessibilité gravitaire pondère le coût généralisé par un paramètre de sensibilité (également défini comme un coefficient de conductance) généralement appelé le paramètre beta (β). Ce dernier représente la plus ou moins grande résistance au coût du déplacement. La valeur du paramètre β s'obtient par le calage du modèle gravitaire à partir des comportements observés sur l'aire d'étude considérée, soit, pour nous, le périmètre de l'Enquête ménages déplacements (EMD) réalisée à Lyon en 2006.

2.2.1. La sensibilité des individus au coût généralisé

Les valeurs prises par le paramètre de sensibilité varient en fonction des motifs de déplacement. La valeur pour le motif « domicile-

travail » qui nous intéresse dans ce chapitre est estimée à -0.18. Nos résultats montrent que les individus sont moins sensibles au coût du déplacement pour se rendre sur leur lieu de travail que pour d'autres motifs, notamment en heures de pointe. Ces résultats peuvent s'expliquer sans doute par le périmètre d'étude à partir duquel ont été calculés ces coefficients. Les individus semblent réticents à parcourir de longues distances pour rejoindre un lieu différent de leur emploi qu'ils pourraient trouver à proximité de leur domicile (commerce, loisirs) alors qu'ils sont davantage enclins à accepter des temps de déplacement plus élevés pour se rendre sur leur lieu de travail.

2.2.2. Prise en compte de la congestion automobile par un modèle de transport

Le temps de déplacement constitue une variable clé dans la mesure d'accessibilité. Son estimation se doit dès lors d'être la plus précise possible. Dès lors, le temps de transport automobile ne doit pas être calculé sur un réseau vide mais doit, au contraire, intégrer l'impact de la congestion sur les conditions de déplacement. Ainsi, un modèle de transport est mis en place sur notre périmètre d'étude afin de modéliser le trafic automobile sur les différents tronçons du réseau routier (Ortuzar et Willumsen, 2001). Ce type de modèle appelé couramment « modèle à quatre étapes » (cf. le Chapitre 2, point 3.2, et les chapitres 3 et 4 consacrés à SIMAURIF et SIMBAD) est généralement utilisé dans le cadre de la prévision de demande de transport et de simulations de trafic à un horizon plus ou moins lointain. Nous l'utilisons dans notre travail pour simuler les conditions de circulation « actuelles » à partir des vitesses et donc du niveau de trafic. Ce modèle est réalisé en heure de pointe et en heure creuse. Les « 4 étapes +1 » du modèle sont les suivantes :

1. La génération des déplacements produit les émissions et les attractions de chaque zone de l'aire d'étude. Cinq motifs de déplacement sont définis de façon à intégrer l'ensemble des déplacements possibles : « Domicile vers travail », « Domicile vers autre motif³ », « Travail ou autre motif vers autre motif », « Travail ou autre motif vers domicile » et « Travail ou autre motif vers travail ». L'estimation est réalisée à partir d'un modèle linéaire et des variables socio-économiques suivantes : nombre d'actifs, d'étudiants, de ménages. Les données proviennent de deux différentes enquêtes : l'EMD réalisée

3. Par l'expression « Autre motif » nous entendons un déplacement pour un motif autre que le travail ou le retour au domicile.

sur l'aire métropolitaine lyonnaise 2006 et le Recensement général de la population (RGP) réalisé sur l'ensemble du territoire national en 1999 ;

2. L'étape de distribution des déplacements vise à calculer le volume de déplacements tous modes confondus entre chaque couple de zones de l'aire d'étude. Elle utilise les données produites par l'étape de génération et un modèle de distribution (un modèle gravitaire) avec la fonction combinée suivante : $f(U) = aU^b e^{-cU}$ sachant que a , b et c sont des paramètres et U le temps de transport automobile sans congestion. Le processus de calibration a été réalisé à partir de la distribution des déplacements issue de l'EMD ;

3. Le choix modal détermine la distribution des déplacements pour chaque mode. Quatre modes de transport sont pris en compte : automobile (VP), transports en commun (TC), deux-roues et marche à pied (MAP). Le choix modal est estimé à partir d'un modèle Logit. Les déplacements automobiles représentent plus de 50 % des déplacements. 18 % des déplacements sont réalisés en transports en commun, 16 % en deux-roues et 12 % à pied ;

4. L'affectation répartit les trafics sur les différents tronçons à partir de la distribution issue du choix modal à partir d'un équilibre de Wardrop (Wardrop, 1952) entre les différentes options : il y a égalité des coûts entre les différentes options utilisées par les usagers et, de ce fait, équilibre entre les différents usagers qui les empruntent. Cet équilibre a été préféré à un équilibre stochastique correspondant à l'adéquation entre le coût prévu par les usagers et le coût réel d'un itinéraire : il y a équilibre pour l'utilisateur entre son choix et le coût de l'option. Contrairement à l'équilibre stochastique, l'équilibre de Wardrop se focalise davantage du côté de l'offre (du réseau) et de son niveau de service (congestion) que du côté de la demande (l'utilisateur pris individuellement) ;

5. Suite à la première itération, une seconde itération, à partir de l'étape de distribution, est alors réalisée à partir des temps de parcours en charge (McNally, 2008) afin de prendre en compte un éventuel report modal de l'automobile vers les autres modes. La prise en compte du niveau de congestion automobile dans la deuxième itération se traduit par un report modal de l'automobile vers les autres modes avec, sur l'ensemble des déplacements, une baisse de 28 % des déplacements VP, une hausse de 91 % des déplacements TC, une hausse de 103 % des déplacements MAP, et une hausse de 61 % des déplacements en deux-roues.

2.3. Résultats

Dans cet exemple, nous appliquons le calcul d'accessibilité gravitaire aux emplois pour la zone du Grand Lyon (55 communes). La zone d'étude est divisée en 2122 cellules de 500 m de côté. Pour chacune de ces cellules, le nombre d'emplois est estimé à partir du nombre d'emplois par IRIS (correspondant à des quartiers de 2000 à 3000 habitants). Le coût temporel du déplacement est envisagé comme le produit du temps de parcours et d'une valeur du temps de 11,4 €/h (Commissariat Général du Plan, 2001). Le coût monétaire d'un déplacement automobile correspond à un coût kilométrique de 0,49 € et celui d'un déplacement en transports en commun correspond au prix d'un ticket à l'unité (1,50 €). Le coût généralisé des déplacements « domicile-travail » est pondéré par un paramètre estimé à -0.18.

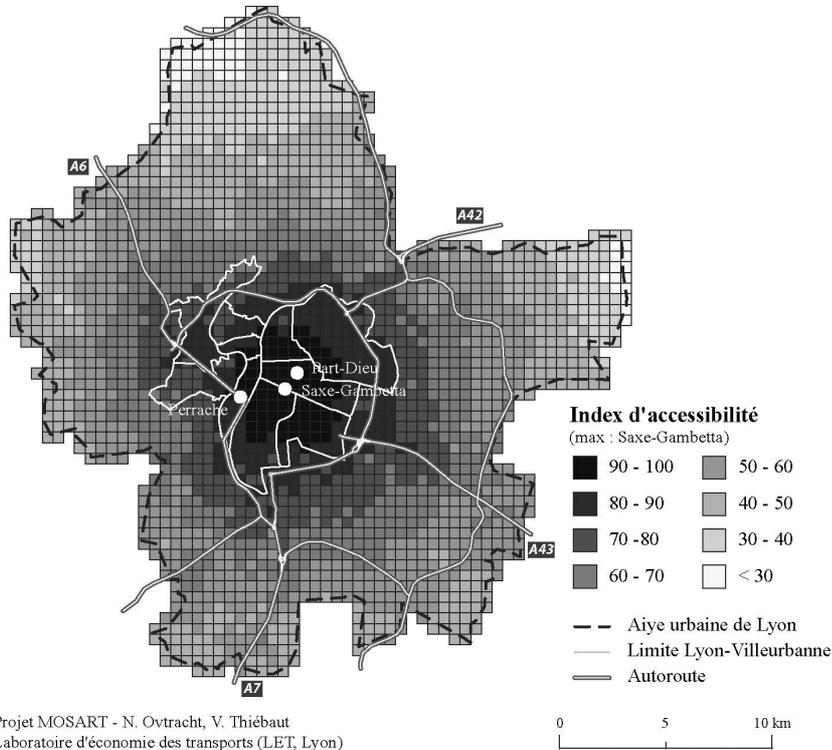
Les Figures 4, 5 et 6 illustrent l'indice d'accessibilité gravitaire depuis chacune des zones de l'aire d'étude au reste du territoire. Plus une zone apparaît en foncé, meilleur est le niveau d'accessibilité. La Figure 7 représente un différentiel d'accessibilité entre l'automobile et les transports en commun. Lorsqu'une zone apparaît en rouge le niveau d'accessibilité est meilleur en transports en commun qu'en voiture particulière (inversement lorsqu'une zone apparaît en bleu).

2.3.1. Une accessibilité différenciée en fonction de l'heure de pointe et de l'heure creuse

Nous nous intéressons dans un premier temps à l'accessibilité (gravitaire) en voiture particulière pour analyser l'impact de la période de la journée sur le niveau d'accessibilité. La Figure 4 illustre ainsi, pour chacune des cellules, l'indice d'accessibilité en heure creuse. On observe une représentation concentrique de l'accessibilité autour de la zone centrale de Saxe-Gambetta. La concentration des emplois dans ces quartiers centraux, associée à un réseau routier très maillé, est essentielle pour expliquer ces résultats. Les actifs résidant à proximité de ces emplois, ou bien pouvant y accéder rapidement, bénéficient donc d'une accessibilité meilleure que ceux résidant dans les zones plus éloignées en termes de temps de parcours. L'absence de congestion sur le réseau ne fait que renforcer ce constat.

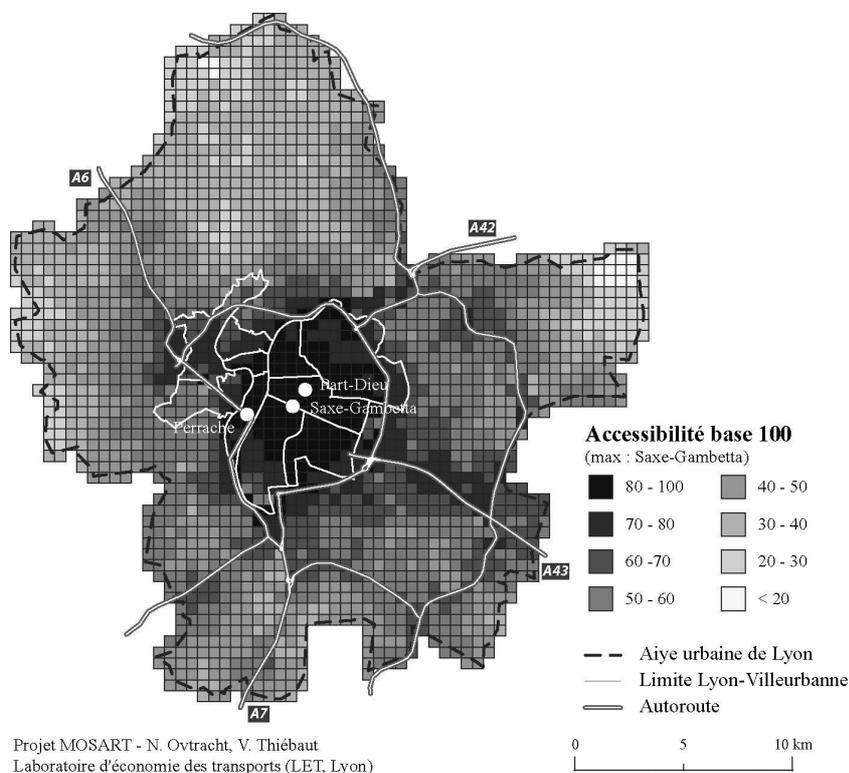
Les mêmes calculs sont réalisés dans la Figure 5 mais en heure de pointe, en intégrant un certain niveau de congestion ce qui met en évidence des niveaux d'accessibilité différents de ceux obtenus en heure creuse. La baisse des vitesses automobiles et la formation de points de congestion modifient sensiblement la représentation cartographique de l'accessibilité. La structure en cercles concentriques

Figure 4
Accessibilité aux emplois en voiture particulière en heure creuse



(observée en heure creuse) laisse place à une structure comparable à des « doigts de gants ». Si, en heure de pointe, les zones centrales de Lyon conservent le niveau d'accessibilité le plus élevé, ce n'est plus tant la distance au centre qui impacte le niveau d'accessibilité que la proximité des zones aux infrastructures routières et autoroutières structurantes ainsi qu'à leurs échangeurs. De tels résultats peuvent être utilisés dans le cadre de politiques urbaines et de transport. Ainsi, au vu de la Figure 5, les politiques pourraient être tentés de favoriser l'implantation d'infrastructures autoroutières pour améliorer l'accessibilité. Toutefois, en favorisant l'allongement des distances parcourues (dans l'hypothèse de budget temps de transport constants ; Zahavi et Talvitie, 1980), ce type de politique entretiendrait l'étalement urbain. Dès lors, comme on l'observe dans les villes américaines, la ville centre se limiterait à un rôle de centre d'emploi ou l'habitat n'aurait plus sa place. Le dynamisme de la ville centre se trouverait remis en cause.

Figure 5

Accessibilité aux emplois en voiture particulière en heure de pointe

2.3.2. Accessibilité en transports en commun et concurrence modale

Suivant la même méthode que précédemment, l'indice d'accessibilité en transports en commun urbains est calculé (en période de pointe). Si, de façon générale, l'indice d'accessibilité tend à diminuer avec la distance au centre, l'évolution spatiale est irrégulière. Tout comme pour l'accessibilité automobile en heure de pointe, on retrouve une structure en « doigts de gants » soulignant l'impact de la structure du réseau de bus et de tramway sur le niveau d'accessibilité. Cette structure non isochrone s'explique par la présence de lignes caractérisées par une vitesse commerciale et des fréquences élevées au centre-ville, comme les lignes de métro par exemple. Notons aussi l'importance des lignes de tramway, et de la localisation de leurs arrêts, en particulier la ligne « T-LEA » qui, du fait de son itinéraire en zone périurbaine, a une vitesse commerciale supérieure à 20 km/h. La très faible accessibilité des zones localisées aux frontières de l'aire d'étude

est à relier à l'absence de ligne de transports en commun, en raison notamment de leur éloignement au centre-ville.

Intéressons-nous maintenant au différentiel d'accessibilité entre la voiture particulière et les transports en commun en heure de pointe. La comparaison des niveaux d'accessibilité aux emplois entre la voiture particulière et les transports en commun, est favorable au mode collectif (soit supérieure, soit de même niveau) en heure de pointe pour la quasi-totalité de l'aire d'étude (cf. Figure 7) et plus particulièrement pour les zones centrales. Ce constat s'explique par la présence de cinq lignes de transports en commun en site propre (lignes de métro, de funiculaire et de tramway) qui irriguent la ville de Lyon et certaines de ses zones périphériques. Les vitesses offertes par ces lignes sont indépendantes du niveau de congestion routière et, en période de pointe, se révèlent supérieures aux vitesses automobiles. Ce résultat souligne que l'implantation de lignes de transports en commun performantes constitue la seule solution pour maintenir un niveau

Figure 6

Accessibilité aux emplois en transports en commun en heure de pointe

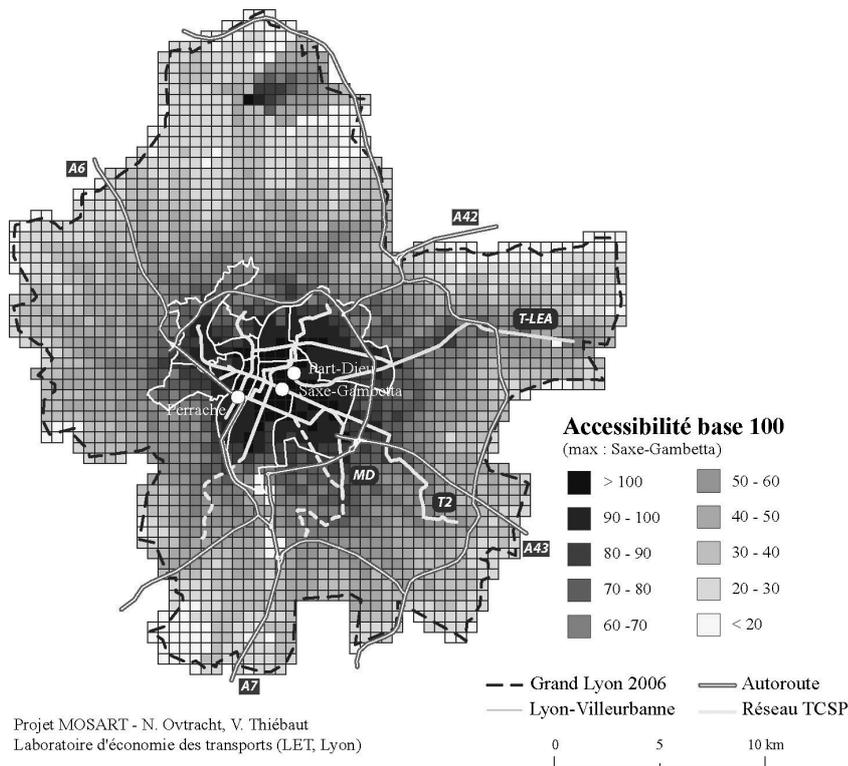
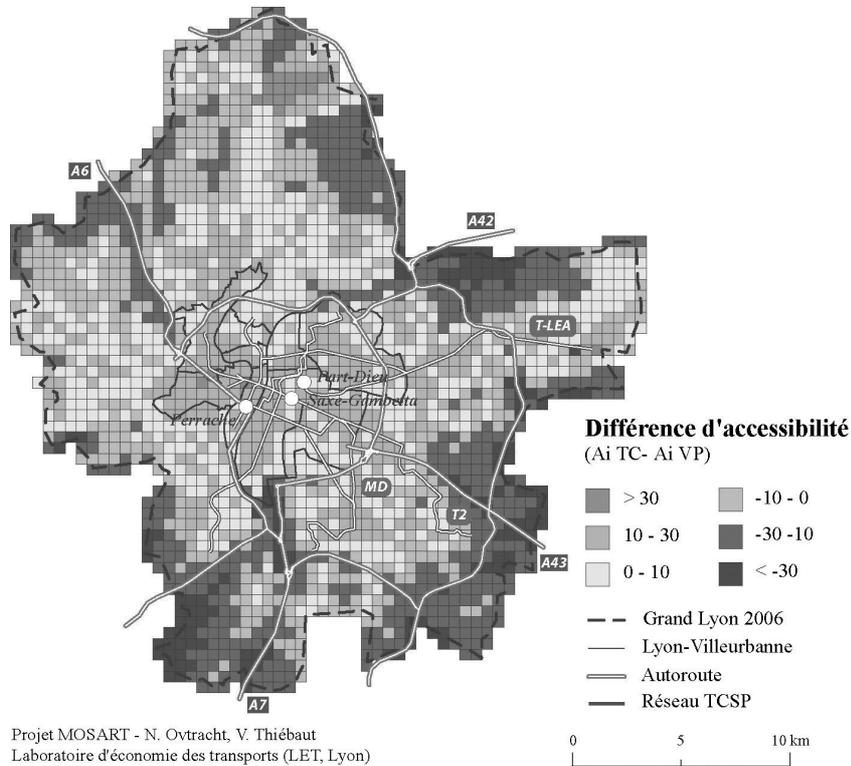


Figure 7 (voir le hors-texte en couleurs)
Différentiel d'accessibilité TC-VP en heure de pointe



d'accessibilité constant dans les zones denses (comme en centre-ville) en dépit de la congestion automobile. L'autorité organisatrice des transports urbains de l'agglomération lyonnaise a ainsi décidé de développer davantage les transports en commun en site propre tels le tramway mais aussi des lignes de bus à haut niveau de service.

Cependant, si les transports collectifs offrent une meilleure accessibilité que la voiture particulière en centre-ville, nous observons qu'ils peuvent également se révéler plus performants dans certaines zones périurbaines. Ce sont certes la présence de lignes de transports en commun en site propre qui expliquent ces résultats mais également la forte congestion routière sur différents points de l'aire d'étude. Nous notons toutefois, que c'est logiquement l'automobile qui offre la meilleure accessibilité pour les zones à la frontière de l'aire d'étude. D'une part ces zones sont relativement mal reliées à la ville centre qui concentre la majorité des emplois. D'autre part, ces zones sont souvent localisées à proximité d'échangeurs autoroutiers.

Dotés d'une telle carte indiquant les différentiels d'accessibilité, nous pouvons nous tourner vers les décideurs publics et leur poser une question simple : que souhaitez-vous faire à moyen et long terme ? Etendre la part relative des zones « bleues » ou celle des zones « roses et rouges » ? Il est fort possible que chacun se surprenne à souhaiter l'une ou l'autre de ces deux possibilités selon les circonstances. En tant qu'automobiliste, il est tentant de préférer le bleu, ce qui signifie créer de nouvelles voiries rapides. Mais en se souvenant des effets probables de ce phénomène sur la ville, et sur la congestion routière, l'intérêt collectif invite au contraire à faire fond sur les transports collectifs, les seuls à même d'améliorer ou au moins de maintenir le niveau d'accessibilité dans les zones denses. On ne sera donc pas surpris d'apprendre que l'autorité organisatrice des transports de l'agglomération lyonnaise, le SYTRAL, ait choisi de développer quatre nouvelles lignes de tramway ouvertes par étapes de décembre 2000 à avril 2009. Et il n'est pas anodin de remarquer que ces lignes desservent toutes l'Est ou le Sud de l'agglomération. L'arbitrage que révèlent les priorités en matière d'accessibilité n'est donc pas seulement un choix patrimonial pour promouvoir l'attractivité du centre ville, où vivent essentiellement des catégories sociales aisées, du fait du prix du foncier. Dans la mesure où les transports collectifs coûtent cher et sont financés par l'ensemble des communes de l'agglomération, un arbitrage a été fait en faveur des quartiers plus populaires de l'Est lyonnais.

Ainsi, ce que révèlent ces cartes est simple. Les politiques publiques ne peuvent plus s'épuiser à maintenir l'accessibilité automobile sur des espaces toujours plus vastes. Elles doivent au contraire, en articulation avec les politiques déjà conduites dans les villes centres des agglomérations pour développer les transports en commun, se soucier de favoriser l'amélioration de l'accessibilité en transport en commun pour les relations centre périphérie. Cela maintient dans la ville centre la présence concomitante d'emplois, d'activités commerciales et de résidents, tout en évitant la coupure spatiale, temporelle et sociale avec la périphérie. Ainsi, au-delà des frontières administratives, de plus en plus formelles, la ville, au sens d'aire métropolitaine, conserve son unité fonctionnelle.

3. MOSART : UN OUTIL POUR APPRÉHENDER LA LOCALISATION DES MÉNAGES ET DES COMMERCES

Des recherches pluridisciplinaires récentes ont permis d'aboutir à une meilleure appréhension de l'espace (Brossard *et al.*, 2007), concernant notamment l'analyse des choix de localisation des acteurs (firmes

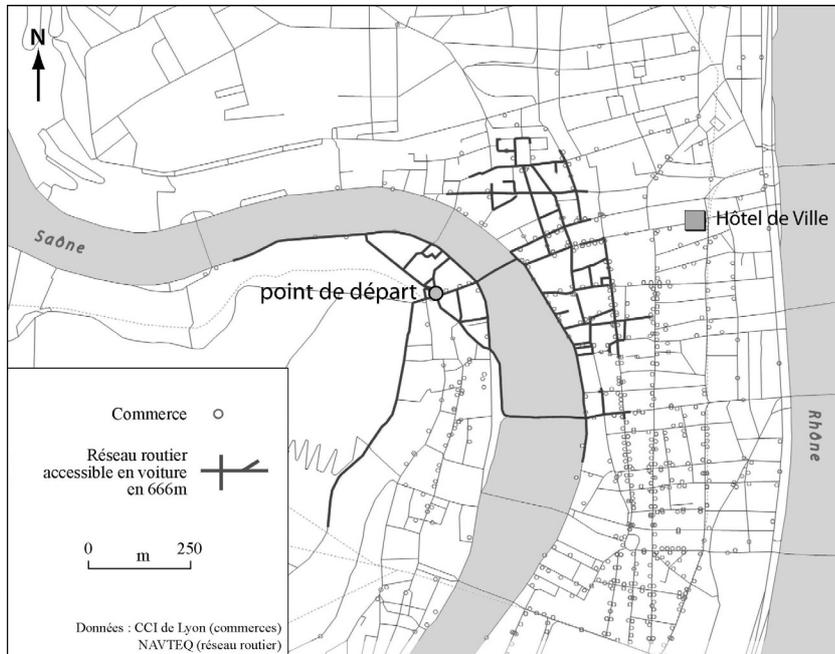
et ménages). Bien que l'intérêt porté à la thématique de la localisation des activités ne soit pas nouveau (Combes *et al.*, 2006), MOSART semble pouvoir contribuer significativement à ce champ de recherche. Cette plate-forme est d'une part utile pour quantifier le plus précisément possible l'accessibilité aux commerces. D'autre part, grâce à l'intégration de variables socio-économiques, MOSART apparaît pertinent pour décrire l'environnement des agents. Nous présentons ci-dessous plusieurs pistes de recherches actuellement développées par le LET. La première est centrée sur l'accessibilité aux commerces, la seconde s'intéresse à la localisation des ménages et à ses relations avec le prix du foncier.

3.1. Évaluation de la structure spatiale des activités commerciales

Depuis quelques années, le LET a proposé différentes avancées théoriques et empiriques concernant la localisation des activités commerciales. Ces recherches visent par exemple à identifier des lieux au sein des villes où l'implantation de nouvelles activités commerciales serait profitable (Jensen, 2006). Des études complémentaires sont également menées pour analyser les interactions existant entre différents types de commerces. Sur l'aire urbaine de Lyon, nous avons ainsi mis en évidence que certaines activités commerciales de détail dans les secteurs alimentaires ou non alimentaires semblent « s'attirer » ou au contraire « se repousser » spatialement (Jensen et Michel, 2009). L'utilisation de MOSART permet d'améliorer la prise en compte de l'espace pour comprendre ces « schémas sous-jacents » de localisation commerciale. En effet, les outils quantitatifs en économie spatiale ont récemment été améliorés pour évaluer les phénomènes d'agglomération ou de dispersion des activités économiques aux niveaux intra- et inter-industriel (Duranton et Overman, 2005 ; Marcon et Puech, 2010). Ces mesures permettent d'apprécier les degrés de concentration (ou de dispersion) des activités au sein des territoires à partir des distances inter-établissements et non plus à partir de découpages prédéfinis (arrondissements, zones d'emploi, etc.), plusieurs recherches ayant souligné que les zonages pouvaient générer des biais dans les estimations (Arbia, 1989 ; Combes et Overman, 2004).

Par conséquent, nous continuons actuellement nos recherches pour quantifier l'accessibilité réelle des commerces sur l'aire urbaine de Lyon à partir des distances routières séparant les magasins pour différents modes de transport. Nous retenons pour cela tout d'abord les emplacements individuels géolocalisés des commerces grâce à une collaboration avec la Chambre de commerce et de l'industrie (CCI)

Figure 8
Exemple d'accessibilité commerciale à Lyon



de Lyon. Puis, la plate-forme MOSART est mobilisée pour le calcul des plus courts chemins entre tous les commerces à partir du réseau routier. Il convient de souligner que les contraintes sur le réseau (sens interdits, etc.) sont alors respectées pour chacun des modes de transport retenus (transport en commun, voiture particulière ou marche à pied). A titre d'exemple, la Figure 8 illustre l'accessibilité commerciale depuis la Gare Saint Paul en 666 mètres pour une voiture particulière.

Les résultats obtenus suggèrent qu'une analyse territoriale très précise semble pleinement justifiée. Tous les commerces proches de la Gare Saint Paul ne sont pas accessibles en voiture du fait de l'existence de zones piétonnes (quartier du Vieux Lyon au Sud de la Gare) ou de contraintes naturelles (passage de la Saône). La prise en compte du réseau semble donc essentielle pour évaluer le plus précisément possible l'accessibilité des différents magasins, variable importante dans les stratégies de localisation des commerces.⁴

4. Une analyse complémentaire est proposée dans Puech *et al.* (2009).

3.2. Impact des réseaux de transports collectifs sur les prix immobiliers.

D'après le modèle standard de l'économie urbaine (Fujita, 1989), le choix de localisation des ménages est fonction de plusieurs facteurs. Un premier facteur est relatif à l'accessibilité au(x) pôle(s) d'emploi à partir de la localisation retenue. Ce choix est aussi fonction des caractéristiques propres du logement (superficie, nature du logement, confort, etc.) et facteurs définissant l'environnement de ce même logement. Ces derniers renvoient à des aménités centrales (biens collectifs, style architectural, etc.) et à des aménités environnementales (paysages, absence de vis-à-vis, espaces verts, etc.). Le logement est donc 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 (Rosen, 1974) se donne pour objectif d'évaluer les effets propres de ces caractéristiques sur le niveau du prix des biens fonciers et immobiliers.

Cette hypothèse de capitalisation a fait l'objet de nombreux travaux particulièrement aux Etats-Unis (cf. état de l'art présenté par G. Deymier (2005)). Les travaux sont en revanche moins nombreux en France. Parmi ceux-ci, dans le cas français, certains se sont attachés à estimer l'impact sur les prix de l'immobilier de l'aménagement urbain récent (Beckerich, 2000) et ancien (Cléménçon *et al.*, 2003), de la construction d'un périphérique en milieu urbain avec le cas de tronçon périphérique nord de Lyon (Deymier, 2005), de la mise en service du tramway Val de Seine (H. Jayet et S. Kazmierczak, 2003 ; Boucq 2008). De manière plus récente, d'autres recherches visent aujourd'hui à évaluer le prix du paysage dans le cas de logements périurbains par la construction d'indices paysagers quantitatifs (Brossard *et al.*, 2007).

Pour mesurer l'impact des réseaux des transports sur les prix immobiliers, nous avons mobilisé l'outil MOSART pour calculer des temps de parcours selon différents modes de transport (voiture particulière, transports collectifs (bus, métro, tramway)), en heure de pointe, et pour différentes zones de l'aire urbaine. Nous avons ensuite rapproché d'une part les temps de parcours de chaque cellule de l'aire urbaine vers les trois pôles de l'agglomération lyonnaise (Perrache, Part-Dieu et Bellecour), et d'autre part les valeurs foncières constatées dans les transactions notariées, qui ont été spatialisées. Le modèle économétrique estimé est du type :

$$\log P = \alpha \log surf + \beta \log \text{accessibilité} + \gamma X + \varepsilon$$

Figure 9 (voir le hors-texte en couleurs)
**Répartition spatiale des transactions d'appartements anciens
 et niveaux des prix sur Lyon Villeurbanne**



où P représente les prix, X le vecteur des autres caractéristiques des biens immobiliers et ϵ les résidus. Le recours à une expression logarithmique permet de mettre en évidence certaines élasticités.

Sur la base de ces résultats (Figure 9), il apparaît que les estimations produites sur les trois pôles retenus sont largement significatives. Les modèles, indépendamment des modes de transport retenus, expliquent plus de 80% de la variance totale du logarithme du prix des logements. Pour un très grand nombre d'entre elles, les variables sont significatives dans les différents modèles testés. Les élasticités entre prix et surface sont légèrement supérieures à l'unité (1,01 dans le cas de l'accessibilité en voiture particulière à Bellecour en heure de pointe et 1,06 dans le cas de l'accessibilité en métro à Part Dieu).

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 ; Boucq, 2008) 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. Comme nous l'avons

indiqué dans la partie relative à la présentation du réseau de TC de Lyon, celui-ci est l'un des premiers réseaux de province en termes d'offre. Il reste en revanche très en retrait par rapport à celui de l'aire métropolitaine de Paris ;

– 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.

La construction des variables d'accessibilité en temps a fait l'objet dans la présente recherche d'une attention particulière. Comme indiqué dans la partie relative à sa présentation, le modèle MOSART a retenu un niveau de modélisation fin et détaillé de l'ensemble des réseaux dédiés aux déplacements en voiture particulière et des réseaux de transports collectifs dans leurs différentes spécificités (tramway, métro, bus) et de leurs connexions. On peut donc considérer, par rapport à d'autres travaux, que 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 $-0,16$. En termes de prix hédonique, le gain de temps en voiture particulière en heure de pointe se traduirait par une valorisation des logements comprise entre 1651 et 2432 euros. 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 se rendre à l'un des pôles retenus), ces élasticités sont là aussi significatives. Elles sont plus légèrement faibles que celles obtenues pour les déplacements en transport individuel en heure de pointe. Elles sont comprises entre $-0,21$ (accessibilité à Bellecour) et $-0,13$ (accessibilité à part Dieu). Ces valeurs sont proches de celles obtenues par H. Jayet *et al.* (2003) qui montraient une valeur d'élasticité du prix au temps de transport en TC de $-0,14$ dans le cas du tramway Val de Seine. Les prix hédoniques, dans ce cas, sont compris entre 595 et 1530 euros par minute en transports collectifs. Ces élasticités-prix au temps de transport sont proches si l'on retient le métro ou le tramway comme modes principaux de déplacement au titre des transports collectifs.

Des développements sont en cours, tant au niveau de MOSART que du modèle économétrique testé. L'introduction d'indices d'accessibilité gravitaire en substitution des temps de parcours est envisagée. La prise en compte du phénomène d'auto-corrélation spatiale passe par la mobilisation des outils de l'économétrie spatiale.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Il nous paraît donc important de développer, dans les évaluations des projets de services ou d'infrastructures de transport, l'usage des cartes et des indicateurs d'accessibilité gravitaire. Ces derniers, bien que dérivant d'un calcul économique réputé inaccessible aux non-spécialistes, sont immédiatement compréhensibles et aident à poser les bonnes questions. Ils permettent notamment de comprendre pourquoi, du fait de la congestion routière et de la spirale qui s'est instaurée entre l'offre de voirie et la demande de trafic, l'automobile est entrée, en zone urbaine, dans une logique de rendements décroissants. Pour ne pas se retrouver pris au piège, pour échapper à la nasse d'une congestion routière qui menace à terme la durabilité même de la ville, les politiques publiques se sont orientées vers d'autres moyens de maintenir ou de développer l'accessibilité. Pour cela, elles abandonnent progressivement la seule dimension « transport », et donc les objectifs de vitesse offerte par les routes ou les transports en commun. Sans être négligées, ces questions sont de plus en plus placées au second rang, derrière les questions de densité, de fiabilité, de fréquence, de disponibilité. Jusqu'à redécouvrir que la première des priorités n'est pas ce qui est offert individuellement aux personnes qui se déplacent, mais ce en quoi telle amélioration de l'accessibilité propose un usage durable de l'espace, un usage conforme à l'intérêt général. Le fait que l'accessibilité gravitaire donne des indications sur ce qu'est l'intérêt général ne doit pas surprendre, c'est une illustration du fait que le calcul économique n'est pas devenu inutile, il doit simplement être resitué dans une logique spatiale et collective, et non pas dans la seule perspective individuelle des gains de temps.

Remerciements. Les auteurs remercient les différents financeurs du projet : le SYTRAL, la DIACT, le PREDIT, l'ANR « Villes Durables » dans le cadre du projet PLAINSUDD (PLAteformes numériques INnovantes de Simulation Urbaine pour le Développement Durable) et le pôle de compétitivité LUTB (*Lyon Urban Truck & Bus*).

Références bibliographiques

- Arbia G., 1989, *Spatial data configuration in statistical analysis of regional economic and related problems*, Kluwer.
- Beckerich C., 2000, *Biens publics et valorisation immobilière*, Thèse de doctorat en sciences économiques, Université Lyon II, Laboratoire d'Economie des Transports, 290 p.
- Ben-Akiva M., Lerman S., 1985, *Discrete choice analysis : theory and application to travel demand*, MIT Press.

- Ben-Akiva M., Lerman S., 1979, Disaggregate travel and mobility choice models and measures of accessibility. In : Hensher, D.A., Stopher, P.R. (ed.), 1979, *Behavioural travel modelling*, Croom Helm, London, pp. 698-710.
- Bloy E., Bonnafous A., Cusset J.-M., Gerardin B., 1977, *Evaluer la politique des transports*, Presses Universitaires de Lyon.
- Bonnafous A., Masson S, 2003, Evaluation des politiques de transports et équité spatiale, *Revue d'Economie Régionale et Urbaine*, 4, pp. 547-572.
- Boucq E., 2008, *Evaluation économique d'une infrastructure de transport en milieu urbain*, Thèse de doctorat, Université des sciences et technologies de Lille.
- Brossard T., Joly D., Tourneux F.P., Cavaillès J., Hilal M., Wavresky P., Le Gallo J., Géniaux G., Napoleone C., Jayet H., Ovtracht N., Péguy P.Y., 2007, *La valeur économique des paysages des villes périurbanisées*, Economie Publique.
- Burrough P.A., McDonnell R.A., 1998, *Principals of Geographical Information Systems*, Oxford University Press.
- Clemençon, A.S., Ovtracht N., Péguy P.Y., 2003, *Une analyse économique et architecturale des formes urbaines—Lyon au 19e siècle, rapport final*, Rapport de recherche, ISH, 53 p.
- Combes P.P., Mayer T., Thisse J.F., 2006, *Economie géographique. L'intégration des régions et des nations*, Economica.
- Combes P.P., Overman H., 2004, The spatial distribution of economic activities in the European Union. In : J.V. Henderson, J.F. Thisse (ed.), 2004, *Handbook of Urban and Regional Economics*, Volume 4, Elsevier, pp. 2845-2909.
- Commissariat Général du Plan, 2001, *Transports : choix des investissements et coût des nuisances*, La Documentation française.
- Crozet Y., Ovtracht N., Thiebaut V., 2008, MOSART : Building a decision making tool for private and public urban mobility authorities, *International Conference on Mobility and Transport (Mobil.TUM)*, Munich, Germany.
- Crozet Y., Marchal F., Ovtracht N., Thiebaut V., Yvon C., Bischoff P., 2008, Mise en place d'un outil d'aide à la décision et à l'aménagement du territoire : MOSART, *International Conference on Spatial Analysis and GEomatics (SAGEO)*, Montpellier, France.
- Deymier G., 2005, *Capitalisation immobilière des gains d'accessibilité : étude de cas sur l'agglomération lyonnaise*, Thèse de doctorat en sciences économiques, Université de Lyon II, Laboratoire d'Economie des Transports, 373 p.
- Dong X., Ben-Akiva M., Bowman J., Walker J., 2006, Moving from trip-based to activity-based measures of accessibility, *Transportation Research A*, 2, pp. 163-180.
- Downs A., 1962, The law of peakhour expressway congestion, *Traffic Quarterly*, 16(3), pp. 393–409.
- Downs A., 1992, *Stuck in traffic : coping with peak hour traffic congestion*, Brookings Institution Press.
- Durantou G., Overman H.G., 2005, Testing for localisation using micro-geographic data, *Review of Economic Studies*, 72(4), pp. 1077-1106.
- Fujita M., 1989, *Urban economic theory*, Cambridge University Press, 366 p.
- Geurs K.T., Van Wee G.P., 2004, Accessibility evaluation of land-use and transport strategies : review and research directions, *Journal of Transport Geography*, 12, pp. 127-140.
- Gutiérrez, J., Gomez G., 1999. The impact of orbital motorways on intra-metropolitan accessibility : the case of Madrid's M-40, *Journal of Transport Geography*, 7, pp. 1-15.

- Gravel N., Trannoy A., Michelangli A., 2002, *Measuring the social value of local public goods : a hedonic analysis within Paris Metropolitan area*, Working Paper, 82, Univesità commerciale Luigi Bocconi, Econpubblica, Center for research on public sector.
- Hansen W. G., 1959, How accessibility shapes land use, *Journal of the American Institute of Planners*, 25, pp. 73-76.
- 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*, Lyon, France.
- Jensen P., 2006, Network-based predictions of retail store commercial categories and optimal locations, *Physical Review E*, 74.
- Jensen P., Michel J., 2009, Measuring spatial dispersion : exact results on the variance of random spatial distributions, *The Annals of Regional Science*, Publié en ligne, à paraître.
- Koenig J. G., 1974, Théorie économique de l'accessibilité urbaine, *Revue Economique*, 2, pp. 275-297.
- Kwan M., 1998, Space-time and integral measures of individual accessibility : a comparative analysis using a pointbased framework, *Geographical Analysis*, 30 (3), pp. 191-216.
- Marcon E., Puech F., 2010, Measures of the geographic concentration of industries : improving distance-based methods, *Journal of Economic Geography*, à paraître.
- Maurice J., Crozet Y. (dir.), 2007, *Le calcul économique dans le processus de choix collectif des investissements de transport*, Economica, 454 p.
- McNally M.G., 2008, *The four step model*, Paper UCI-ITS-AS-WP-07-2, Center for Activity Systems Analysis, <http://repositories.cdlib.org/itsirvine/casa/UCI-ITS-AS-WP-07-2>.
- Mercier A., Raux C., Ovtracht N., 2008, The relevance of gravity accessibility measures : from theory to example, *International Conference on Mobility and Transport (Mobil.TUM)*, Munich, Germany.
- Miller H.J., 1999, Measuring space-time accessibility benefits within transportation networks : basic theory and computational procedures, *Geographical Analysis*, 3, pp. 187-212.
- Miller H.J., Shaw S., 2001, *Geographic information systems for transportation : principles and applications*, Oxford University Press.
- Ministère de l'Équipement, des Transports, du Logement, du Tourisme et de la Mer, 2004, *Instruction cadre relative aux méthodes d'évaluation économique des grands projets d'infrastructures de transport*, 33 p.
- Mogridge M.J.H., 1980, *Travel in towns : jam yesterday, jam today, jam tomorrow ?*, McMillan.
- Morris J.M., Dumble P.L., Wigan M.R., 1979, Accessibility indicators for transport planning, *Transportation research A*, 13, pp. 91-109.
- Neuburger H., 1971, User benefit in the evaluation of transport and land use plans, *Journal of Transport Economics and Policy*, 5, pp. 52-75.
- Ortuzar J., Willumsen, L.G., 2001, *Modelling transport*, Wiley.
- Péguy P.Y., Ovtracht N., 2007, La valeur économique des paysages des villes périurbanisées : le cas de l'aire urbaine de Lyon, *Communication au séminaire INRA IDEP*, 28 mars, Dijon, France.

- Péguy P.Y., Ovtracht N., 2009, *Mesure des externalités d'aménagement liées aux transports publics – prix des logements et capitalisation*, Rapport de recherche, MEDDAD, 72 p.
- Puech F., Ovtracht N., Jensen P., Thiebaut V., 2009, Does “distance” really matter for distance-based measures of geographic concentration ?, *56th North American Regional Science Association International Conference*, San Francisco, Etats-Unis.
- Raux C., Souche S., Mercier A., 2007, De la modélisation des comportements au calcul économique : l'équité des politiques de transport. In : Maurice, J., Crozet, Y. (dir.), 2007, *Le calcul économique*, Economica, pp. 317-339.
- Raux C., Mercier A., Ovtracht N., 2008, Evaluation économique des politiques de transport et indicateurs d'accessibilité spatiale : l'apport des SIG , *Cybergeo : European Journal of Geography*, 435, URL : <http://cybergeo.revues.org/index21333.html>.
- Rosen H. S., 1974, Hedonic Prices and implicit market : product differentiation in pure competition, *Journal of Political Economy*, 82, pp.34-55.
- Small K.A., Rosen H.S., 1981, Applied welfare economics with discrete choice models, *Econometrica*, 49(1), pp. 105-130.
- Thill J.C., 2000, Geographic information systems for transportation in perspective, *Transportation Research C*, 8, pp. 3-12.
- Tiebout C., 1956, A pure theory of local expenditures, *Journal of Political Economy*, 64, pp. 416-424.
- Wardrop J.G., 1952, Some theoretical aspects of road traffic research, *Proceedings Institute of Civil Engineers*, Part II, 1, pp. 325-378.
- Wegener M., Fürst F., 1999, *Land Use Transport Interaction : State of the Art*, Institut für Raumplanung, Universität Dortmund, Fakultät Raumplanung.
- Wilson A.G., 1970, *Entropy in urban and regional modelling*, Pion.
- Zahavi Y., Talvitie A., 1980, Regularities in Travel Time and Money, *Transportation Research Record*, 750, pp. 13-19.

Deuxième partie

**Comprendre les mobilités
urbaines et anticiper
une urbanisation durable**

┌

┌

└

└

Cette deuxième partie regroupe des modèles fondés sur l'analyse des transports et de l'urbanisation : ils prennent en compte les interactions de ces deux dynamiques, mais se distinguent des modèles présentés dans la première partie par une approche centrée sur des questions plus particulières, souvent innovantes, parfois très théoriques, qui offrent autant d'ouvertures pour de nombreux développements futurs. Ainsi, chacun de ces modèles s'attache à la question des mobilités ou de l'évolution de l'occupation du sol en ouvrant de nouvelles voies, tant sur le plan formel, que sur celui des thématiques qu'ils explorent et de leurs implications en matière d'aide à la décision pour la planification et les politiques de transport.

Le projet MIRO, présenté par A. Banos *et al.* dans le chapitre 7, constitue une exploitation originale des Enquêtes ménages déplacements, dans le cadre d'une démarche associant la *Time geography* et l'intelligence artificielle distribuée. L'un des objectifs clés de ce projet pluridisciplinaire réside ainsi dans la construction d'une plateforme multi-agents permettant d'explorer, par simulation, l'influence sur le fonctionnement collectif de l'espace urbain de comportements individuels orientés notamment vers la construction et la réalisation de programmes quotidiens d'activités. A partir de ces programmes, les déplacements des agents peuvent être validés s'ils correspondent à des emplois du temps cohérents, et permettre de simuler une ville mise en mouvement par l'ensemble des déplacements qui y prennent place.

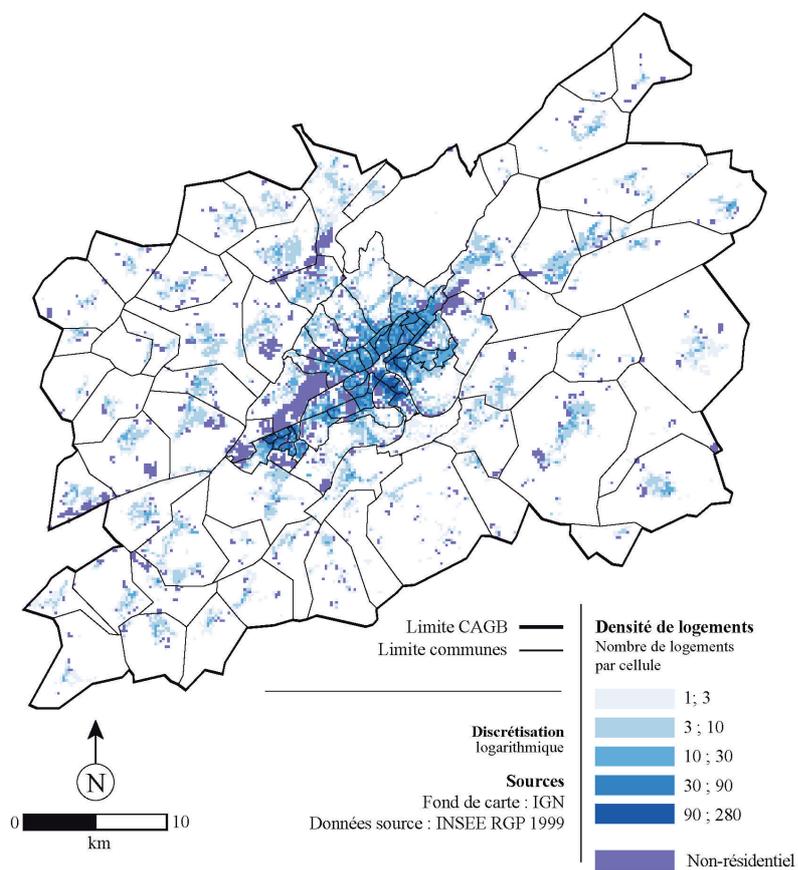
Dans le chapitre 8, le modèle FRETURB, présenté par J.L. Routhier et F. Toilier, se concentre sur le transport de marchandises en ville, aujourd'hui encore rarement pris en compte dans la modélisation des mobilités urbaines. A partir d'enquêtes « Marchandises en Ville » réalisées dans trois agglomérations de tailles différentes (Bordeaux, Marseille et Dijon), le modèle se fonde sur une typologie d'établissements qui leur attribue un nombre de mouvements hebdomadaires, correspondant au passage d'un véhicule de livraison. De nombreux indicateurs sont calculés sur cette base : le taux d'occupation de la voirie, la durée de stationnement des véhicules, les heures de pointe du transport de marchandise (etc.) à partir de données géographiques simples et d'une modélisation du comportement logistique des établissements, délicat à simuler et plus complexe qu'une simple logique gravitaire.

Le modèle CWS fait l'objet du chapitre 9. Il présente une simulation comparée de l'étalement urbain sur les villes de Belfort et de Besançon. A partir d'un carroyage qui structure l'espace géographique de ces deux villes en cellules de 50 mètres de côté, les résultats sont obtenus en combinant trois modèles qui répondent à trois questions complémentaires : combien d'hectares seront urbanisés dans la future (chaîne de Markov) ? Où se situeront ces espaces (modèle de potentiel) ? Et de quelle occupation du sol se composeront-ils (automates cellulaires) ? Ces résultats, qui prennent la forme d'une cartographie de scénarios d'étalement urbain, montrent la difficulté du paramétrage de ce type de modèles, et permettent de considérer la modélisation comme une étape dans une démarche plus large de prospective et de construction de scénarios.

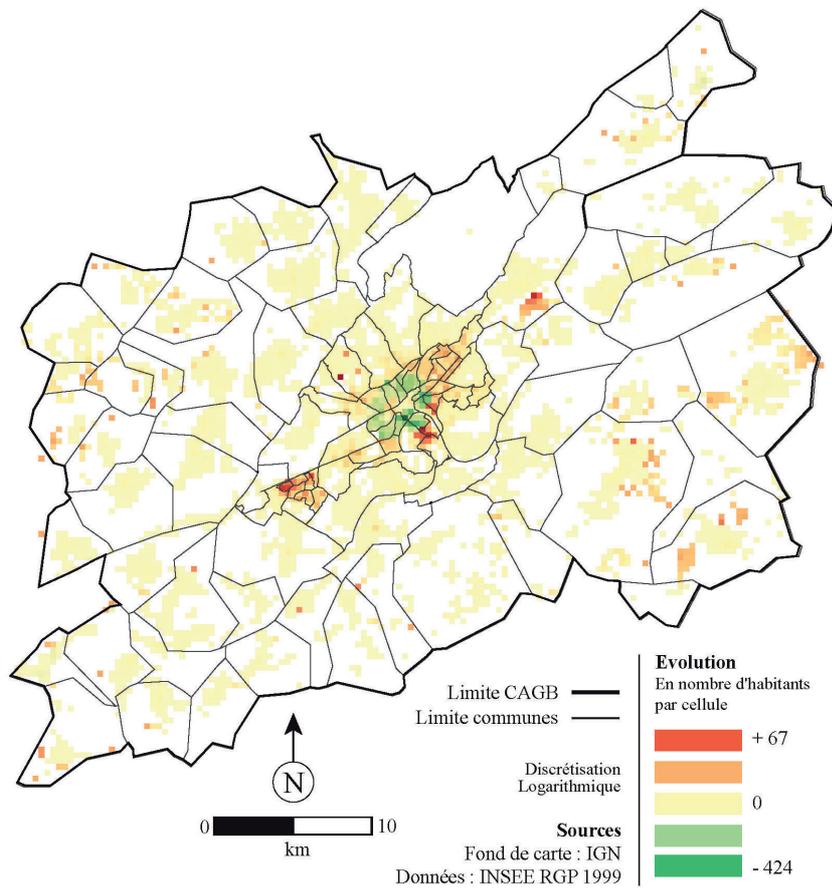
Dans le chapitre 10, P. Frankhauser et C. Tannier présentent le modèle MUP-City, qui s'appuie également sur une approche cellulaire. Mis au point pour tester des scénarios d'optimisation de l'accessibilité à différentes aménités urbaines et périurbaines à travers un concept d'aménagement multi-échelle, il se fonde sur l'apport de la géométrie fractale. A partir d'un exemple sur le secteur Nord de l'agglomération de Besançon, différents scénarios, fractals et non fractals, sont comparés et leurs « performances » sont mesurées en termes de distance moyenne aux commerces et aux services les plus proches, et en fonction du niveau de contiguïté des formes urbaines qui en résultent. Le concept d'aménagement fractal illustré par cette démarche introduit ici une approche innovante, qui articule les différentes échelles présentes dans une grande agglomération, en lien avec les objectifs de durabilité des espaces périurbains.

Le modèle ILOT est présenté par R. Leroy, C. Raux et P. Jensen dans le chapitre 11. Il consiste à appliquer la modélisation multi-agents à l'étude des rapports entre la mobilité locale et les dynamiques spatiales au sein d'une aire urbaine. Pour ce faire, un certain nombre de « briques » théoriques sont développées, afin de représenter de manière pertinente l'émergence de comportements collectifs en matière de localisation et de rythmes temporels d'activités. Les simulations sont construites sur un espace abstrait, issu d'un modèle standard en économie urbaine, dans lequel la ville mono-concentrique regroupe les emplois et les services au centre. Elles permettent de mesurer comment, en fonction du comportement des « agents », cette forme de base peut évoluer vers une configuration plus complexe, parfois polycentrique, reproduisant les résultats d'un modèle d'équilibre, et permettant d'identifier l'émergence de certains processus ségrégatifs.

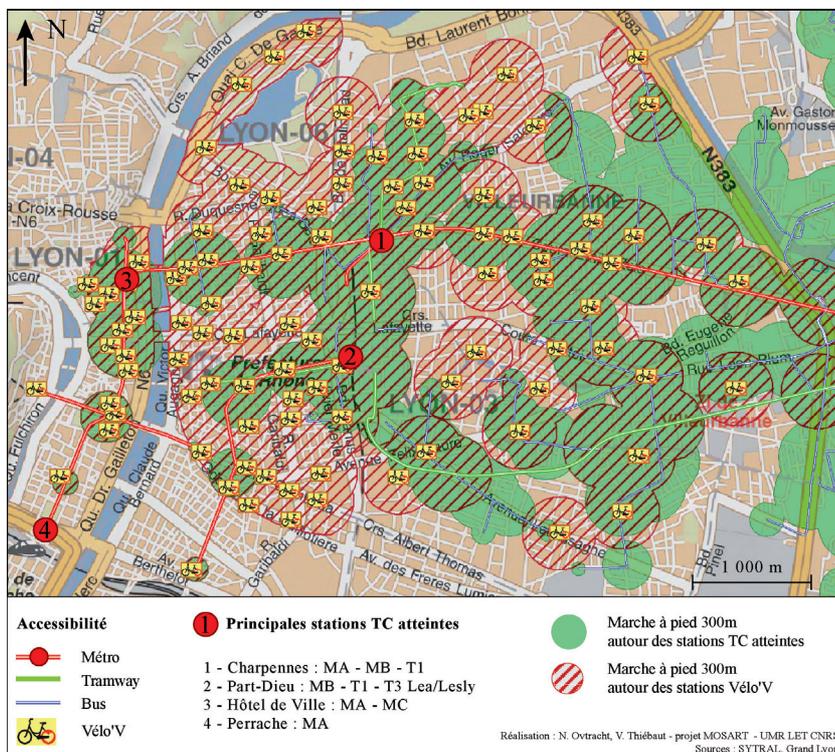
Ventilation du bâti non-résidentiel et des logements dans l'agglomération de Besançon



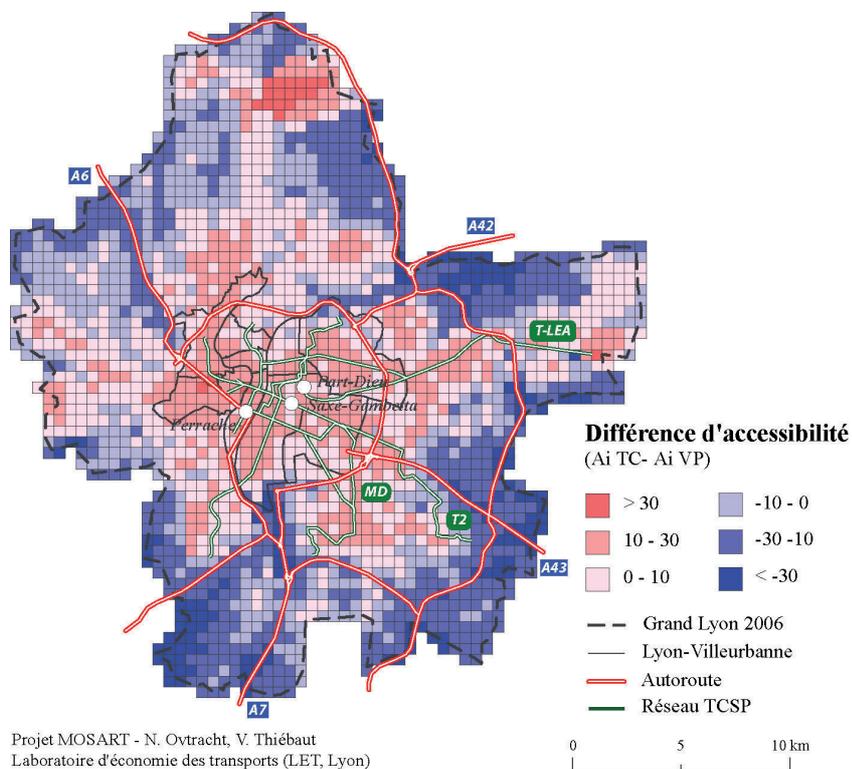
Simulation des mobilités résidentielles



Accessibilité isochrone en utilisant les transports en commun et les stations Vélo'V de Lyon

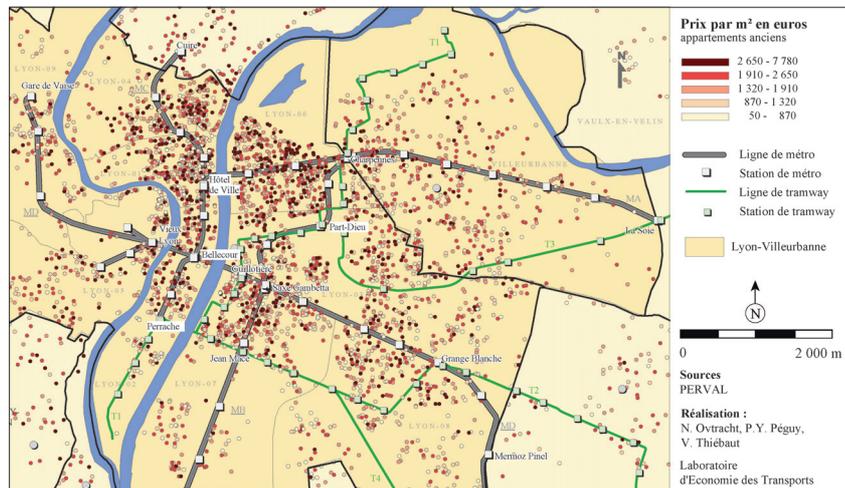


Différentiel d'accessibilité TC-VP en heure de pointe

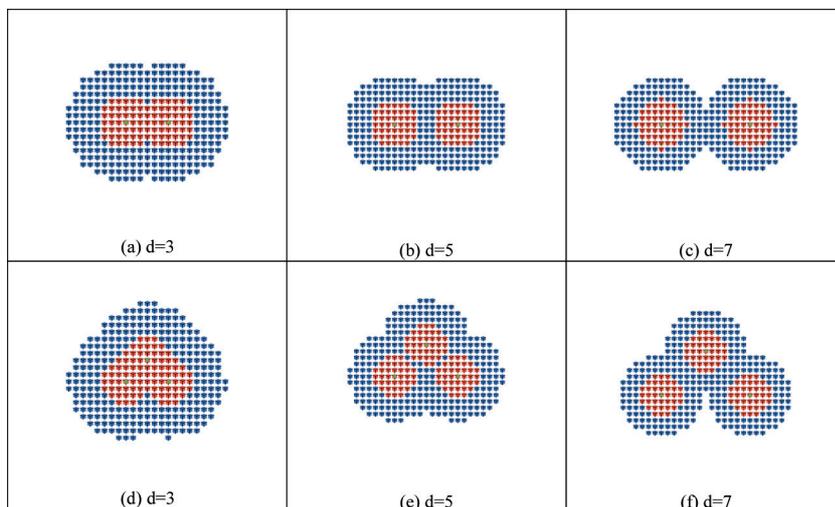


Projet MOSART - N. Ovracht, V. Thiébaud
 Laboratoire d'économie des transports (LET, Lyon)

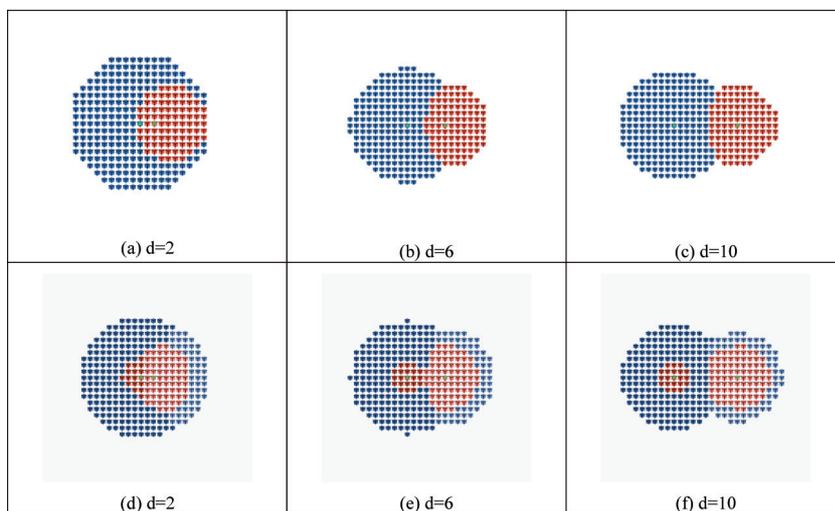
Répartition spatiale des transactions d'appartements anciens et niveaux des prix sur Lyon Villeurbanne



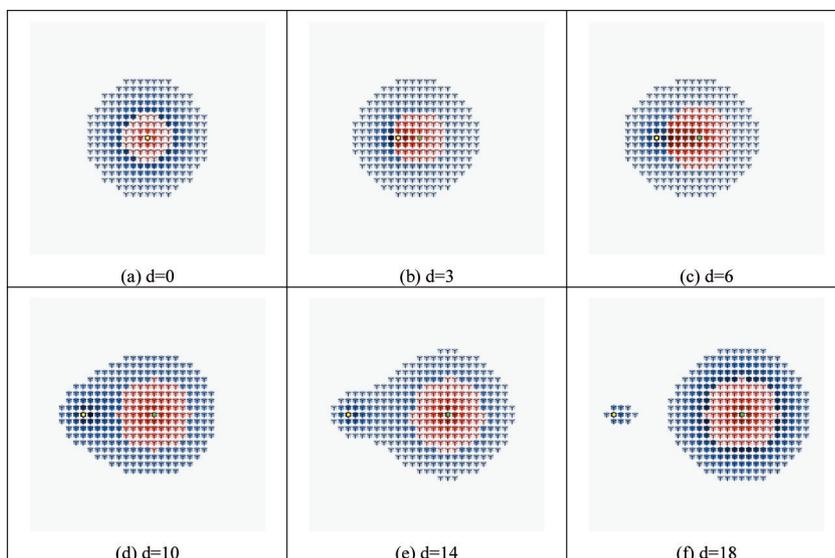
Villes à deux centres d'emplois éloignés d'une distance de $2d$ cases et à trois centres d'emplois en position $(-d;0)$, $(d;0)$ et $(0;d)$, représentés par des points verts, pour différentes valeurs de d



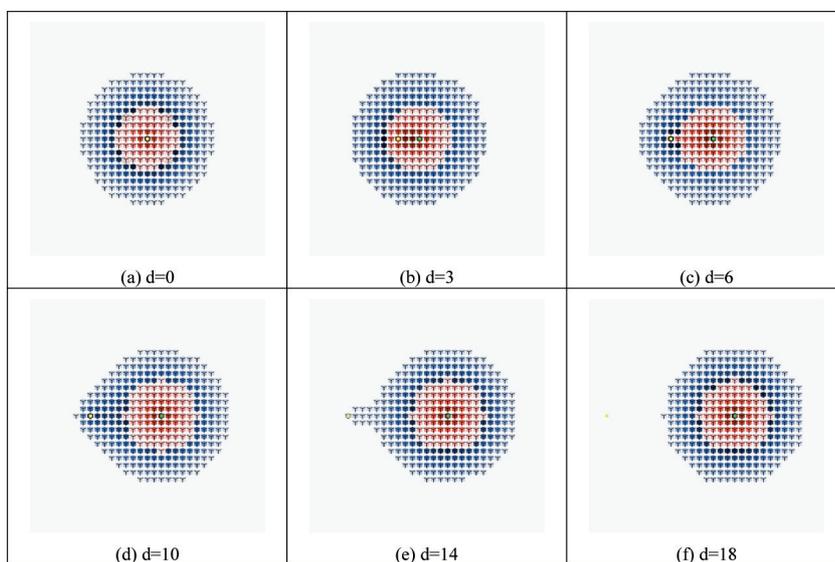
Première ligne : villes à deux centres d'emplois où les agents « pauvres » travaillent dans le centre est et les agents « riches » dans le centre ouest
 Deuxième ligne : 80% des agents « pauvres » sont contraints de travailler dans le centre est et les 20% restants dans le centre ouest, et inversement pour les agents « riches »



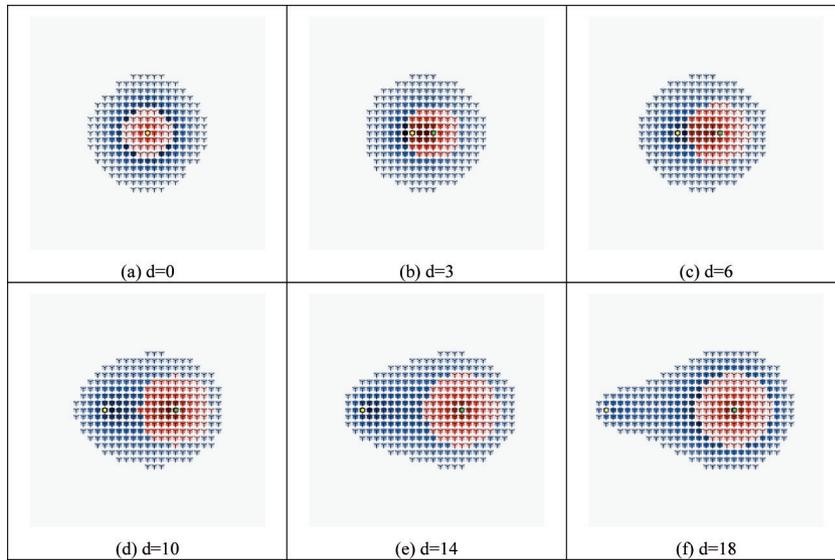
Aménité à l'ouest du centre à une distance d variable



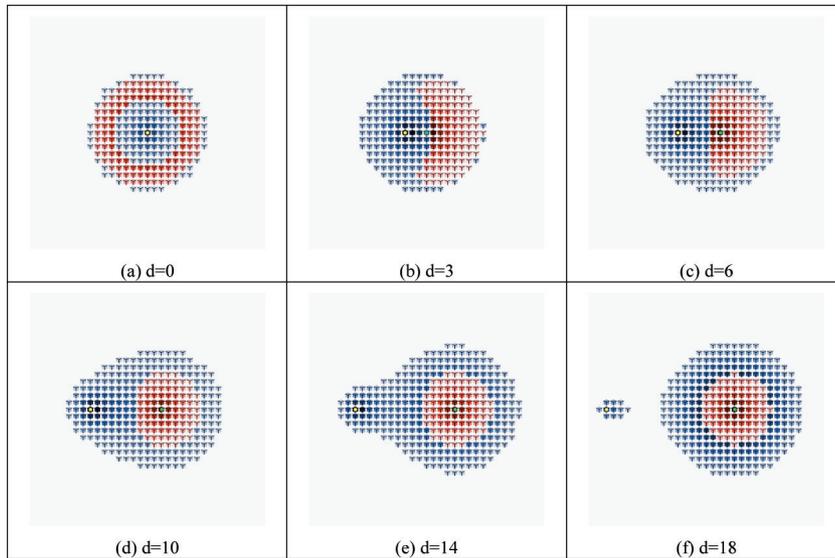
**Aménité à l'ouest du centre à une distance d variable,
avec une valeur de 1 pour le paramètre a_0**



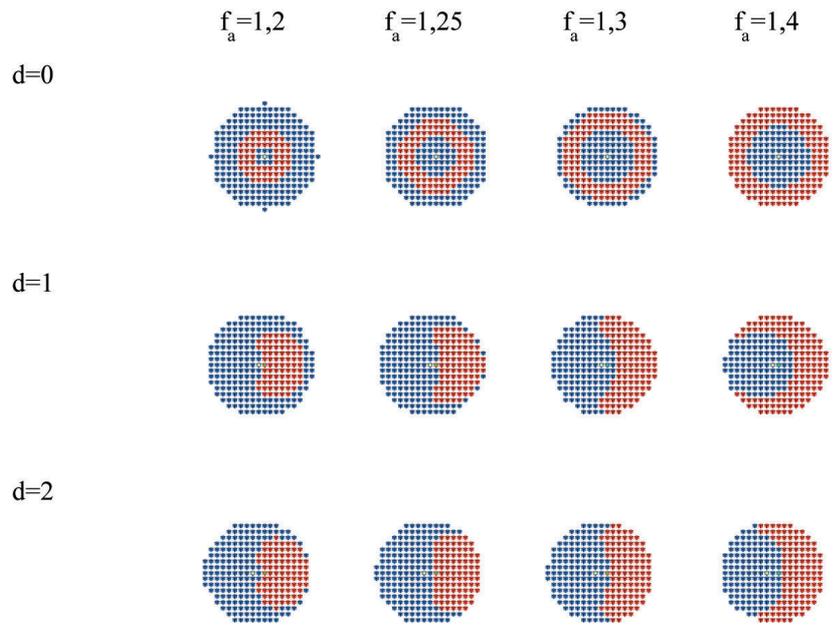
**Aménité à l'ouest du centre à une distance d variable,
avec une valeur du facteur b de rayonnement de l'aménité $b = 4$**



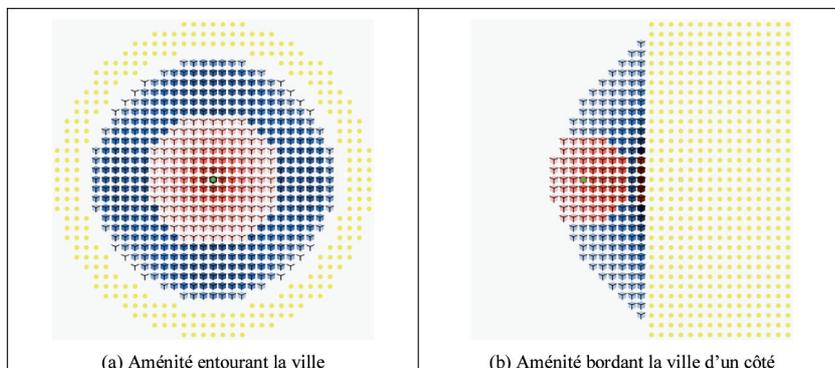
**Aménité à l'ouest du centre à une distance d variable,
avec une valeur du facteur g de préférence pour les aménités nulle
pour les « pauvres » $\gamma_p = 0$**



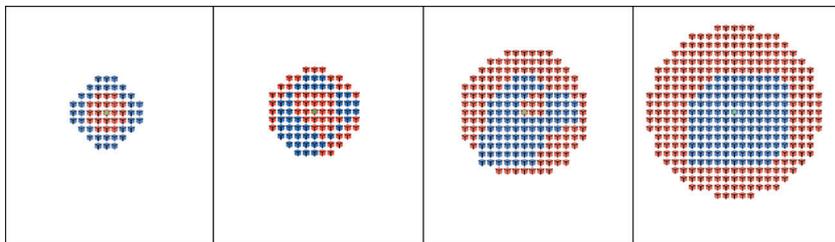
Forme de la ville avec aménité (en jaune) centrale ou à l'ouest proche du centre d'emplois (en vert), pour plusieurs valeurs de la distance entre le centre d'emplois et le centre d'aménités et plusieurs valeurs du facteur de différence de préférence pour les aménités entre « riches » et « pauvres »



Aménités environnementales étendues



Evolution historique d'une ville comportant des aménités endogènes liées à la présence des quartiers riches



Présenté dans le chapitre 12 par G. Caruso *et al.*, S-GHOST City est un modèle de micro-économie qui simule la croissance urbaine, en s'appuyant sur un canevas proche de celui des automates cellulaires. Il tente de montrer les interactions existantes entre la forme du réseau routier et le développement des espaces périurbains, afin d'appréhender l'émergence de formes urbaines complexes émanant de préférences et de contraintes individuelles, ainsi que du comportement des pouvoirs publics responsables des politiques de transport. A partir de simulations qui reproduisent la situation des villes moyennes françaises, il montre que la génération conjointe du réseau et de l'urbanisation peut conduire à des situations inefficaces : trajets excessifs, espaces verts laissés vacants et inaccessibles aux développements futurs.

Enfin, le modèle DYNACITÉ, présenté par V. Gacogne dans le chapitre 13, offre un angle d'analyse original pour étudier la périurbanisation. Il s'appuie sur la dynamique des systèmes pour décrypter, à l'échelle de la commune, les paradoxes du jeu des acteurs qui sont à l'origine de l'étalement urbain. Cette première version du modèle est appliquée à une commune de l'aire urbaine lyonnaise (Lissieu) ; DYNACITÉ tente d'en expliciter les fonctionnements et les dysfonctionnements, mais également de définir un certain nombre de conditions pour remédier aux paradoxes constatés (entre les décisions et l'arbitrage des acteurs, la régulation de la construction, etc.) qui conduisent à enrayer la périurbanisation ou au contraire à l'accentuer. Cet exemple donne un aperçu des différents usages possibles de la modélisation, utilisée à la fois comme un instrument pédagogique pour comprendre la dynamique périurbaine et comme un outil pour l'aide à la décision.

CHAPITRE 7

MIRO : DES TRAJECTOIRES INDIVIDUELLES À LA VILLE EN MOUVEMENT

Arnaud Banos

(Géographie-Cités UMR 8504 CNRS-Université de Paris I
et Institut des Systèmes Complexes de Paris – Ile-de-France)

Annabelle Boffet-Mas

(CEDETE EA 1210)

Sonia Chardonnel

(PACTE UMR 5194 CNRS-Université Joseph Fourier)

Christophe Lang

(LIFC EA 4157, Université de Franche-Comté)

Nicolas Marilleau

(UMMISCO UMI 209 IRD)

Thomas Thévenin

(ThéMA UMR 6049 CNRS-Université de Bourgogne)

arnaud.banos@parisgeo.cnrs.fr

Depuis les années 1970, les Enquêtes ménages déplacements (EMD) sont couramment utilisées en France pour construire les principaux indicateurs de mobilité urbaine (Certu, 2008), à des niveaux d'échelle la plupart du temps très agrégés (Banos et Thevenin, 2005). Pourtant, ces enquêtes fournissent des informations très détaillées sur la mobilité quotidienne d'échantillons représentatifs de citoyens, informations très rarement exploitées à ce niveau individuel de détail. Face à la complexité croissante des déplacements et aux besoins plus pressants de la gestion urbaine, il semble justifié de chercher à exploiter plus et mieux cette source d'information, dans des perspectives d'analyse et d'exploitation renouvelées (Bailly et Heurgon, 2001). Le projet MIRO¹ s'inscrit

1. Les travaux présentés dans ce chapitre s'inscrivent dans le projet MIRO, financé par le GO 1 du PREDIT 3 (2002-2006) puis par l'ANR Villes Durables (2009-2013). Site internet : <http://miro.csregistry.org/>

dans cette perspective en proposant une exploitation originale des EMD, dans le cadre d'une démarche associant la *Time geography* et l'intelligence artificielle distribuée. L'un des objectifs clés de ce projet pluridisciplinaire réside ainsi dans la construction d'une plateforme multi-agents permettant d'explorer, par simulation, l'influence sur le fonctionnement collectif de l'espace urbain, de comportements individuels orientés notamment vers la construction et la réalisation de programmes quotidiens d'activités (Banos *et al.*, 2005). Le succès de cette entreprise repose par conséquent sur la création d'agents socialement pertinents. Il s'agit là d'un enjeu classique de ce type d'approche, fondée sur l'exploration des structures et des comportements collectifs susceptibles d'émerger des interactions localisées entre des comportements individuels. C'est dans cette perspective que l'équipe du projet MIRO a proposé un protocole de simulation, centré sur les individus en mouvement, qui permet d'explorer le système complexe adaptatif qu'est la ville.

1. ÉTAT DE L'ART ET POSITIONNEMENT MÉTHODOLOGIQUE

Les premiers développements des modèles de transport sont apparus aux Etats-Unis au début des années 1960 (Dupuy, 1999). L'objectif recherché était de prévoir les investissements nécessaires à la construction des infrastructures de transport dans un contexte économique particulièrement favorable à l'urbanisation et à la motorisation des ménages (Masson, 1998). Fondée essentiellement sur les principes de l'économie néoclassique, cette approche est progressivement remplacée par les modèles de micro-simulation. En particulier, les années 1970 marquent une véritable rupture dans les méthodes de prévision de la demande de transport avec l'apparition des modèles désagrégés (cf. le Chapitre 1). Dans un contexte de crise économique, les pouvoirs publics s'orientent davantage vers une planification sur le court terme et souhaitent intégrer des données comportementales dans leur démarche pour pallier les défauts des modèles classiques. La caractéristique majeure des modèles désagrégés réside dans le changement d'unité d'observation, qui correspond non plus au comportement moyen d'un groupe de personnes mais aux habitudes individuelles de déplacement. Dans ces modèles, l'individu est amené à faire un choix parmi plusieurs possibilités. Il s'agit le plus souvent de déterminer le mode de transport optimal pour une personne et un déplacement donné. Ce processus de décision est reconstitué à partir de modèles probabilistes bien connus, les modèles de choix discret.

Figure 1
Historique des modèles basés sur les programmes d'activités

	Objectifs	Spatial	Application
PESAPS (LENNORP, 1976)	Mesurer l'influence des contraintes d'activités dans l'espace et le temps pour déterminer des choix d'itinéraires	Oui	Tester les niveaux d'accessibilité aux services apportés par les Transports en Commun de la ville de Karlstad.
CARLA (JONES, 1980) (CLARKE, 1986)	Reconstruire des programmes d'activités en fonction de nouvelles contraintes comme le changement de l'offre de transport	Non	Tester les services de bus en milieu rural au Pays-Bas
STARCHILD (RECKER, 1986)	Simuler les déplacements et les activités en fonction des contraintes des membres des ménages	Non	Non communiqué
EUROTOPP (AXHAUSEN, 1991)	Simulation dynamique de choix d'itinéraire en fonction des programmes d'activités et des interactions entre les membres des ménages	Non	Non communiqué
AMOS (KITAMURA, 1997)	Simulation des changements d'activités et des déplacements dans le système de transport	Non	Utilisation du modèle sur la ville de Washington
SMART (STOPHER, 1996)	Simuler les activités, les ressources et les déplacements en fonction des données d'une enquête ménage et de l'occupation des sols	Oui	Non communiqué
ALBATROSS (ARENTZE, 2002)	Modélisation des comportements de déplacement et des activités à l'échelle du ménage	Non	Application sur Eindhoven
MATSIMS (NAGEL, 2003)	Simulation de la demande de transport et génération d'itinéraire par système multi-agents	Oui	Application sur la région de Zurich
TRANSIMS (BARRETT, 2004)	Construction d'un simulateur pour analyser le système de transport	Oui	Application sur la ville de Portland

Les modèles désagrégés impliquent que des enquêtes soient effectuées auprès des usagers des transports, ce qui élève les coûts d'étude. Malgré ses avantages, cette méthodologie reste peu appliquée en France. Elle a toutefois permis d'améliorer les modèles classiques, grâce à la création *de modèle à quatre étapes hybrides* (Ortuzar et Willumsen, 1994). Ces modèles de seconde génération ont largement été repris par les différents logiciels disponibles dans le commerce, EMME2, MINUTP et TRIPS étant les plus diffusés (Quinet, 1998 ; Bonnel, 2004). L'étude des comportements de mobilité est également abordée par les disciplines des sciences humaines également dans les années 1970 et notamment à travers l'approche « activités-centrée » (*activity-based-approach*), centrée sur les activités.

Ce paradigme trouve ses origines dans les travaux précurseurs du sociologue américain F.S. Chapin (1974) et du géographe suédois T. Hägerstrand (1970) sur les programmes d'activités quotidiens. Pour ces chercheurs, les comportements de mobilité reposent sur des composantes sociales (le mode de vie) et des contraintes spatio-

temporelles (budgets-temps, réseau d'offres, services). La combinaison des trois éléments « espace », « temps » et « activités » permet d'insister sur les ressorts de la mobilité plutôt que sur les volumes de trafic, comme c'était le cas pour le modèle classique dit « à quatre étapes ». Cette confrontation des deux approches met en évidence le niveau de précision des données d'entrées. Les modèles classiques privilégient en effet l'agrégation des données, tandis que l'approche activité-centrée mobilise des données à l'échelle de l'individu et/ou du ménage. Ce degré de précision amène les partisans de l'approche activité-centrée à mener des investigations sur des secteurs restreints et principalement en milieu urbain. Inspiré des travaux de S. Greaves et P. Stopher (1998), la Figure 1 propose un historique des principaux modèles fondés sur les programmes d'activités. La première expérience, menée par l'école suédoise de la *Time Geography*, montre à quel point l'intégration du temps et de l'espace est importante pour appréhender la mobilité au travers des programmes d'activités des individus.

1.1. Le modèle de micro-simulation TRANSIMS

TRANSIMS est sans doute le modèle de micro-simulation le plus abouti à ce jour pour analyser les transports urbains (Balmer *et al.*, 2004). Développé aux Etats-Unis dans le laboratoire de Los Alamos, ce modèle est en particulier utilisé pour simuler les déplacements sur la ville de Portland. L'architecture de TRANSIMS repose sur la mise en relation de plusieurs modules :

- Tout d'abord, le module de génération de population reconstitue la population et les ménages d'une agglomération en fonction des caractéristiques démographiques du recensement de la population et des prévisions. Ces ménages « artificiels » sont répartis sur le territoire en fonction des données du recensement ;

- A la seconde étape, le module de génération d'activités permet d'assigner à chaque voyageur un emploi du temps avec des tâches précises à réaliser. Cette population artificielle de voyageurs est créée à partir d'une enquête spécifique sur les déplacements des individus de l'agglomération étudiée. L'enchaînement des activités peut être reproduit dans ce module. Au final, chaque individu de chaque ménage « reçoit » une liste d'activités associées à un mode de transport : « déposer les enfants à l'école à pied », « aller au travail en voiture », « rentrer au domicile en voiture », « faire du sport à vélo », etc. ;

- Au cours de la troisième étape, l'affectation de l'itinéraire détermine le chemin le plus rapide pour se rendre d'un lieu d'activité à un autre pour chaque individu ;

– Au quatrième stade, le micro-simulateur reproduit les mouvements des véhicules sur le réseau de transport, seconde par seconde, pour une période donnée. Le comportement des voyageurs est reproduit par des paramètres intégrés dans un automate cellulaire afin de reproduire une image la plus réaliste possible du trafic dans l'agglomération. Les véhicules, les sections d'autoroute ainsi que les intersections sont autant d'éléments intégrés dans ce micro-simulateur. Dans une cinquième phase, un module d'estimation de polluants retranscrit les flux de véhicules en émissions de dioxyde de carbone, monoxyde, etc. ;

– Un dernier module, baptisé *feedback tool*, permet d'effectuer des boucles de rétroaction afin de calibrer l'ensemble du modèle. L'utilisateur peut ainsi recueillir les informations sur des catégories de déplacements et d'individus et contrôler la qualité de l'affectation des itinéraires.

Les deux premiers modules de TRANSIMS, visant à la constitution d'une « population synthétique », ont particulièrement inspiré le modèle MIRO. Cette expression contient une double idée. D'une part, il est possible de créer une population d'individus artificiels. D'autre part ce groupe d'individus doit pouvoir être considéré comme une image synthétique de la population initiale, pour un nombre réduit mais néanmoins pertinent de caractéristiques.

L'objectif général de MIRO est de proposer un processus de modélisation permettant de simuler, dans le temps court de la journée, les modalités d'émergence, à partir d'une multitude de comportements individuels et de configurations territoriales variables. Dans cette perspective, et parce qu'elle se focalise sur l'individu en mouvement et le contexte spatio-temporel dans lequel il évolue, la *Time Geography* offre un cadre conceptuel pertinent, qui peut être formalisé et opérationnalisé à travers la simulation multi-agents.

1.2. De la *Time Geography*...

La *Time Geography* définie par T. Hägerstrand (Hägerstrand, 1970 ; Chardonnel, 2001) dès les années 1970 a souvent servi de point de départ pour les travaux de modélisation de la mobilité basés sur les programmes d'activités. Ce cadre théorique a apporté à l'étude des mobilités quotidiennes un regard centré sur les individus et sur le contexte environnemental dans lequel ils évoluent. Il en découle que l'espace-temps est considéré comme une *ressource* ou une *contrainte* pour l'action. Cela signifie que la liberté d'action n'est pas totale, dans la mesure où il existe des contraintes d'occupation d'espace et de temps qui interviennent dans les actions des individus. Ainsi, ces derniers réalisent leurs projets en ordonnant dans le temps les activités en

fonction des plages horaires disponibles et en fonction de l'accessibilité aux lieux des activités. Dans la suite de la démarche de MIRO, nous considérerons que les projets peuvent être rapportés à des « programmes d'activités » qui correspondent à des listes d'activités que veulent/doivent réaliser les individus. Chaque activité du programme sera définie selon sa nature, selon le temps qu'elle pourra prendre pour être réalisée et selon son niveau de flexibilité. Le résultat de l'ordonnement dans le temps et dans l'espace de tâches nécessaires à la réalisation du programme d'activités se traduira par un « emploi du temps spatialisé », c'est à dire une liste d'activités ordonnées dans le temps (horaires sur 24 heures) et localisées dans des lieux identifiés au sein de l'environnement urbain.

1.3. ...à l'intelligence artificielle distribuée

L'un des principaux enjeux scientifiques de MIRO réside dans la traduction méthodologique opérationnelle de ce prisme théorique déjà ancien. L'environnement urbain et les autres agents offrent à chaque agent des opportunités pour la réalisation de son programme d'activités quotidien, mais lui imposent également des contraintes. Ces opportunités et contraintes, pour la plupart exogènes à l'agent, constituent les conditions d'application des règles de son comportement. Ces règles (qui ne seront pas détaillées dans le cadre réduit de ce chapitre) sont centrées sur la génération et la réalisation de programmes d'activités quotidiens par chaque agent.

L'association « contraintes-opportunités / règles de comportement » constitue ainsi ce que nous appelons le « comportement de l'agent ». Cette approche offre un avantage réel du point de vue de la simulation et notamment de la construction de scénarios : il s'agit de modifier les conditions d'application des règles de comportement, invariables par construction pour une catégorie d'agents donnée, pour obtenir des comportements d'agent différents. La localisation, la nature, la fréquence et les horaires d'ouverture des services ou des transports urbains constituent ainsi autant de leviers d'action dont il devient possible de tester les effets par simulation.

2. LE MODÈLE MIRO : ARCHITECTURE GÉNÉRALE

La structure générale du simulateur MIRO peut être décomposée en quatre grandes étapes. La première concerne la création d'une ville virtuelle, à partir de données SIG (Systèmes d'informations géographiques) existantes ou créées pour l'occasion à partir de l'exemple de

Dijon. L'idée est ici de décrire le plus finement possible les localisations résidentielles, l'offre de transport et l'offre d'activité, y compris en termes d'horaires d'ouverture et de capacité d'accueil. La deuxième étape concerne la création et l'affectation spatiale d'une population d'agents « synthétiques » virtuels, à partir de données d'enquête disponibles, et notamment de la dernière EMD disponible à Dijon. Ces deux premières étapes constituent le socle du modèle qui définit l'environnement d'une part et la population localisée d'autre part. La troisième étape consiste en la génération par chaque agent de son emploi du temps, à partir d'une liste individualisée d'activités à accomplir et de la prise en compte des contraintes spécifiques aux lieux d'activité concernés. La quatrième et dernière étape consiste à simuler pour chaque agent son emploi du temps en respectant les composants définis dans les étapes précédentes et en explorant et parcourant l'espace urbain, avec les modes de transport à sa disposition.

2.1. Formalisation multi-agents

Les individus étudiés sont représentés par des entités autonomes, des agents humanisés, qui évoluent dans une ville virtuelle faisant office d'environnement. La description d'un tel Système multi-agents (SMA) nécessite la représentation des individus mais aussi la description du milieu d'évolution. Cette double description est réalisée de façon progressive selon une méthode, appelée RAFALE-SP (Marilleau *et al.*, 2005). Dans un premier temps, la structure générale des individus et l'environnement est représentée au moyen d'un diagramme UML² (v. Figure 2). Ensuite les règles de comportement des mobiles sont définies algorithmiquement par l'utilisation d'un langage de spécification : PLOOM-UNITY. Cette méthode s'achève par l'implémentation d'un simulateur.

2.2. L'environnement

La description de l'environnement constitue une étape cruciale lors de l'élaboration d'un simulateur de mobilité. En effet, cette étape conditionne fortement l'observation des déplacements simulés, qui pourra être faite ultérieurement, par la définition d'un référentiel approprié. L'environnement joue, dans notre système, un double rôle, statique et dynamique. En effet, il est à la fois espace d'opportunités et de contrain-

2. Le langage UML (*Unified Modeling Language*) est un langage de modélisation graphique à base de pictogrammes. Associé au monde du génie logiciel, il est couramment utilisé dans les projets de programmation informatique.

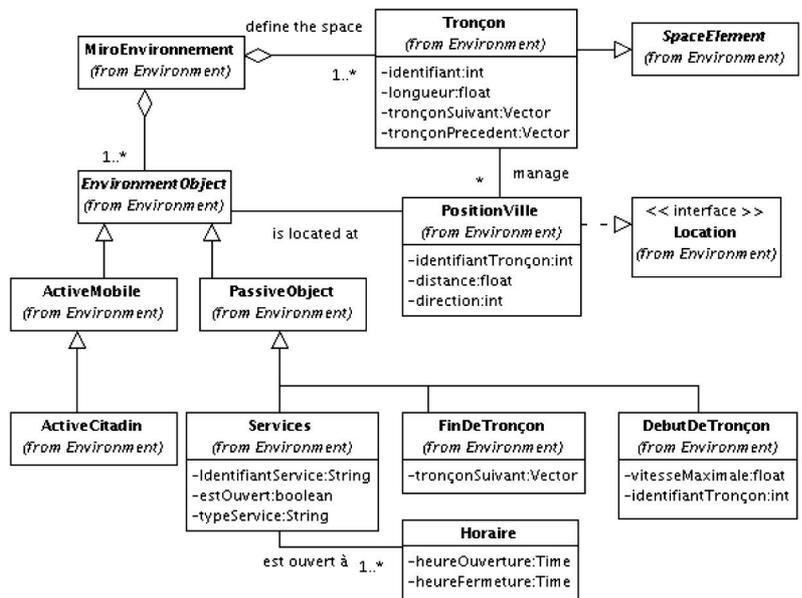
tes physiques pour les individus que nous représentons, mais également générateur de trafic et de services qui sont proposés aux agents.

La définition de la voirie occupe une place importante lors de la description de la ville virtuelle. Elle se décompose, à l'instar de nombreux simulateurs de mobilité, en tronçons qui sont eux-mêmes découpés en cellules. Ainsi nous pouvons affecter à chaque mobile (cf. point 2.3) une position relative, définie par le couple {numéro de rue, numéro de cellule}. Les tronçons sont interconnectés entre eux par des voies de passage faisant office, dans notre système, de files d'attente. Par ce biais, nous évitons le problème de la gestion des feux et des priorités aux intersections. Le modèle de l'environnement dans le projet MIRO est une abstraction de la ville, de sa voirie, de son bâti et de ses dynamiques internes. Pour sa conception, notre réflexion a été inspirée par les données géographiques que nous avons à notre disposition.

Les cartes vectorielles du bâti et de la voirie de la ville de Dijon nous ont permis de structurer le territoire sous la forme d'un graphe, dans lequel les intersections sont les nœuds et les tronçons constituent les arcs orientés et valués. Nous l'avons formalisé par un diagramme de classe UML présenté par la Figure 2.

Figure 2

Diagramme structurel de l'environnement



Les tronçons de la ville sont modélisés par une classe appelée « Tronçon » qui définit, pour chacun d'eux, un identifiant, une longueur en mètres et l'ensemble de ses précédents et suivants. Ainsi nous construisons un graphe non orienté (structure conventionnelle en géomatique) qui détermine l'espace virtuel d'évolution, autrement dit la ville virtuelle. A partir de cette architecture, un système de référence a été établi pour localiser les objets (bâti, mobile, etc.) situés au sein de la ville virtuelle, fondé sur le numéro de tronçon, la distance le séparant du début du tronçon et une direction. Trois types d'objets sont représentés au sein de l'environnement :

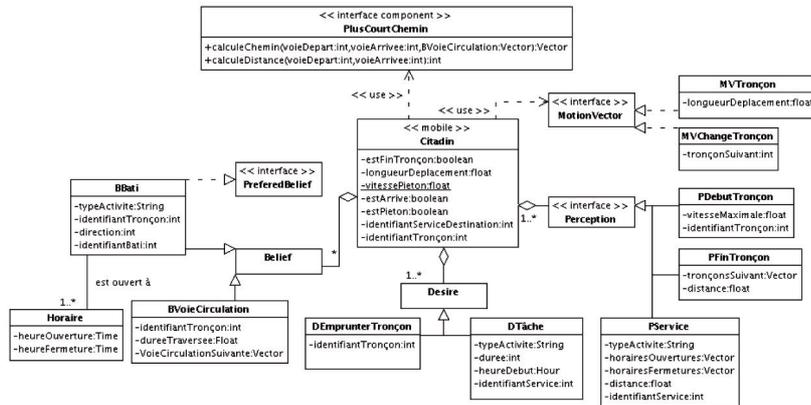
- les mobiles (« ActiveCitadin »), chacun d'eux correspondant à un individu de la population synthétique ;
- les services (« Services »), qui associent au bâti une fonction (par exemple, la restauration ou le travail) qui est accessible par les mobiles à différentes heures de la journée ;
- la signalisation (« DebutTronçon » et « FinTronçon ») qui s'apparente à un panneau signalétique donnant aux mobiles des informations sur la fluidité du trafic (vitesse maximale de circulation) et la réglementation routière en vigueur dans la ville (interdiction de tourner, sens interdit, vitesse maximale autorisée, etc.).

D'autre part, les services sont des générateurs/récepteurs de mobiles urbains : lieux de résidence et de travail, commerces, espaces de loisir, etc. Nous associons plusieurs états, évoluant au fil du temps selon un cycle de vie, à chacun de ces lieux. Ainsi, les agents ont une perception dynamique de chaque générateur/attracteur, les conduisant à adapter leur comportement en fonction des contraintes horaires. De ce fait, un agent souhaitant rentrer dans un restaurant devra au préalable s'assurer que celui-ci est ouvert d'une part, et capable de l'accueillir d'autre part (contrainte de capacité).

2.3. Les mobiles

Un mobile (un individu de la population synthétique) est constitué d'une part d'un objet actif qui traduit son déplacement physique dans son environnement, et d'autre part d'un agent qui commande les déplacements. Par conséquent, pour chaque objet de type « Active Citadin » (représentation du mobile dans la ville virtuelle), un agent associé lui confère (i) des capacités cognitives, notamment d'apprentissage de la voirie et des services présents dans la ville virtuelle, et (ii) des aptitudes physiques à se déplacer. Cet agent, appelé « Citadin » dans la Figure 2, s'apparente donc à un cerveau qui commande le déplacement de son corps (« ActiveCitadin ») sur la carte de la ville.

Figure 3
Diagramme structurel du mobile



Au même titre que l'environnement, l'agent est décrit par un diagramme UML déterminant l'ensemble de ses capacités physiques et mentales. Cette description se scinde en plusieurs parties et permet ainsi la définition de la quasi-totalité des paramètres des agents, à savoir (Figure 3) :

- Une description de la représentation de la connaissance qui détermine la forme et la nature des informations stockées par l'agent. Une connaissance peut être considérée comme privilégiée (value) par l'agent, ce qui permet de prendre en considération, dans une certaine mesure, la notion d'habitude ;

- Une description de la perception de l'environnement qui définit la manière dont l'agent appréhende son environnement urbain, dans le cadre d'une ville « virtuelle ». La capacité d'apprentissage de chaque agent est alors directement liée à cette perception ;

- Une description des désirs qui vise à définir les différentes catégories de tâches personnelles que l'agent aura à accomplir durant le temps de la simulation ;

- Une partie centrale, qui représente le cœur de l'agent et permet de définir la classe qui contient les règles de comportement. Ce noyau est constitué d'une classe portant le stéréotype « agent ».

Par ailleurs, les agents disposent d'un ensemble de connaissances (par exemple « BBati » : connaissance d'un immeuble détenant un service) et de désirs (par exemple « DEmprunterTronçon » : désir d'emprunter un tronçon pour accomplir une tâche). Ces éléments sont aussi sujets à modification en fonction des différentes perceptions que

l'agent est en mesure d'avoir au cours de ses évolutions. Le comportement des mobiles s'appuie essentiellement sur des règles (i) d'apprentissage de l'environnement de ses tronçons et services, (ii) de calcul des trajets (génération des chemins les plus courts grâce à l'algorithme de Dijkstra) et (iii) d'élaboration programme d'activité (utilisation du moteur SICSTUS Prolog).

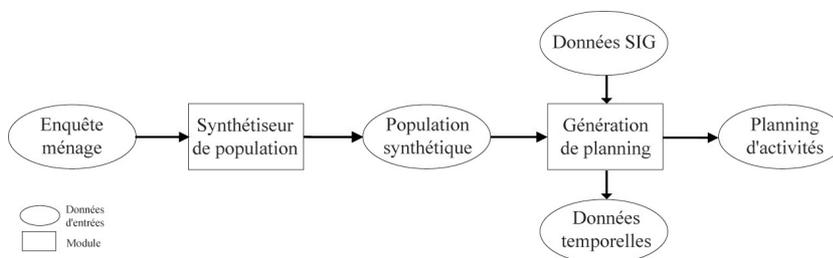
3. GÉNÉRATION D'UNE POPULATION SYNTHÉTIQUE D'AGENTS

La spécificité du modèle MIRO réside dans l'importance accordée, au-delà des caractéristiques d'ordre sociodémographique, aux activités quotidiennes individuelles. L'objectif est en effet de générer une population synthétique d'agents virtuels auxquels sera affectée une liste d'activités à assurer au cours d'une journée-type, et de laisser ces agents organiser et réaliser eux-mêmes leur emploi du temps en fonction des opportunités offertes et des contraintes imposées par l'environnement urbain. Nous avons ainsi privilégié une approche guidée par les données disponibles, à savoir celles de l'EMD, sur un terrain d'étude précis : la Communauté d'Agglomération de Dijon. Nous formulons l'hypothèse que l'EMD, supposée être représentative par construction de la population locale, peut être exploitée dès la phase de génération de la population synthétique d'agents (Figure 4).

La place accordée à cette enquête repose sur une idée simple : l'obtention d'une population d'agents clairement différenciés du point de vue de leurs programmes d'activités (c'est-à-dire de leur liste d'activités quotidiennes hiérarchisées en fonction de priorités définies) devrait être facilitée par l'intégration de ce critère à l'intérieur même du module de génération de population synthétique.

Figure 4

La génération de populations synthétiques d'agents dans MIRO



3.1. Construire des profils d'agents

A partir de l'EMD de Dijon, un certain nombre de variables socio-démographiques et de mobilité ont été retenues, puis soumises à un traitement statistique multivarié (Analyse des correspondances multiples et Classification ascendante hiérarchique). Six groupes relativement homogènes ont alors pu être identifiés. Les profils de classe (Figure 5) permettent par ailleurs de décrire de manière relativement détaillée ces différents groupes, en raisonnant en termes de sous- et sur-représentation statistique :

- Le groupe 1 présente une sur-proportion de femmes âgées et célibataires. Elles se déplacent peu et effectuent principalement leur trajet en transport collectif et marche à pied. Le budget-temps est essentiellement consacré à des activités au domicile ;

- Le groupe 2 rassemble les scolaires de moins de 18 ans. Ces adolescents appartiennent à des familles propriétaires de leur logement et possédant plusieurs automobiles. Les modes de transports publics et doux (vélo, piéton) sont privilégiés et le budget-temps est affecté aux activités sur le lieu d'étude et à des activités sociales (notamment les visites) ;

- Le groupe 3 est composé, quant à lui, de chômeurs et d'inactifs de plus de 30 ans, locataires d'un appartement. Les déplacements sont effectués en mode doux essentiellement (marche à pied et vélo) et le budget-temps est majoritairement passé au domicile ainsi que dans les administrations pour les démarches ;

- Le groupe 4 est exclusivement concerné par les étudiants sans voiture et locataires de leur logement, cette catégorie est utilisatrice des transports collectifs et des modes doux. Peu de déplacements sont effectués. Ainsi le budget-temps est consommé sur le lieu d'étude et en visite ;

- Le groupe 5 rassemble les couples de retraités, propriétaires de leur logement et possédant une seule voiture. Peu de déplacements sont effectués ; ainsi la majorité du budget-temps est passée au domicile ;

- Enfin, le groupe 6 est composé d'actifs possédant plusieurs véhicules, le nombre de déplacements de ce dernier groupe est proche de la moyenne. Le budget-temps est consacré principalement au travail et à l'accompagnement.

Chacune de ces grandes classes peut être décrite du point de vue des profils d'activités des individus qui la composent, à partir de l'EMD. La Figure 6 montre ainsi les durées affectées à diverses activités, pour chacune des 6 classes.

Figure 5

Profils des six classes identifiées par la CAH

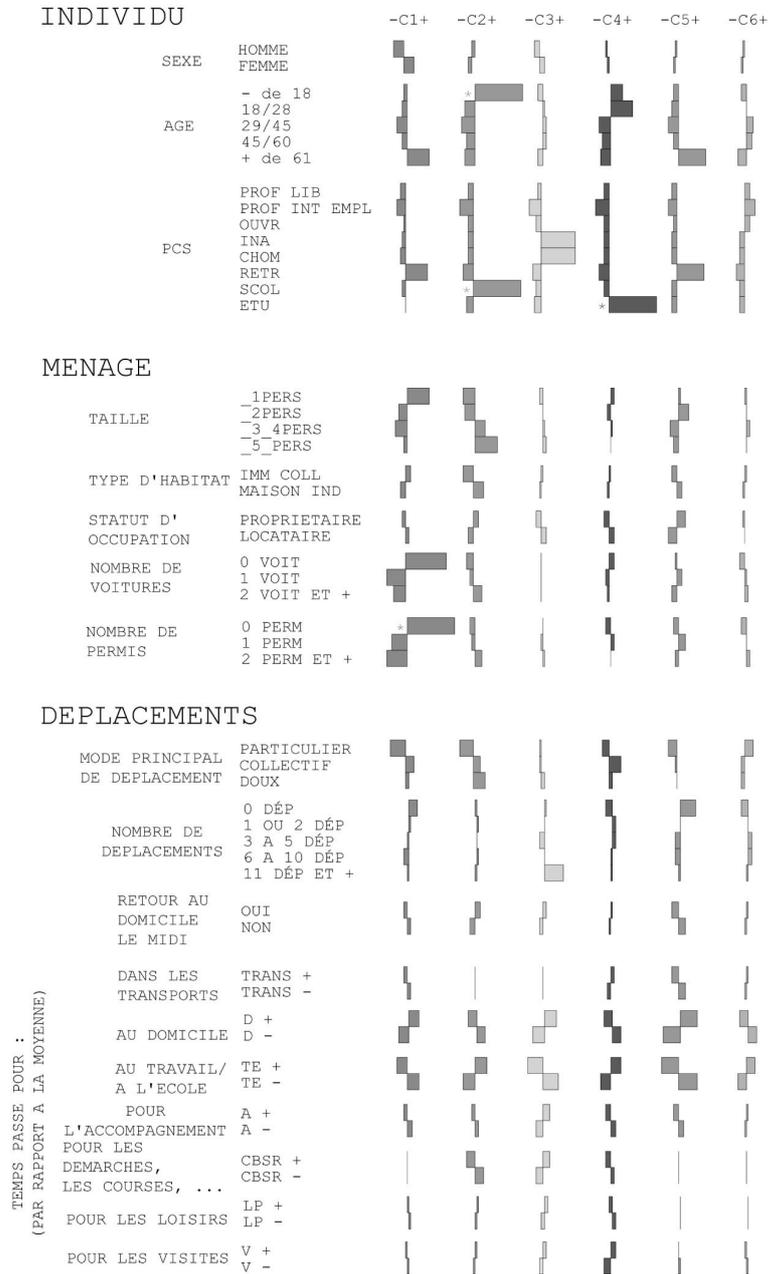


Figure 6

Exemple de profils d'activités observés par classe (en % par classe)

	Classes					
	1	2	3	4	5	6
Aucun	26,07	8,64	14,65	0,60	39,23	1,90
Moins de 30 min	20,09	20,99	20,05	15,32	19,13	18,02
31 à 65 min	21,79	32,72	25,45	36,64	19,29	36,35
66 min à 2H	22,22	28,40	26,22	36,94	16,40	31,17
Plus de 2H	9,83	9,26	13,62	10,51	5,95	12,55
Temps passé dans les transports	100	100	100	100	100	100
Moins de 6H	0,00	0,00	0,26	0,30	0,00	0,18
6 à 12H	3,85	1,85	2,06	10,81	0,16	12,43
12 à 18H	20,51	74,07	18,51	62,46	6,91	59,67
Plus de 18H	75,64	24,07	79,18	26,43	92,93	27,72
Temps passé au domicile	100	100	100	100	100	100
Aucun	77,78	14,81	88,95	12,01	97,75	24,99
Moins de 2H	1,28	1,23	1,54	6,61	1,13	1,78
2 à 4H	2,14	4,94	2,83	7,51	0,48	3,27
4 à 7H	5,56	33,33	2,31	29,73	0,32	14,28
Plus de 7H	13,25	45,68	4,37	44,14	0,32	55,68
Temps passé au lieu de travail ou d'études	100	100	100	100	100	100

Ce tableau forme la base fondamentale à partir de laquelle les individus synthétiques (les agents) vont être générés, par tirage aléatoire.

3.2. Génération aléatoire d'agents

De manière très schématique, un agent se définit par un ensemble de caractéristiques (variables) et de comportements (règles) :

$$\text{Agent} = \{\text{Caractéristiques, Comportements}\}$$

Dans cet article, nous nous focalisons sur la première composante : comment obtenir des populations d'agents qui aient des caractéristiques proches d'une population de référence, observée ? La dimension socio-démographique de ces caractéristiques est gérée à travers l'affectation de chaque agent à l'un des 6 groupes définis à l'issue de la procédure multi-dimensionnelle précédente.

Chaque agent de la population synthétique est ainsi décrit par un ensemble de variables $V = \{V_1, V_2, \dots, V_k, \dots, V_n\}$ dont les modalités $m_{Vi} = \{m_1, m_2, \dots, m_l, \dots, m_n\}$ constituent pour l'essentiel son profil d'activité. L'objectif est de générer ces profils personnalisés, en fonction du groupe d'appartenance de l'agent et des profils d'activités par classes de

la Figure 4. De manière plus formelle, chaque groupe peut donc être défini par un ensemble de variables, de modalités et d'effectifs :

$$G_j = \{V, M_V, N_{M_V}^j\}$$

L'objectif du synthétiseur de population est alors de générer n agents $\{A_1, A_2, \dots, A_i, \dots, A_n\}$ décrits par un groupe d'appartenance et un ensemble d'attributs de mobilité :

$$A_j = \{g, M_V\}$$

et tels que, à l'issue de la procédure, $n_{g_j} \equiv N_{G_j}, \forall_j \rightarrow 1 \text{ à } n$.

Sur cette base, chaque agent simulé se voit donc affecter à un groupe g_j , selon une probabilité :

$$P_{g_j} = \frac{n_{G_j}}{\sum_{j=1}^6 n_{G_j}},$$

avec n_{G_j} l'effectif observé du groupe G_j .

En fonction de ce groupe d'appartenance, chaque agent se voit alors affecter, pour chacune des variables $\{V_1, V_2, \dots, V_k, \dots, V_n\}$ une modalité m_l selon une probabilité :

$$P(m_{v_k}) = \frac{N_{m_{v_k}}}{\sum_{l=1}^n N_{m_{v_k}}}, k \rightarrow 1 \text{ à } l$$

La Figure 7 montre un exemple de résultat obtenu pour 3 agents $\{A_1, A_2, A_{10000}\}$.

En d'autres termes, on obtient à l'issue de cette première étape un ensemble d'agents caractérisés à la fois par une appartenance à un groupe et par une liste d'activités à effectuer avec leur durée associée. On notera néanmoins que cette procédure, fondée sur des tirages aléatoires mutuellement indépendants au sein d'un même groupe G_i donné, peut déboucher sur des incohérences. Ainsi, dans l'exemple affiché, l'agent A_{10000} se voit affecter un temps de transport nul et un mode de transport TC (Transport en commun). On notera également que, pour un agent donné, la somme des durées affectées aux différentes activités n'est pas contrainte (par exemple à 24 h). La prise en compte de ces deux types d'incohérences aurait nécessité la mise en œuvre d'une procédure beaucoup plus lourde, qui n'aurait pas garanti pour autant la qualité des résultats lors de l'étape suivante de génération des emplois du temps à partir de ces profils individuels d'activités.

Figure 7

Exemple de profils d'agents synthétiques générés par tirage aléatoire

Agent	A1	A2	...	A10000
Groupe	1	1	...	6
Mode de transport	TC	VP	...	TC
Retour domicile	Non	Oui	...	Oui
Temps au domicile (flexible)	> 18H	> 18H	...	12 – 18H
Temps au travail (fixe)	4 – 7H	0	...	4 – 7H
Temps de transport	1 – 2H	1 – 2H	...	0
Temps en courses (optionnel)	0	< 30 min	...	> 30 min
Temps de loisirs (optionnel)	0	0	...	0
Temps d'accompagnement (flexible)	0	0	...	0
Temps de visite (optionnel)	> 20 min	> 20 min	...	> 20 min
Zone de résidence	1 001	301	...	2 401

Toutefois, au-delà de ces incohérences possibles, la procédure retenue permet de reproduire une bonne image de la population initiale à partir des profils de groupes. La comparaison systématique des effectifs relatifs des modalités pour chaque variable et chaque groupe révèle en effet une proximité acceptable (< 5 %) des profils par classe (Figure 8).

Dans le même esprit, la confrontation des zones de résidence des agents simulés avec celles de l'EMD révèle une très bonne adéquation ($R = 0,9$).

3.3. L'affectation des agents aux lieux de résidence et de travail

3.3.1. Affectation des agents à un lieu de résidence

Nous avons retenu une procédure en trois temps, fondée sur une structure spatiale emboîtée. Soient :

- Z_i une zone de EMD
- I_k l'îlot k , $I_k \subset Z_i$,
- B_j le bâti j , $B_j \subset I_k$,
- A_i l'agent i , $A_i \subset B_j$,

Figure 8
Comparaison des profils d'activités observés et simulés par classe

		Groupes					
		1	2	3	4	5	6
Temps passé dans les transports	Aucun	- 1,12	- 0,22	0,23	- 0,22	0,17	- 0,05
	Moins de 30 min	0,49	0,95	- 1,06	- 0,20	- 0,95	- 0,76
	31 à 65 min	1,03	- 1,46	0,82	0,57	- 0,51	0,21
	66 min à 2H	- 0,88	- 1,98	- 1,22	2,51	0,78	0,00
	Plus de 2H	0,47	2,72	1,22	- 1,51	0,50	0,61
	Somme des valeurs absolues des écarts	4,00	7,33	4,55	5,01	2,91	1,62
Temps passé au domicile	Moins de 6H	- 0,73	0,00	- 0,27	- 0,32	- 0,06	0,06
	6 à 12H	0,04	- 0,47	0,03	0,02	0,05	0,32
	12 à 18H	3,55	1,29	- 0,14	- 0,85	0,15	0,41
	Plus de 18H	- 2,87	- 0,82	0,37	1,14	- 0,14	- 0,79
	Somme des valeurs absolues des écarts	7,20	2,58	0,81	2,33	0,40	1,58
Temps passé au lieu de travail ou d'études	Aucun	1,02	- 3,54	- 0,41	0,91	- 0,16	0,18
	Moins de 2H	- 0,18	- 0,45	0,14	- 0,28	- 0,30	- 0,19
	2 à 4H	- 0,20	0,93	- 0,07	- 0,51	- 0,01	- 0,21
	4 à 7H	0,29	4,64	0,20	- 1,41	0,16	0,22
	Plus de 7H	- 0,93	- 1,58	0,15	1,29	0,32	0,00
	Somme des valeurs absolues des écarts	2,63	11,14	0,97	4,40	0,96	0,79

La première étape consiste à affecter aléatoirement chaque agent à une zone de EMD Z_l , selon une probabilité :

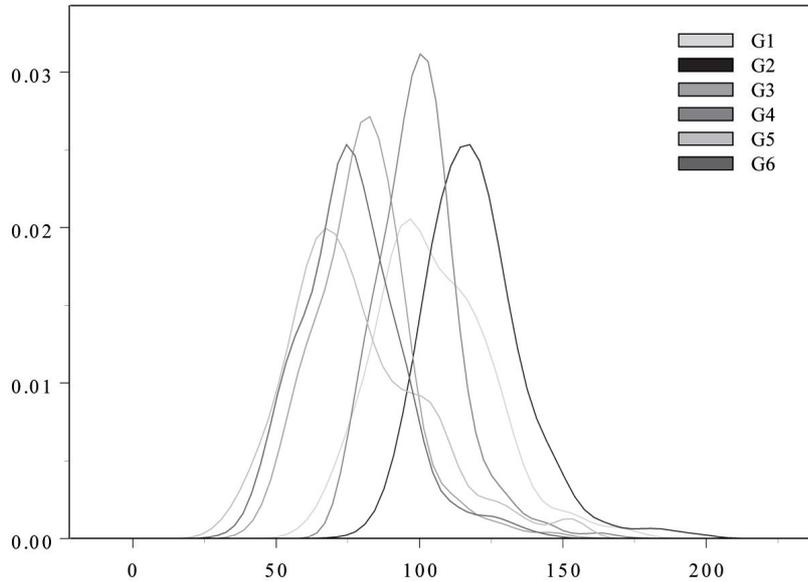
$$P(Z_l) = \frac{n_{Z_l}}{\sum_{l=1}^n n_{Z_l}},$$

avec n_{Z_l} le nombre observé d'individus de l'EMD par zone.

La deuxième étape consiste à affecter aléatoirement chaque agent à un îlot I_k , au sein de la zone de l'enquête ménages Z_l précédemment définie. La procédure retenue ici exploite le groupe d'appartenance des agents, afin de différencier les îlots en fonction de leur « proximité » à ce groupe. La notion de proximité repose sur une comparaison systématique des profils socio-démographiques des îlots avec les profils des 6 groupes constitués. Cette comparaison îlot/groupe est réalisée par le calcul d'une distance euclidienne pour chaque couple de modalités et pour un degré de liberté $n-1$:

$$d(I_k, g_{A_i}) = \sqrt{\sum_{m=1}^n (x_{I_k, m} - x_{g_{A_i}, m})^2}$$

Figure 9

Distribution des distances des îlots aux six groupes d'agents

La Figure 9 montre les distributions statistiques de ces distances, obtenues pour les 6 groupes. On notera que les distances moyennes des groupes 3, 5 et 6 sont significativement moindres que celles des trois autres groupes, exprimant une plus grande proximité des îlots à ces trois groupes définis.

L'objectif est alors de ventiler les différents agents, affectés au préalable à chacune des zones Z_i , à l'un des îlots constituant cette zone, selon une probabilité :

$$P(I_k) = 1 - \frac{d(I_k, g_{A_i})}{\sum_{k=1}^n d(I_k, g_{A_i})}, \quad \forall A_i \subset Z_i, I_k \subset Z_i$$

La dernière étape, enfin, consiste à affecter chaque agent à un élément du bâti B_j , en fonction des zones et des îlots précédemment fixés. Cette affectation finale est réalisée au moyen d'un calcul de potentiel au bâti (Banos et Thévenin, 2008).

3.3.2. Affectation des agents à un lieu de travail

L'objectif est ici d'exploiter toute information externe permettant de reproduire, au moins dans ses grandes tendances, la géographie

locale des flux quotidiens. La première information clé est dans cette perspective une matrice origine-destination (OD) construite à partir de l'EMD. Cette matrice possède une structure classique, avec $n(Zr_i - Zt_j)$ le flux (en nombre de déplacements) entre la zone de résidence i et la zone j pour le motif « travail ».

Soit Zr_i la zone de résidence affectée à l'agent A_i à l'issue de l'étape 1. L'objectif de cette nouvelle étape est alors d'affecter à cet agent A_i une zone de travail Zt_j , en fonction des flux recensés dans la matrice O/D entre Zr_i et l'ensemble des zones de travail $Zt(Zt_1, \dots, Zt_j, \dots, Zt_m)$. Cet objectif revient à tirer au hasard une zone au sein de l'ensemble Zt , en fonction d'une probabilité conditionnelle $P(Zt_j/Zr_i)$ définie par :

$$P(Zt_j / Zr_i) = \frac{P(Zr_i \cap Zt_j)}{P(Zr_i)} = \frac{n(Zr_i Zt_j)}{\sum_{j=1}^m n(Zr_i Zt_j)} = \frac{n(Zr_i Zt_j)}{\sum Zr_i}$$

L'introduction d'une contrainte de distance dans cette procédure permet enfin d'assurer une cohérence des résultats obtenus avec l'un des attributs des agents, le temps quotidien de transport. L'exploitation d'une seconde matrice, de distances cette fois-ci, permet de définir cette contrainte. L'idée est de ne travailler que sur un sous-ensemble zt de Zt , tel que :

$$zt \in Zt \mid d_{A_i} - \varepsilon \leq d(Zr_i, Zt_j) \leq d_{A_i} + \varepsilon$$

avec $d_{A_i} = f(t_{transport, A_i})$, c'est-à-dire la distance que l'agent A_i est susceptible de parcourir compte tenu de son temps et son mode de transport, et ε une distance seuil à fixer par l'utilisateur.

Cette étape d'affectation spatiale permet donc de reproduire les grandes structures géographiques observées : localisation des domiciles et des emplois et flux domicile-travail. L'objectif suivant est de combiner cette information avec les données précédentes (activités et durées) pour créer des emplois du temps spécifiques à chaque agent.

4. SIMULER LES JOURNÉES DE LA POPULATION ET LA VILLE EN MOUVEMENT

L'objectif de la génération des emplois du temps est d'ordonner dans le temps et dans l'espace les tâches qui sont attribuées à chacun des agents de la population synthétique. La création d'un emploi du temps s'effectue automatiquement en prenant en considération la

durée de chaque activité, le temps de transport nécessaire pour se déplacer d'un lieu d'activité à un autre, et une typologie des tâches à effectuer par l'agent. Au cours de cette section nous abordons dans un premier temps la typologie des activités. Ensuite nous présentons le processus général de reproduction des programmes d'activités avant de nous focaliser plus en détail sur l'algorithme utilisé. La Figure 8 décrit la démarche complète de génération des emplois du temps.

4.1. Classification des activités

Parmi l'ensemble des activités qu'un individu souhaite planifier au cours d'une journée, certaines apparaissent prioritaires. Il est, par exemple, impératif d'aller travailler alors que les achats domestiques peuvent être reportés au lendemain. Cette hiérarchie entre les tâches a été établie selon trois niveaux (Stopher *et al.*, 1996) :

- les activités fixes (par exemple le travail) qui sont impérativement réalisées dans un lieu spécifique avec une durée précise ;
- les activités flexibles (par exemple l'accompagnement) qui possèdent une marge de manœuvre sur la durée et/ou le lieu. Une telle tâche peut s'accomplir dans des lieux différents avec une durée variable ;
- les activités optionnelles qui outre leur flexibilité spatiale et temporelle ne doivent pas obligatoirement être réalisées (par exemple les loisirs).

Cette typologie se traduit par une flexibilité variable dans l'espace et dans le temps de l'exécution des activités. C'est pourquoi nous caractérisons les tâches manipulées dans le cadre du projet MIRO selon trois paramètres majeurs :

- l'obligation d'exécution : une activité peut être obligatoire ou non ;
- la durée : une activité peut avoir une durée fixe, minimale, maximale ou encadrée entre deux bornes (une durée minimale et une maximale) ;
- la localisation : une activité, comme le travail par exemple, s'effectue dans un lieu unique (c'est-à-dire, le lieu professionnel principal) alors que d'autres sont réalisables dans divers lieux. La tâche « Achat » en est un exemple.

Ces propriétés constituent des contraintes clefs pour la génération des emplois du temps. Elles sont déterminées pour chaque type de tâche manipulée. En fonction des valeurs attribuées, le système de génération de l'emploi du temps est alors autorisé à supprimer ou non une tâche, à modifier sa durée, etc. Ainsi nous éliminons tous les problèmes liés à la concurrence des activités et nous rendons la génération d'un emploi du temps toujours possible.

Figure 10

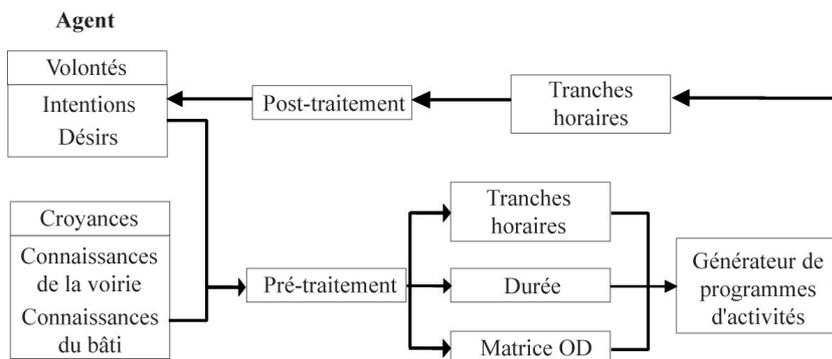
Typologie des tâches manipulées

Tâche	Caractère	Durée	Localisation	Obligation
Travail	Fixe	Déterminée	Déterminée	Obligatoire
Accompagnement	Flexible	Variable	Déterminée	Obligatoire
Domicile	Flexible	Variable	Déterminée	Obligatoire
Achat	Optionnel	Variable	Variable	Optionnelle
Repas	Flexible	Variable	Variable	Obligatoire
Visite	Optionnel	Variable	Variable	Optionnelle
Loisir	Optionnel	Variable	Déterminée	Optionnelle

4.2. Génération des emplois du temps

Le système de génération des emplois du temps est exécuté pour chaque individu de la population synthétique. Il définit les horaires de début et de fin de chaque tranche d'activité. En effet, une même tâche se voit parfois découpée en plusieurs tranches panachées à différents moments de la journée. Par exemple, il est courant que l'activité « travail » soit décomposée en deux tranches, l'une s'accomplissant le matin et l'autre l'après midi. Les emplois du temps créés tiennent compte de la durée de chaque activité définie lors de la génération de la population synthétique, des contraintes d'accessibilité aux bâtiments (horaire d'ouverture et de fermeture des lieux de travail, des magasins, etc.) ainsi que des temps de transport. Il est important de noter ici que tous ces paramètres sont définis pour un agent « moyen », représentatif des individus de la population synthétique, par l'intermédiaire de désirs, et d'une connaissance partielle de son environnement urbain. La génération des emplois du temps repose alors sur un principe simple qui se décompose en trois étapes (Figure 11).

Figure 11

Démarche de génération des emplois du temps

L'objectif de la phase de pré-traitement est triple : (i) l'extraction, à partir de l'état mental de l'agent, des données nécessaires à la génération de l'emploi du temps de ce dernier ; (ii) la réalisation d'un calcul préliminaire en vue d'optimiser la génération de l'emploi du temps ; (iii) la construction d'une requête qui sera traitée par le moteur de génération de plannings. L'étape de calcul de planning engendre un emploi du temps avec des tâches ordonnées et datées. Enfin, au cours de l'étape de post-traitement, l'emploi du temps généré lors de l'étape précédente est injecté dans les désirs de l'agent sous la forme d'intentions. Ces dernières seront la cause des déplacements de l'agent mobile pendant la simulation. De nombreux algorithmes de génération d'emplois du temps sont présentés dans la littérature. Certains se basent sur la théorie des graphes, d'autres sur des algorithmes génétiques (Aickelin et Dowsland, 2004). Cependant, à notre connaissance, aucun d'entre eux ne propose une solution pour organiser des tâches pouvant se décomposer en plusieurs tranches et respectant des contraintes externes comme les horaires d'ouverture et de fermeture du bâti.

Les approches traditionnelles de programmation par un langage impératif tel que JAVA ne sont pas adaptées pour la création d'un algorithme tel que nous le souhaitons. Notre choix s'est donc porté sur l'utilisation d'un outil emprunté au domaine de l'intelligence artificielle : le solveur CLP(FD) de SICSTUS Prolog. L'utilisation de CLP(FD) repose sur une démarche simple : (i) la création de variables (par exemple : x, y, z) ; (ii) la définition de contraintes sur ces variables (par exemple : $x > y, x < z, y = 10, z = 20$) ; (iii) et l'évaluation automatique de ces variables par l'exécution du solveur (par exemple : $x \in]10 ; 20[$). Le fonctionnement interne de SICSTUS Prolog est détaillé notamment dans les travaux de M. Carlsson et *al.* (1997) et C. Holzbaur (1997).

Les variables de sortie, représentatives des emplois du temps, sont évaluées en fonction des paramètres d'entrée du solveur et de trois grands types de contraintes :

- les contraintes d'intégrité vérifient la cohérence des emplois du temps (par exemple le non dépassement par l'emploi du temps des 24 h quotidiennes). Elles contrôlent notamment qu'une tranche d'activité commence bien avant de se terminer et qu'elles ne se chevauchent pas ;
- les contraintes d'environnement assurent que les tranches d'activité s'accomplissent bien aux moments où cela est possible. Ainsi, l'activité de restauration s'effectue impérativement dans une fenêtre de temps [11 h 00, 15 h 00] ;

– les contraintes de transport doivent être prises en compte, dans la mesure où un temps de transport est souvent nécessaire pour transiter d'un lieu d'activité à un autre. En première approximation, cette contrainte revient à découper le budget-temps de transport affecté à chaque individu et à l'intercaler entre tout couple d'activités.

Après l'ajout des différentes contraintes sur les variables, le solveur est en mesure de générer un emploi du temps. Lorsque le solveur ne trouve aucune solution, la phase de prétraitement est à nouveau exécutée afin de réduire la complexité de l'emploi du temps.

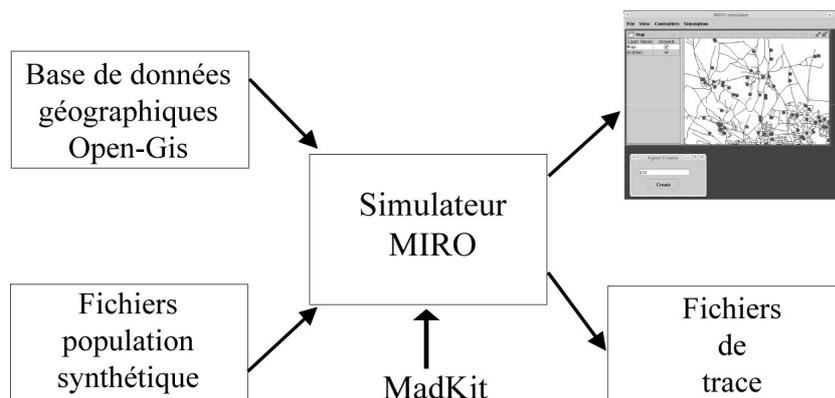
4.3. Simuler la ville en mouvement

Le modèle a été implémenté dans un simulateur multi-agents Ce dernier, développé à partir de la bibliothèque de simulation RAFALE-SP, s'interface avec la plate-forme MADKIT qui l'exécute. Le simulateur MIRO extrait les informations nécessaires à l'exécution du modèle à partir d'une base de données My-SQL Open-GIS, et de fichiers textes (Figure 12). La base de données géographique contient toutes les données cartographiques de la ville de Dijon (tronçons de route et bâti) qui sont essentielles à la création d'un environnement virtuel où se déplacent les agents. Les fichiers textes renferment, quant à eux, les informations importantes pour la création des agents représentatifs de la population synthétique.

Un très grand nombre de données peuvent être extraites lors de l'exécution du modèle : la position des mobiles à chaque instant, l'activité de chaque mobile, le taux d'occupation d'un tronçon, et pour

Figure 12

Paramètres et sorties du simulateur MIRO



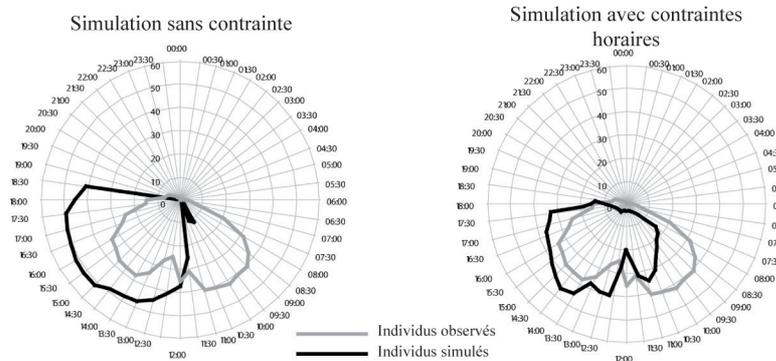
chaque agent, l'emploi du temps qu'il génère et celui qu'il exécute réellement, etc. Certaines de ces informations sont visualisables en « temps réel » grâce à une interface englobante qui s'inspire de celle des SIG. Mais pour la plupart, elles sont stockées dans des fichiers de trace permettant ainsi une analyse *a posteriori* par la plate-forme d'intégration visuelle. MIRO est, par ailleurs, parallélisable sur une grappe d'ordinateurs. Ainsi il est possible de réaliser des simulations à large échelle avec un temps de réponse plus réduit tout en augmentant la complexité du modèle (par exemple le nombre d'agents, de tronçons, etc.). Actuellement, le simulateur présente, malgré tout, des faiblesses de performances causées par l'utilisation du module SICS-TUS Prolog de génération d'emplois du temps. Un effort doit être porté sur ce point car lorsque ce module n'est pas utilisé, il devient possible de faire évoluer près de 80 000 agents en parallélisant le simulateur sur quatre serveurs de calcul seulement.

4.4. Validation des emplois du temps créés

Valider les résultats d'une simulation multi-agents n'est pas chose aisée (Amblard *et al.*, 2006). L'enjeu est pourtant fondamental, au point qu'un groupe de travail a été dévolu à cette question cruciale dans le projet MIRO2. Nous nous focaliserons ici sur la validation des emplois du temps spatialisés engendrés, afin de donner une idée des difficultés rencontrées. Afin de valider le moteur de génération d'emplois du temps, les solutions construites par le solveur sont comparées aux emplois du temps observés dans l'enquête ménage. Deux simulations portant sur la même population synthétique ont retenu plus particulièrement notre attention (Figure 13).

La différence majeure entre les deux simulations repose sur le paramètre jouant sur les horaires d'ouverture et de fermeture des lieux d'activités comme le travail ou les espaces de loisirs. Dans la première, les agents étaient libres d'accomplir toutes les tâches à n'importe quel moment de la journée. Des conditions plus réalistes ont été introduites dans la seconde expérimentation : les tâches ne pouvaient s'accomplir que dans une fenêtre de temps limitée pour un lieu donné, définie à partir d'une enquête sur les horaires d'ouverture et de fermeture des lieux d'activités dijonnais. La lecture de la Figure 13 permet de mesurer les différences entre les deux scénarios. La première simulation engendre des emplois du temps peu représentatifs de la population réelle. La majorité des individus simulés travaille en effet uniquement l'après-midi. Les résultats du second test reflètent davantage la réalité. Les agents simulés commencent leur journée de travail vers 10h00 pour la terminer vers 18h00, ce qui révèle un léger décalage avec la

Figure 13

Distribution horaire des individus observés et simulés pour le motif travail

situation observée. Les horaires d'ouverture et de fermeture des lieux d'activités jouent donc un rôle significatif sur le comportement de mobilité des individus simulés. Grâce à ces contraintes, les emplois du temps générés se rapprochent de ceux réellement effectués par les Dijonnais.

Toutefois, au delà de la seule activité « travail », il s'agit de vérifier que l'ordonnancement des activités et les temps alloués à chaque activité correspondent à des profils d'emplois du temps probables (c'est à dire raisonnablement proches des profils d'emplois du temps observés dans les enquêtes). La difficulté provient du caractère adaptatif du comportement des agents et de leur capacité d'apprentissage (entendue ici sous la forme limitative d'une mise à jour dynamique de leur base de connaissances). A la fin de chaque journée, les agents évaluent en effet leur emploi du temps et, si cela s'avère nécessaire, en recalculent un nouveau, afin d'améliorer leurs chances de succès le jour suivant. Chaque agent fait ainsi évoluer son emploi du temps initial de manière relativement autonome, en fonction de son expérience récente et de l'évolution de sa base de connaissances.

Les analyses que nous présenterons ici portent sur un échantillon de 40 agents pour lesquels nous avons simulé les emplois du temps sur quatre journées consécutives. Nous travaillons à partir des données décrivant les emplois du temps de chaque individu. Il s'agit de chroniques d'activités découpées, pour chaque journée, en 250 pas de temps de 5 minutes (soit environ 20 heures), chaque pas de temps étant renseigné par le type d'activité réalisé.

Figure 14

Temps moyen passé aux activités (en heure décimale)

Temps quotidien moyen	J our 1	J our 2	J our 3	J our 4
Repas	0,65	0,61	0,60	0,00
Travail	2,56	2,61	2,26	2,26
Achat	0,10	0,12	0,00	0,00
Loisir	0,01	0,11	0,00	0,00
Déplacement	1,99	1,76	1,68	1,39
Accompagnement	0,02	0,04	0,01	0,0
Autres	0,00	0,00	0,00	0,00
Domicile	13,20	12,60	12,78	13,86
Inconnu	2,30	2,98	3,50	3,30

4.5. Analyse des Budgets-temps

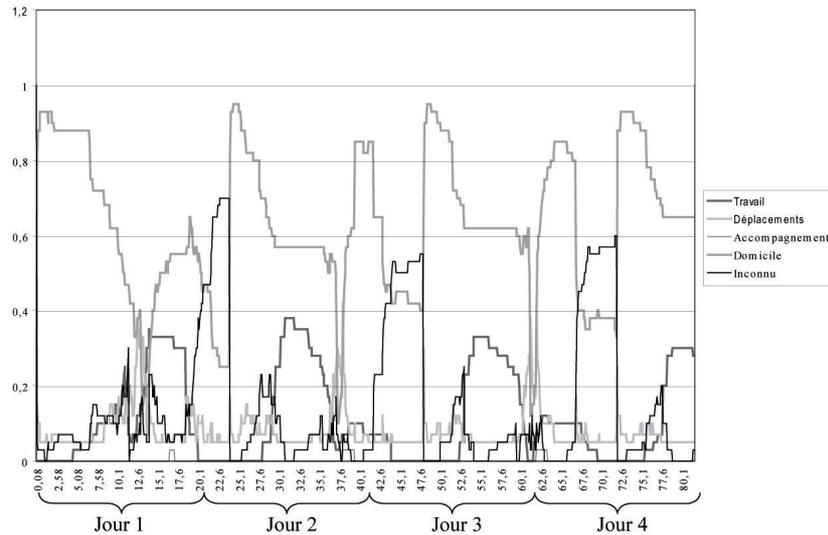
Il est possible de construire des indicateurs synthétiques rendant compte des budgets-temps alloués aux différentes activités par les individus (Figure 14). Ces premiers indicateurs montrent en moyenne une stabilité dans les temps passés chaque jour aux différentes activités. Trois activités se dégagent nettement : « domicile », « travail » et « inconnu ». Ce dernier critère correspond à des pas de temps où le simulateur ne peut donner d'information sur l'activité de l'agent. La part importante de cette activité dans le budget-temps des agents est une difficulté puisqu'elle est difficilement interprétable et semble pourtant peser dans les emplois du temps. On remarquera quelques autres difficultés, comme l'absence de l'activité « repas » lors de la 4^{ème} journée. La part des déplacements n'est pas négligeable et correspond, globalement en proportion, à la part habituelle trouvée dans des échantillons d'EMD par exemple.

4.6. Analyse globale des rythmes quotidiens

Afin de prendre en compte les rythmes des activités au cours des quatre journées simulées, nous montrons sur les figures suivantes la part des agents réalisant chaque type d'activité. Ainsi, nous pouvons observer que les agents adoptent un cycle circadien, c'est-à-dire qu'ils sont capables de répéter des structures d'emplois du temps semblables d'une journée à l'autre. Le graphique suggère en effet un rythme circadien des activités. L'interprétation de chacune des courbes per-

Figure 15

**Part des agents en activité au cours des 4 journées simulées
(Domicile-Travail-Déplacement/accompagnement)**



met de vérifier si les agents ordonnent leurs activités de manière cohérente : ainsi, ils enchaînent le départ du domicile par un déplacement qui les mène le plus souvent à l'activité travail. On note également une superposition des courbes « déplacement » et « repas » en milieu de journée qui indiquent peut-être la prise du déjeuner en dehors du lieu de travail.

CONCLUSION

L'objectif du projet MIRO n'était pas de simuler le plus précisément possible des comportements individuels variés, mais plutôt d'évaluer l'influence de comportements individuels archétypiques raisonnables (orientés notamment vers la programmation et la mise en œuvre de programmes quotidiens d'activités) et adaptatifs sur le fonctionnement collectif de l'espace urbain. Cette posture de recherche nous semble susceptible d'offrir, à terme, un cadre conceptuel, méthodologique et technique permettant de tester, par simulation, les impacts macroscopiques de scénarios urbains différenciés du point de vue des contraintes et des opportunités à l'œuvre.

Les Systèmes multi-agents fournissent un cadre méthodologique pertinent pour opérationnaliser les outils conceptuels de la *Time geo-*

graphy. Cette « association » implique toutefois la définition d'une ontologie commune, dont nous n'avons fait qu'esquisser ici les principaux traits. De plus amples recherches seraient nécessaires pour parvenir à la définition d'agents « *geographicus* » pleinement satisfaisants. Par ailleurs, la question de l'évaluation et de la validation du modèle construit reste posée. L'un des enjeux du projet MIRO2 est précisément de progresser dans ces deux directions, tout en préservant la dimension opérationnelle du modèle construit. En particulier, l'un de ses objectifs centraux est de contribuer aux débats actuels sur la ville « durable », à travers la question de l'accessibilité. Car si la ville cohérente est aujourd'hui mise en avant par rapport aux deux pôles traditionnels que sont la ville étalée d'un côté et la ville dense de l'autre, il fait sens de mieux définir les contours d'une telle ville. En particulier, peut-on à la fois la rendre plus accessible et moins mobile ?

Références bibliographiques

- Aickelin U., Dowsland, K., 2004, An indirect genetic algorithm for a nurse scheduling problem, *Journal of computers & Operations Research*, 31, 5, p. 761-778.
- Amblard F., Rouchier J., Bommel P., 2006, Evaluation et validation de modèles multi-agents. In : Amblard F., Phan D. (ss. dir.), 2006, *Modélisation et simulation multi-agents*, Hermès Sciences Publishing, pp. 103-140.
- André-Poyaud I., Chardonnel S., Charleux L., Tabaka K., 2007, La mobilité au Cœur des emplois du temps des citadins, *2e Rencontres internationales d'Urbanisme*, Grenoble, France.
- Arentze T., Hofman F., Van Mourik H., Timmermans H., 2002, Spatial transferability of the ALBATROSS model system : empirical evidence from two case studies, *Transportation research record*, 1805, pp. 1-7.
- Axhausen K. W., 1991, *Eurotopp. Toward a dynamic and activity-based modelling framework*, *Advanced Telematics in Road Transport*, Proceedings of the DRIVE Conference, Elsevier Scientific CO.
- Bailly J.P., Heurgon E., 2001, *Nouveaux rythmes urbains : quels transports ?*, Ed. de l'Aube, 221 p.
- Balmer M., Nagel K., Raney B., 2004, Large scale multi-agent simulations for transportation applications, *Journal of intelligent transport systems*, 8(4), pp. 205-221.
- Banos A., Thévenin T., 2008, Création de champs de potentiel et simulation d'itinéraires à partir de l'enquête ménages-déplacement. In : Thériault M., Des Rosiers F. (dir.), 2008, *Information Géographique et Dynamique Urbaine, Volume 1, Analyse et simulation de la mobilité des personnes*, Hermès Sciences Publishing, pp. 119-138.
- Banos A., Thévenin T., 2005, La carte animée pour révéler les rythmes urbains, *Revue Internationale de Géomatique*, 15, 1, pp. 11-31.
- Barrett C.L., Beckman R.J., Berkgigler K.P., Bisset K.R., Bush B.W., Eubank S., Henson K.M., Hurford J.M., Kubicek D.A., Marath M.V. E. , Romero P.R.,

- Smith J.P., Smith L., Speckman P.L., Stretz P.E., Thayer G.L., Van Eeckhout E., Williams M.D., 2004, *TRANSIMS*, Volume 1-4, Los Alamos Unclassified Report.
- Benenson I., Torrens P., 2004, *Geosimulation : automata-based modelling of urban phenomena*, John Wiley and Sons, Chichester, 286 p.
- Bonnel P., 2004, *Prévoir la demande de transport*, Presse de l'ENPC, 415 p.
- Bonfiglioli S., 1997, Politiques sur les temps urbains : le panorama des villes italiennes. In : Obadia A. (dir.), 1997, *Entreprendre la ville : Nouvelles temporalités – Nouveaux services*, L'Aube, pp. 144-159.
- Carlsson M., Ottosson G., Carlson B., 1997, An open-ended finite domain constraint solver, Proc. Programming Languages : Implementations, logics and programs, U. Montanari and F. Rossi EDS Number 1292 in LNCS. Springer-Verlag, Southampton, UK, pp.191-206.
- CERTU, 2008, *L'enquête ménages déplacements « Standard CERTU »*. Guide méthodologique, CERTU, 204 p.
- Chardonnel S., 2001, La Time-geography : les individus dans le temps et dans l'espace. In : Sanders L. (dir.), 2001, *Modèles en Analyse Spatiale*, Hermès Sciences Publications, pp.129-153.
- Chapin F.S., 1974, *Human activity patterns in the city : things people do in time and in space*, John Wiley & Sons, 272 p.
- Clarke M., 1986, *Activity modelling. A research tool or a practical planning technique ?*, Behavioral Research for Transport Policy, VNU Science Press, pp. 3-15.
- Dupuis G., 1999, *La dépendance automobile : symptômes, analyses, diagnostic, traitements*, Economica, 160 p.
- Epstein J., Axtell R., 1996, *Growing artificial societies : social science from the bottom up*, Brookings Institution Press, MIT Press, 210p.
- Epstein J., 1999, Agent-based computational models and generative social science, *Complexity*, 4, 5, pp. 41-60.
- Greaves S., Stopher P., 1998, A synthesis of GIS and Activity-based travel-forecasting, *Geographical Systems*, 5, pp. 59-89.
- Hägerstrand T., 1970, What about people in regional science ?, *Papers of the Regional Science Association*, 24, pp. 7-21.
- Holzbaur C., 1995, OFAI clp(q,r) Manual, Edition 1.3.3, *Austrian Research Institute for Artificial Intelligence*, Vienna, TR-95-09.
- Jones P., 1979, New approaches to understanding travel behaviour : the human-activity approach, *Behavioural travel modelling*, pp. 55-80.
- Kitamura R., Fuji S., 1997, Two computational process models of activity-travel behavior. In : Gärling T., Laitila T., Westin K., (eds.), 1997, *Theoretical foundations of travel choice modelling*, Pergamon Press.
- Lenntorp B., 1976, Paths in space-time environments : a time-geographic study of movement possibilities of individuals, *Lund Studies in Geography B*, 44, 150 p.
- Marilleau N., Lang C., Chatonnay P., Philippe L., 2005, Un méta-modèle à base d'agents pour modéliser la mobilité urbaine, Actes de la 3e Conférence Internationale « Science Electronique, Technologies de l'Information et des Télécommunications », Sousse, Tunisie.
- Marilleau N., Lang C., Chatonnay P., Philippe L., 2006, An agent-based framework for urban mobility simulation, *Proceedings of the 14th IEEE Euromicro Conference on Parallel, Distributed and Network based Processing*, Montbéliard, France, pp. 355-361.

- Masson S., 1998, Interaction entre système de transport et système de localisation : de l'héritage des modèles traditionnels à l'apport des modèles interactifs de transport et d'occupation des sols, *Les cahiers scientifiques du transport*, 33, p. 79-108.
- Mc Nally M.G., 2000, The activity-based approach. In : Hensher A., Button J. (dir.), 2000, *Handbook of transport modeling*, Elsevier Science Ltd.
- Nagel, K., Marchal F., 2003, Computational methods for multi-agent simulations of travel behavior, *Proceedings of the 10th International Conference on Travel Behaviour Research (IATBR)*, Lucerne, Switzerland.
- Ortuzar J., Willumsen.G., 1994, *Modelling transport*, John Wiley & Sons, 439 p.
- Portugali J., 2000, *Self-organization and the city*, Springer, 352 p.
- Quinet E., 1998, *Principes d'économie des transports*, Economica, 410 p.
- Recker W., MC. Nally M., Root G., 1986, A model of complex travel behavior. Theory and operational model, *Transportation research A*, 20, pp. 307-330.
- Stopher P.R., Hartgen DT., Yuanjun L., 1996, SMART : simulation model for activities, resources and travel, *Transportation*, 23, pp. 293-312.

CHAPITRE 8

FRETURB : SIMULER LA LOGISTIQUE URBAINE

Jean-Louis Routhier
Florence Toilier

Laboratoire d'Economie des Transports
UMR 5593 CNRS, ENTPE, Université de Lyon
14 rue Berthelot – 69363 Lyon cedex 07
jean-louis.routhier@let.ish-lyon.cnrs.fr

Les transports de marchandises sont aujourd'hui rarement pris en compte dans la modélisation de la mobilité urbaine. Il y a deux raisons essentielles à cela. D'une part, les collectivités n'ont manifesté pendant longtemps que peu d'intérêt pour cette fonction pourtant essentielle de l'économie urbaine ; il n'existe pas en effet d'autorité organisatrice de transport public des marchandises, contrairement à la mobilité des personnes. D'autre part, les questions méthodologiques pour appréhender le sujet n'ont été partiellement résolues que récemment. Ce chapitre présente une démarche de modélisation des Transports de marchandises en ville (TMV) qui s'appuie sur les récentes avancées méthodologiques, principalement réalisées à la faveur du programme « Marchandises en Ville »¹ développé avec l'aide du PREDIT.

Nous considérerons dans un premier temps les contraintes et enjeux méthodologiques qui doivent être surmontés pour élaborer un outil d'aide à la décision en logistique urbaine. Après une brève revue de la littérature sur les modèles de transport urbain de marchandises, nous montrerons le chemin qui a été suivi pour produire la connaissance pertinente préalable à la construction d'un outil de simulation du transport urbain de marchandises et qui a abouti à l'élaboration du modèle FRETURB (Routhier et Aubert, 1999 ; Routhier et Toilier, 2007), modèle dont nous présenterons ensuite les principales étapes

1. à l'initiative de la Direction de la recherche et des affaires scientifiques et techniques (DRAST) du Ministère des Transports et de l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'Energie (ADEME), et sous l'impulsion de J.G Dufour, chargé de mission à la DRAST.

pour en expliquer le fonctionnement. Enfin, nous en montrons la portée à travers quelques unes de ses applications récentes.

1. LES ENJEUX DU TRANSPORT DE MARCHANDISES EN VILLE

Le transport de marchandises en ville (TMV) peut être décomposé en trois segments distincts :

- les échanges de marchandises entre les établissements économiques de la ville, quels qu'ils soient. On considère ici la totalité des livraisons et des enlèvements de marchandises réalisés auprès de tous les établissements d'une agglomération. Cela concerne les approvisionnements des petits commerces à partir d'un entrepôt, les livraisons de petits colis en express, les déplacements des artisans lorsqu'ils transportent du matériel installé sur place, les livraisons à domicile, aussi bien que la messagerie traditionnelle. Les autres déplacements professionnels ne donnant pas lieu à une installation, une livraison, ou un enlèvement de marchandises ne sont pas pris au compte ;

- les déplacements des personnes effectués pour approvisionner leur ménage (désignés généralement comme les déplacements d'achat, motorisés ou non) ;

- enfin, les déplacements de biens et de matériaux nécessaires à la gestion de la ville (essentiellement l'acheminement et le déblaiement des matériaux des chantiers de voirie ou de constructions, les déménagements, etc.).

Cette typologie se justifie non seulement par les fonctions différentes mises en jeu mais aussi par les sources de données qui en rendent compte et qui sont également très différentes. Ainsi circonscrit, il s'avère que le transport urbain de marchandises représente un segment essentiel dans la mobilité urbaine. Quelques chiffres-clés illustrent bien son poids dans la ville (LET, 1996, 1999). La répartition du TMV entre ces trois segments est la suivante (LET et Gérardin Conseil, 2001) :

- en ce qui concerne les flux inter-établissements, il faut compter en moyenne un mouvement de livraison ou enlèvement de marchandise par emploi et par jour. Les UVP-km² ainsi générés représentent environ 40% du trafic de marchandises effectué dans une agglomération ;

2. UVP : unité véhicule particulier (VP). Par ailleurs, un véhicule utilitaire léger (<3,5t) correspond à 1,5 VP, un camion porteur à 2 VP, et ensemble articulé à 2,5 VP. On trouve des équivalences identiques dans le chapitre consacré à SIMBAD (Chapitre 4).

– les déplacements des particuliers pour réaliser leurs achats correspondent à environ 10 % de l'ensemble des déplacements des personnes dans la ville. Si l'on ne conserve que la fraction de ces déplacements réalisés en véhicule particulier et qu'on la compare aux autres composantes du trafic de marchandises, beaucoup moins importantes en termes de flux, alors les déplacements motorisés pour achats représentent environ 50 % des UVP-km ;

– les flux de gestion urbaine représentent de leur côté environ 10 % du nombre total de UVP-km.

L'ensemble du transport de marchandises en ville a pu être rapproché des déplacements individuels motorisés (hormis les achats). On calcule que sur l'ensemble des déplacements motorisés générés par une agglomération française (donc hors transit d'agglomération), le TMV représenterait en moyenne 15 % des déplacements de véhicules et 20 % des véhicules.km, soit 25 % des UVP-km. Selon E. Segalou *et al.* (2006), ce trafic est responsable de 25 % de la consommation d'équivalent pétrole, 25 % du CO₂ émis, du tiers des NO_x et du SO₂, et de près de la moitié des particules (PM10) émises par l'ensemble du trafic motorisé d'une agglomération.

A ces enjeux quantitatifs liés aux flux et à leurs conséquences physiques sur l'environnement s'ajoutent bien d'autres enjeux essentiels :

– la dynamique économique, tant commerciale qu'industrielle est soumise aussi bien à l'arbitrage entre une bonne accessibilité aux voies de communication rapides et aux aires de distribution, qu'à la question de la congestion des zones denses et au problème de la disponibilité d'un espace urbain rare (l'espace est d'autant plus coûteux que l'on se rapproche des aires de distribution) ;

– l'aggravation des contraintes urbaines entraîne un renchérissement du coût du transport et de la logistique urbaine (car dans une chaîne logistique donnée, les derniers kilomètres sont les plus coûteux), ce qui nécessite une recherche constante de l'optimisation des organisations et des outils logistiques mis en œuvre (nouveaux véhicules, nouveaux espaces logistiques urbains, etc.) ;

– le TMV est confronté aux questions de qualité de vie urbaine, notamment à travers l'arbitrage nécessaire entre spécialisation fonctionnelle des espaces et mixité des activités ;

– le TMV est en prise directe avec les grandes mutations urbaines, tant du point de vue des changements de comportement à la faveur des évolutions technologiques et des habitudes de consommation que des modes de distribution (développement du e-commerce et de la livraison à domicile, recentrage de la grande distribution, etc.), ainsi que des

espaces logistiques urbains (naissance d'une réhabilitation des lieux de stockage en proximité des centres). Ces changements s'accompagnent d'une mutation rapide des métiers du secteur des transports.

Aussi, les collectivités sont de plus en plus souvent confrontées à ces enjeux, qu'elles doivent prendre en compte tant sur le plan de la réglementation que sur celui de la recherche d'orientations vers un développement harmonieux et durable de l'espace urbain.

Ce tableau rapide des enjeux montre bien que l'on doit considérer le transport de marchandises en ville comme procédant d'un système complexe, concernant la plupart des acteurs économiques et institutionnels. Il suscite en effet de multiples questions auxquelles les aménageurs sont de plus en plus confrontés. Pour tenter d'y répondre, ils doivent disposer d'outils de diagnostic pertinents.

2. MODÉLISER LE TMV : DES DIFFICULTÉS...

L'analyse de la mobilité des marchandises en ville n'étant envisagée dans sa spécificité que depuis quelques années, les modèles de transport urbain de marchandises sont encore aujourd'hui très peu développés.

2.1. Les limites des modèles traditionnels

Deux principales familles méthodologiques peuvent inspirer *a priori* le modélisateur du TMV. La première concerne les modèles de simulation des transports interurbains de marchandises. Dans cette famille, trois types de modélisation sont généralement pratiquées (Durand, 2001) :

- les modèles d'interaction spatiale, qui s'appuient soit sur un modèle gravitaire généralisé, soit sur le modèle de l'entropie (Pini, 1990), soit sur les modèles à base de coefficients structurels (Durand, 2001a,b) ;
- les modèles intersectoriels qui sont composés d'un module économique et d'un module de transport (Gaudry *et al.*, 1988) ;
- enfin, les modèles de réseau (Jourquin, 1996), selon lesquels des solutions à coût minimum sont déterminées sur un réseau constitué de liens virtuels qui modélisent l'ensemble des opérations de transport et de logistique entre les acteurs économiques de chaque région.

Parallèlement, il peut également être tentant de transposer aux marchandises les acquis issus des nombreuses années d'administration d'enquêtes et de modèles sur les déplacements de personnes. La seconde famille fait donc référence aux modèles de transports urbains

de personnes, qui sont traditionnellement des modèles à quatre étapes (génération des déplacements, distribution de zone à zone, répartition modale, affectation sur les réseaux ; cf. Chapitre 2, point 3.2). Les déplacements sont motivés par les programmes d'activité de chaque personne d'un ménage résidant dans une zone. Ces déplacements sont décrits sur une journée complète dans les Enquêtes ménages déplacements (EMD) périodiquement réalisées dans les principales villes de France. Ils sont dépendants principalement des caractéristiques socio-professionnelles des individus et des ménages. Leur distribution respecte généralement un modèle de coût de type gravitaire. Le mode utilisé est alors déterminé en fonction des capacités à payer (disponibilité d'une automobile entre autres critères) et des temps de parcours par mode, selon un modèle de choix discret. Enfin, les flux distribués par mode sont intégrés dans une procédure d'affectation sur les réseaux, en fonction de la capacité et de la vitesse à vide de chaque tronçon de voirie pour ce qui concerne la voiture particulière.

Dans les deux cas, il est alors possible de répondre à l'objectif de calcul des distances parcourues par les individus ou les marchandises selon différents modes, dans le but essentiel de mesurer l'adéquation des infrastructures de transport avec les besoins de transport. Aucune de ces approches n'a pourtant été valablement transposée à la problématique du TMV, du fait de la forte spécificité de la logistique urbaine qui pose un problème méthodologique particulier.

2.2. Des problèmes de méthode

Que ce soit pour produire une information statistique ou pour modéliser un phénomène, nous faisons, avec A. Bonnafous (1989, 2000) l'hypothèse que nous sommes confrontés aux trois exigences de cohérence, de pertinence et de mesurabilité du phénomène analysé, qui conditionnent l'opérationnalité d'un modèle. D'une part, un modèle doit en effet respecter un principe de cohérence au sens de non contradiction avec les objectifs fixé ; d'autre part, même s'il demeure que la modélisation revient à travailler sur des représentations simplifiées de la réalité, « l'exigence de pertinence correspond à la conformité [...] du modèle à l'état des choses » ; enfin, « l'exigence de mesurabilité est impliquée à la fois par l'ambition d'élaborer un modèle opérationnel et par la nécessité de vérifier sa pertinence ». « Lorsque ces trois conditions sont satisfaites, la démarche a de bonnes chances d'atteindre ses objectifs théoriques (puisqu'elle a la cohérence nécessaire), de refléter convenablement l'état des choses (puisqu'elle est pertinente) et d'être convenablement contrôlable (puisque la mesurabilité du concept est assurée) ».

En ce qui concerne les modèles de transports urbains de personnes, les lieux d'activité des individus sont généralement déterminés en fonction du motif de déplacement (travail, loisirs, affaires personnelles, etc.) et d'un coût généralisé du transport. Une matrice origine-destination (OD) des déplacements est alors construite à partir d'un modèle gravitaire. L'unité d'observation est tout naturellement le déplacement d'un individu d'un point à un autre.

Les modèles interurbains de marchandises s'appuient par contre sur l'hypothèse forte selon laquelle l'organisation du transport au sein de chaque mode (routier, ferroviaire, fluvial, maritime ou aérien) est unique : c'est la trace directe d'une région (ou d'une ville) à un autre, sans autre alternative possible, chaque région (ou ville) étant réduit à un point. On considère alors une équivalence entre la quantité de marchandise transportée et le mobile qui permet de la transporter (camion, wagon, conteneur, avion). Cela permet de rapporter la matrice OD des marchandises échangées avec celle des véhicules qui réalisent le transport. L'objet d'observation sera indifféremment la tonne de marchandises ou le véhicule.

Pour ces deux familles de modèles, la cohérence, la pertinence et la mesurabilité sont assurées par la construction d'une matrice OD des déplacements des biens et des personnes. Celle-ci permet d'atteindre l'objectif du calcul des distances parcourues. Or, le transport de marchandises en ville repose sur des bases complètement différentes :

- il est réalisé par des opérateurs divers (en compte propre ou en compte d'autrui) ;
- à l'aide de véhicules très différents (de la fourgonnette à l'ensemble articulé) ;
- pour livrer des biens de poids, de volume et de conditionnement également très variés (du pli express au lot complet) ;
- avec des fréquences et des rythmes liés aux exigences de flux tendu ou de juste à temps des chaînes logistiques et des activités desservies.

Chacun de ces éléments fait système au sein de ce que l'on appelle la logistique urbaine. Ainsi, une matrice OD des marchandises transportées en ville, qu'elle soit estimée par une enquête ou simulée à l'aide d'un modèle, ne peut pas se traduire simplement par des flux OD de véhicules : une tonne (ou un mètre cube) de produits émis d'une zone origine à une zone destination peut être acheminée soit en « trace directe » entre les deux zones, soit fractionnée en un grand nombre de petits colis dont certains seront transportés directement et dont d'autres seront livrés à la faveur d'une « tournée » pouvant donner lieu à des dizaines de livraisons (Bonnafous, 2000). Or, en ville, environ

75 % des livraisons et enlèvements sont réalisés en tournées plus ou moins complexes (Patier et Routhier, 1998 ; LET, 1996, 1999). Aussi, la tonne transportée d'un lieu à un autre, variable statistique utilisée généralement dans les modèles de transport interurbains, devient inopérante dans le cas du transport urbain.

2.3. L'émergence d'une nouvelle famille de modèles

Aujourd'hui, en Europe, divers outils de simulation des flux de véhicules sont appliqués dans plusieurs villes pour représenter le transport de marchandises. Ces outils s'appuient sur des modèles de génération et de distribution des flux de véhicules. Les trois modèles que nous décrivons succinctement ci-dessous s'appuient sur des données spécifiquement recueillies pour les alimenter et cherchent à répondre à la question de la génération des parcours des véhicules en tournées. Ils sont principalement utilisés par les collectivités locales. Pour plus de détail, on pourra se référer à H. Sonntag *et al.*, 2007.

a. Allemagne : WIVER – VISEVA

A la fin des années 1980, un modèle a été développé en Allemagne à partir des données d'enquêtes collectées dans trois villes : Munich, Berlin et Hambourg (Sonntag, 1985). Des enquêtes complémentaires ont été effectuées pour déterminer le comportement des chauffeurs-livreurs. Cette collecte des données a demandé un travail considérable du fait de la complexité des interactions à l'origine de la génération du trafic. La construction des matrices OD de véhicules a été obtenue en quatre étapes :

- génération des origines des tournées ;
- sélection des destinations des tournées par affinité avec les origines ;
- mise en relation des origines et destinations, selon une sensibilité négative à la distance ;
- construction des tournées, par la combinaison de trajets simples qui optimisent les économies de trajet à partir de l'origine de la tournée ;

Cette succession d'étapes permet d'obtenir une estimation du trafic OD de véhicules impliqués dans la distribution urbaine de marchandises entre les différentes zones d'une ville. Le modèle WIVER a été intégré dans le logiciel VISEVA, qui est un modèle de prévision du trafic de voitures particulières et du réseau de transport en commun, permettant ainsi d'estimer les flux de véhicules liés aux mouvements de personnes et de marchandises (Lohse, 2004).

b. Italie : CITY-GOODS

CITY-GOODS est un modèle de simulation développé par G. Gentile et V. Vigo (2007) pour le compte de la région Emilie-Romagne en Italie. Le modèle est développé à partir des résultats d'une enquête qui, comme celles qui ont donné lieu à FRETURB, est conçue spécifiquement dans le but d'alimenter un modèle de simulation. La méthodologie d'enquête et l'architecture de la méthode de modélisation ont donc été développées simultanément. Le modèle est décomposé en deux étapes :

- génération : étant donnée une activité et sa localisation dans la ville, un nombre de mouvements est généré. Cette étape est réalisée en utilisant une extension d'un modèle d'index de catégories, qui s'appuie sur la hiérarchie des classes d'activités économiques ;
- distribution, qui comporte deux phases : (i) application d'un modèle gravitaire pour estimer les couples OD et (ii) construction des tournées en utilisant un algorithme d'optimisation des tournées de véhicules.

Le but du modèle est de générer un nombre annuel de flux de véhicules pour le transport de marchandises en ville. CITY-GOODS est utilisé dans plusieurs villes de la région Emilie-Romagne.

c. France : FRETURB

La démarche exposée ici est issue d'une réflexion menée il y a une quinzaine d'années. En 1993, démarrait le programme national « Marchandises en Ville ». Cette réflexion a rapidement abouti au constat d'une grande pénurie de connaissance et de la nécessité de mener avec l'aide de l'Etat une campagne d'enquêtes qui permettent de mettre à la disposition des collectivités des outils de diagnostic pertinents, efficaces et peu coûteux. Le programme s'est donc rapidement orienté vers une démarche conjointe de collecte de données par enquêtes et de modélisation pour construire des outils d'aide à la décision accessibles pour les collectivités. Le modèle FRETURB, que nous décrivons ci-dessous, a été construit simultanément à la réalisation des enquêtes. D'autres modèles du même type sont développés hors d'Europe, notamment au Canada (Stefan *et al.*, 2005).

3. L'EXPÉRIENCE FRANÇAISE DE MODÉLISATION DU TMV

Devant l'impossibilité à transposer les modèles existants, il est nécessaire de construire de nouveaux modèles, spécifiques au transport urbain de marchandises. Trois questions se posent alors : quelle

variable mesurer pour répondre aux objectifs fixés ? Quelle est l'unité statistique pertinente ? Quelles sont les données nécessaires compte tenu de la problématique ?

3.1. Construire un modèle pour le TMV

(i) Quelle variable mesurer ? Si nous essayons de focaliser notre objectif sur la gestion de l'espace urbain pour limiter la congestion et réduire les nuisances, la principale question à propos du transport de marchandises en ville est l'occupation de la voirie par les véhicules de livraison car ils entrent en compétition avec d'autres usages (véhicules des particuliers, transports collectifs, espaces de circulation des modes doux, trottoirs, etc.). L'occupation de la voirie est à considérer selon ses deux composantes que sont les véhicules en circulation et ceux qui sont en stationnement pour livraison, ce qui permet d'expliquer la congestion et les conditions d'accessibilité.

(ii) Quelle unité d'observation ? L'objectif ici est avant tout d'observer, de mesurer et de comprendre comment le TMV participe à l'occupation d'un espace rare : la voirie. Dès lors, il ne s'agit pas tant de savoir ce qui sera emporté en zone i pour être livré en zone j que de repérer les mouvements de véhicules dans les zones i et j. Ce sont donc les mouvements de véhicules induits par les expéditions et réceptions de marchandises par chaque établissement qui nous intéressent davantage que les flux de marchandises eux-mêmes. Ces mouvements, considérés en tant que consommateurs d'espace, désignent non seulement les déplacements des véhicules, mais aussi les lieux et les conditions de stationnement pour les livraisons et la durée d'occupation de ces lieux. L'intérêt d'observer le mouvement, réside dans le fait que c'est le seul événement dont l'observation permet de décrire simultanément les trois sphères suivantes :

- le fonctionnement et la stratégie logistique de chaque activité (quels sont les besoins et avec quelle fréquence ?). Ces éléments sont décrits par les responsables de l'établissement ;

- le comportement des opérateurs de transport effectuant les livraisons ou les enlèvements (qui transporte, avec quels moyens, de quelle manière ?). Ces éléments sont décrits par le chauffeur ayant réalisé l'opération. Pour observer la manière dont s'organise, dans l'espace et dans le temps, la séquence d'arrêts et de déplacements, la connaissance du flux de véhicules doit passer par une analyse des itinéraires ;

– les conditions spatiales dans lesquelles ces opérations se déroulent (environnement de l'établissement, accessibilité, densité, etc.). Ces éléments sont décrits par les personnes travaillant dans l'établissement.

Il est ainsi possible d'établir le lien entre les activités économiques et l'occupation de la voirie par les véhicules de livraison. Le « mouvement », défini comme l'« événement correspondant à une réception ou un enlèvement de marchandise ou les deux en même temps, réalisé par un véhicule dans un établissement donné », s'avère comme l'unité d'observation statistique la plus pertinente.

(iii) Quelles données nécessaires ? Deux acteurs principaux sont impliqués dans la réalisation du mouvement. Il s'agit de l'établissement (réceptionnaire ou expéditeur) et de l'opérateur de transport (en l'occurrence le chauffeur livreur). Par exemple, le nombre et le type de véhicules utilisés pour livrer un établissement dépendent des produits transportés, de leur nature, de leur conditionnement, de leur poids, de leur volume, ainsi que de la fréquence des livraisons. Comme nous l'avons constaté précédemment, de telles données ne sont pas collectées dans les statistiques habituelles, ni au niveau local, ni au niveau régional. Sous l'hypothèse que les flux de marchandises dépendent de la nature des activités génératrices, il est nécessaire d'enquêter les établissements générateurs de flux. En effet, c'est seulement auprès de ces derniers que l'on peut recueillir les informations telles que les contraintes relatives aux produits à transporter, le nombre et le type de véhicules qui s'arrêtent chaque jour dans l'établissement, etc. En revanche, c'est le chauffeur qui est le mieux à même de décrire son parcours et la logique de la tournée au cours de laquelle il a visité l'établissement. Pour apporter les informations nécessaires à la problématique posée, il convient donc d'enquêter simultanément les établissements et les chauffeurs desservant ces établissements (Patier et Routhier, 2009).

Il s'agit d'observer, de mesurer et de comprendre comment le TMV consomme la ressource rare qu'est l'espace de voirie. En s'appuyant sur les trois questions décrites ci-dessus, nous avons de bonnes chances d'y parvenir : la démarche est pertinente car en observant et mesurant les mouvements de véhicules sur les lieux de livraison ou d'enlèvement de la marchandise, on appréhende à la fois la durée et les conditions de stationnement du véhicule et la distance qu'il aura parcourue. Elle trouve sa cohérence dans le fait qu'elle répond au besoin de description des conditions d'occupation de la voirie. Enfin, le critère de mesurabilité est satisfait car en interrogeant le responsable de l'établissement sur les opérations générées par son activité et en demandant au

chauffeur comment est organisé son parcours, il est possible de mesurer les interactions entre le générateur et l'opérateur de transport dont les comportements mutuels permettent d'expliquer la formation des deux composantes de l'occupation de la voirie : la durée et les conditions de stationnement pour livraison et les distances parcourues par le véhicule impliqué dans cette livraison. De plus, cette mesurabilité à l'échelle d'un mouvement peut être étendue à l'échelle de la ville, grâce à une enquête sur un échantillon représentatif d'établissements dont les résultats sont redressés sur la base des renseignements fournis par le fichier exhaustif d'établissements SIRENE de l'INSEE.

Ces réflexions nous ont amenés à considérer non pas la marchandise, ni le véhicule comme unité statistique, mais le mouvement dans la construction du modèle. Pour ce faire, des enquêtes spécifiques ont été réalisées afin d'alimenter le modèle.

3.2. Une démarche conjointe de collecte de données et de modélisation.

Les enquêtes « Marchandises en Ville » en France (LET, 1996, 1999) ont été réalisées dans trois agglomérations de tailles différentes : Bordeaux, Marseille et Dijon (cf. point 3.3). Elles se sont attachées à mesurer avant tout un nombre d'opérations (livraison ou enlèvement) effectuées par les établissements enquêtés, selon les caractéristiques fines de ceux-ci. Ces caractéristiques ont été sélectionnées de façon à rendre la simulation possible sur n'importe quelle ville française, en utilisant les informations issues des fichiers SIRENE de l'INSEE disponibles sur l'ensemble du territoire national. Cela a permis d'établir une typologie des établissements et d'attribuer à chacun des types, un nombre hebdomadaire de mouvements, qui correspondent aux passages d'un véhicule de livraison pour effectuer une opération dans l'établissement. Tous les indicateurs fournis par le modèle découlent de ce premier calcul, ce nombre étant ensuite réparti entre modes d'organisation, modes de gestion du transport et entre catégories de véhicules utilisés. Au total, le concept d'opération de livraison/enlèvement permet de cerner sur chaque zone d'une agglomération :

- le comportement des véhicules (durée et lieux de stationnement), qui permet de mesurer une occupation moyenne de la voirie par ces véhicules à l'arrêt en double file ou non ;
- les itinéraires parcourus pour réaliser ces livraisons, qui permettent de calculer les kilomètres parcourus par ces véhicules. On en déduit une occupation de la voirie par les véhicules en circulation ainsi qu'un nombre de véhicules.km générés par une zone ;

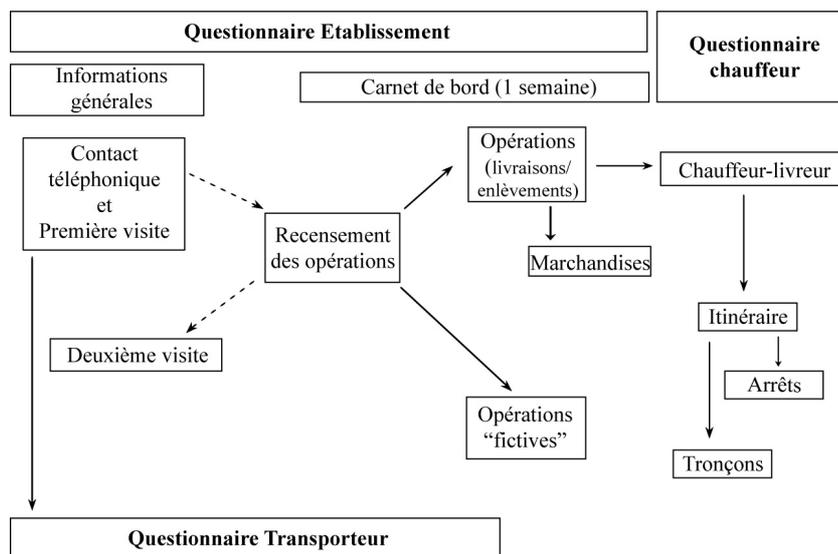
- la répartition spatiale des parcours effectués, qui permet de compléter la génération de la demande de transport sur chaque zone ;
- une occupation instantanée de la voirie par les véhicules de livraison, tant à l'arrêt qu'en circulation, qui peut être calculée par la connaissance des profils horaires des mouvements.

3.3. Les enquêtes nationales

La première enquête a été réalisée à Bordeaux en 1995, auprès d'un échantillon représentatif de 1 500 établissements parmi 40 000, sélectionnés selon une stratification en 37 types d'activité. Les principales caractéristiques de chaque établissement ont été décrites : son secteur d'activité, son effectif, sa superficie, son environnement (capacités de stationnement, voirie d'accès), son parc propre de véhicules. Sur un carnet de bord, ont été consignées l'ensemble des opérations de livraisons et enlèvement réalisées pendant une semaine. Un questionnaire a été remis par l'établissement aux chauffeurs qui ont effectué ces opérations au cours de la semaine. Parmi les 6 000 questionnaires remis, 903 ont été validés, avec une bonne description des parcours sur deux cartes fournies, précisant la localisation de chaque arrêt, l'itinéraire suivi, l'heure de début et de fin du parcours, le type de véhicule, l'adresse de l'employeur, etc.

Figure 1

Schéma fonctionnel d'une enquête nationale « Marchandises en Ville »



Deux autres enquêtes suivant la même méthodologie ont été réalisées en 1997 sur les agglomérations de Marseille (2 000 établissements enquêtés, 800 parcours décrits par les chauffeurs) et Dijon (1 000 établissements, 500 parcours). Au total, une base de données de 4 500 établissements et de 2 200 parcours a été constituée.

3.4. La constitution d'une typologie d'établissements en 116 groupes

L'hypothèse fondamentale du modèle découle du fait que la quantité de marchandises de diverses natures livrées ou enlevées dans un établissement dépend principalement de son activité, de sa taille et de la nature du local. En effet, les enquêtes TMV ont démontré que le nombre d'opérations réalisées au cours d'une semaine par des établissements d'un même type d'activité et de même taille n'est pas significativement différent d'une ville à l'autre. Ainsi, une stratification des établissements en 116 catégories a pu être construite pour expliquer la génération des mouvements dans chaque ville. Elle permet de rendre compte de l'effet des différents comportements logistiques des activités urbaines sur la formation des flux. Les enquêtes ont permis d'établir une description précise et statistiquement différenciée de ces 116 strates. Pour chacune, on peut déterminer :

- le nombre hebdomadaire moyen de mouvements générés ;
- la proportion des différents types de véhicules (véhicules utilitaires légers < 3,5T, camions porteurs, ensembles articulés) ;
- la part des différents modes de gestion : le transport peut être effectué par l'établissement ou son correspondant (compte propre destinataire ou expéditeur) ou par un professionnel du transport (compte d'autrui). Les organisations sont de natures différentes, l'impact sur les flux également) ;
- la part des traces directes (ou navettes) et des tournées.

Les enquêtes ont montré également que l'ensemble de ces caractéristiques sont relativement indépendantes de la localisation des établissements dans la ville et de la géographie de la ville (LET et Gérardin Conseil, 2000). Nous pouvons donc énoncer la règle suivante : « Le comportement logistique des établissements est essentiellement orienté par des facteurs économiques. Les facteurs locaux, tels que la géographie, la qualité des réseaux de transport, les stratégies de localisation à l'intérieur d'une agglomération peuvent être considérés comme des facteurs de second ordre ».

4. LE MODÈLE DE SIMULATION FRETURB

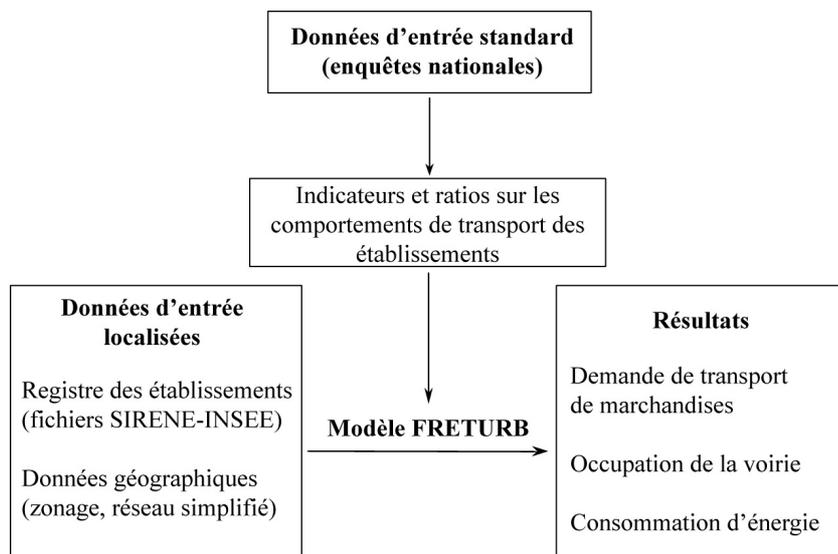
4.1. Les sources utilisées

Les résultats des enquêtes TMV ont permis de calibrer un modèle en faisant ressortir des caractéristiques standard indépendantes des spécificités de chaque ville enquêtée. La généralisation des résultats issus des données d'enquête à l'ensemble des établissements de la zone étudiée nécessite de disposer d'un fichier exhaustif d'établissements contenant des informations nécessaires pour définir leur appartenance à l'une des 116 strates définies plus haut. Les données propres à la ville d'étude sont donc constituées de deux sources d'information :

- la base des établissements, qui, en France, est issue du fichier SIRENE. Ce fichier permet de qualifier chaque établissement par rapport à son activité (selon la Nomenclature nationale des activités, NAF), sa taille (en classe d'effectif salarié), sa nature, son statut et sa localisation dans la ville ;
- une base d'information géographique, qui permet de définir le zonage auquel chaque établissement est affecté et sur lequel les résultats seront produits.

Figure 2

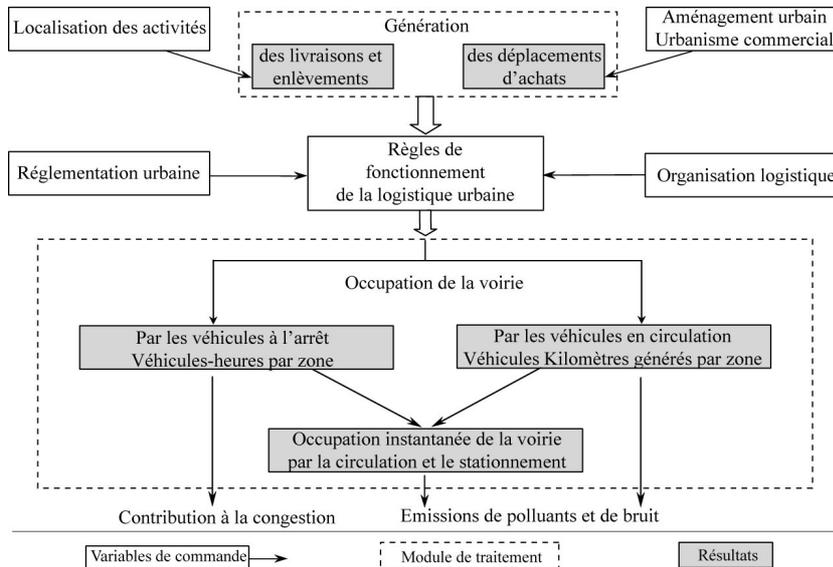
FRETURB : un modèle construit sur des données empiriques



A partir de ces deux fichiers, le modèle FRETURB permet d'établir un diagnostic du transport de marchandises en calculant des flux de livraisons ou d'enlèvements occasionnés par les déplacements des marchandises dans le périmètre. Du fait de sa construction, il peut être appliqué dans n'importe quelle ville, sans nécessiter d'enquête spécifique. Il permet alors d'estimer l'occupation de la voirie par les véhicules de livraison en stationnement comme en circulation et de produire ainsi des données utiles pour la mise en œuvre d'un bilan environnemental (LET *et al.*, 2002). Enfin, il propose une répartition des flux selon l'heure de la journée. En outre, le modèle propose d'autres indicateurs tels que le nombre d'opérations par emploi, la durée moyenne de stationnement ou le nombre moyen de kilomètres parcourus entre chaque opération par un véhicule. Le modèle FRETURB est aujourd'hui constitué de plusieurs modules interconnectés :

- la génération des mouvements ;
- la génération des distances parcourues ;
- la génération des durées de stationnement ;
- les rythmes horaires dans une journée type ;
- la distribution des flux de véhicules dans l'espace urbain ;
- la simulation des effets de divers scénarios de politiques d'aménagement et d'organisation logistique sur la base du diagnostic ainsi établi ;

Figure 3

Organigramme synthétique du modèle FRETURB

– enfin, les déplacements d’achats motorisés font également l’objet d’une estimation, pour les agglomérations disposant de données d’Enquêtes ménages déplacements³ (Routhier *et al.*, 2002a, Gonzalez-Feliu *et al.* 2009).

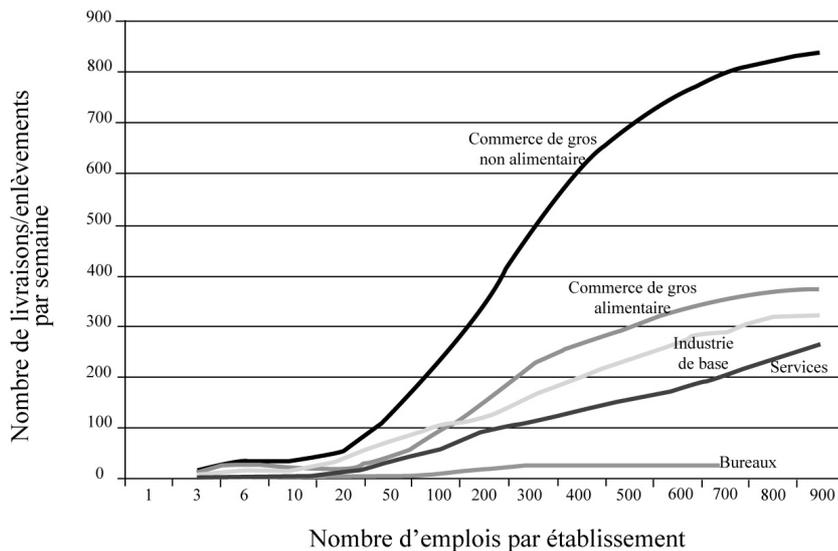
4.2. La génération des mouvements (livraisons et enlèvements)

Le nombre d’opérations de livraison ou d’enlèvement générées par l’activité économique d’une ville dépend essentiellement du type d’activités, de la nature du local et de la taille de l’établissement où est réalisée l’opération (Routhier et Aubert, 1999). Le nombre moyen hebdomadaire de mouvements n_e d’un établissement e est une fonction des caractéristiques a, l, o :

$$n_e = \varphi(a, l, o)$$

Figure 4

Exemple de courbes de génération des livraisons et des enlèvements selon l’activité et le nombre d’emplois (nombre de mouvements par établissement chaque semaine)



3. Ce volet ne sera pas développé ici.

où : n_e est le nombre de mouvements (livraisons, enlèvements et opérations conjointes) réalisés chaque semaine par l'établissement e , a est la catégorie d'activité (en 45 types), l est la nature et la fonction des locaux (commerces de différentes tailles, entrepôt, bureaux, siège social), et o est la classe d'effectif salarié (0, 1, 2-5, 6-9, 10-19, 20-49, 50-99, 100-199, 200-299, etc.).

Le nombre N_z de mouvements générés dans une zone z est :

$$N_z = \sum_{e \in z} n_e(a, l, o)$$

Pour chacune des 116 catégories $\varepsilon(a, l, o)$ d'établissements identifiées lors des enquêtes, on définit la fréquence $f_{v,m,r}(\varepsilon)$ des caractéristiques concernant le véhicule v , le mode de gestion m et le mode d'organisation r pour un type d'établissement ε .

$$N_z = \sum_{\varepsilon, v, m, r} N_{\varepsilon, z} \cdot f_{v, m, r}(\varepsilon) \quad [1]$$

où $N_{\varepsilon, z}$ est le nombre de mouvements générés par les établissements de catégorie ε dans la zone z .

4.3. Mesure de l'occupation de la voirie

L'occupation de la voirie par les véhicules de livraison est le résultat non seulement de la circulation mais aussi de la durée des arrêts des véhicules pour effectuer les livraisons. Ces deux aspects du trafic de marchandises contribuent à la congestion de la circulation urbaine. L'impact dépend à la fois des types de véhicules impliqués et du type de voirie sur lequel le véhicule livre ou circule. Le modèle calcule séparément ces deux indicateurs à travers la génération des distances et des durées de stationnement pour livraison.

4.3.1. Génération des distances

Les hypothèses de calcul des types de parcours sont les suivantes. Premièrement, les choix de transport et de logistique en aire urbaine sont déterminés par plusieurs facteurs, tous liés aux stratégies économiques des firmes : la minimisation des stocks, le juste à temps, la sécurité pour les véhicules et les biens transportés, etc. Deuxièmement, mises à part les traces directes, les origines et destinations des biens transportés sont différentes des origines

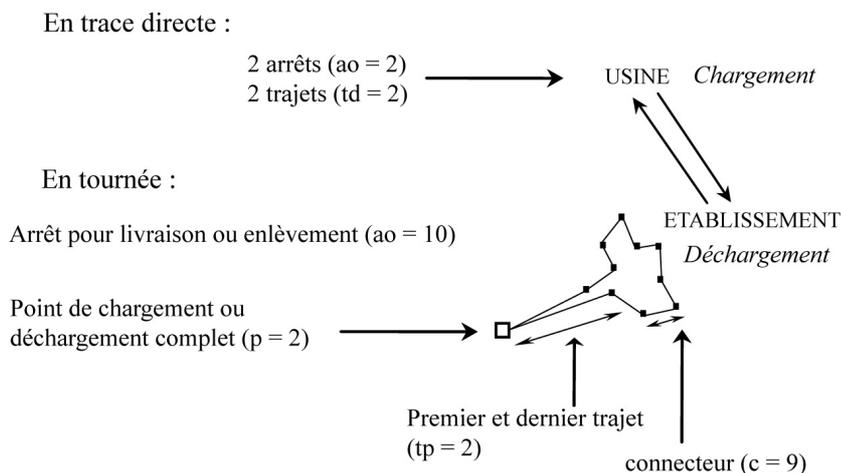
et destinations des véhicules (voir plus haut). Ainsi, l'optimisation des itinéraires par l'opérateur de transport est orientée par les critères suivants :

- le type de camion disponible ;
- la localisation du point de chargement initial, qui conditionne la longueur et la durée de la marche d'approche ;
- la nature de la marchandise de chaque livraison et la durée de chargement et de déchargement à chaque point touché de la tournée ;
- les horaires d'ouverture des établissements touchés (avec des fenêtres de temps dépendantes des activités desservies et de leur localisation, etc.) ;
- et surtout son envergure commerciale sur le terrain qui explique la densité de livraisons qu'il est susceptible de réaliser avec un minimum de coût.

Ces informations, si elles sont très utiles pour l'optimisation des tournées d'une entreprise unique, ne peuvent être considérées pour l'ensemble des acteurs du transport qui œuvrent sur une agglomération. Pour toutes ces raisons, nous n'avons pas fait le choix de reconstituer les tournées, mais de calculer la longueur de chacun des trajets qui composent une tournée ou une trace directe selon le schéma présenté dans la Figure 5 :

Figure 5

Les différents composants des parcours modélisés



Les symboles entre parenthèses désignent le nombre d'arrêts ou de trajets dans chaque situation. Une trace directe est généralement composée de deux arrêts (ao) (l'un pour enlèvement, l'autre pour livraison) et de deux trajets td . Dans une tournée on distingue le lieu principal de chargement ou de déchargement du camion p , des arrêts de livraison ou enlèvement ordinaires ao , chacun étant relié au suivant par un trajet désigné par le nom de connecteur c . Ainsi, $c=ao-1$. Deux trajets touchent le lieu principal p , correspondant généralement au premier et au dernier trajet de la tournée ($tp=p$). On désigne souvent le premier trajet sous le terme de « marche d'approche ». L'un de ces trajets est généralement réalisé à vide. Dans une tournée de n points, le premier point est généralement situé au même endroit que le dernier point, le dernier trajet correspondant au retour du véhicule à sa base. Le nombre de trajets est donc égal au nombre d'arrêts du véhicule : $t=n-1$. Le nombre de trajets générés dans une zone urbaine t_z peut alors s'écrire :

$$t_z = 2 * dr_z + 2 * p_z + (ao_z - p_z)$$

où : dr_z est le nombre de traces directes qui ont leur origine en z , p_z est le nombre de points principaux de tournées dans z , ao_z est le nombre de points de livraison ou enlèvements ordinaires réalisés dans z .

Il est de même en ce qui concerne les trajets :

$$t_z = td_z + tp_z + c_z$$

où : td_z est le nombre de trajets en trace directe réalisés pour livrer en z , tp_z est le nombre de trajets initiaux et terminaux des tournées réalisées pour livrer en z , et c_z est le nombre de connecteurs qui ont leur origine dans la zone z .

Les longueurs des parcours des chauffeurs ont été calculées selon les trois types de trajets définis ci-dessus, à savoir les trajets des traces directes, les trajets principaux de tournées et les trajets ordinaires ou connecteurs. Chacun de ces trois types a été à son tour décomposé, selon les cas, sur la base du type de véhicule, du mode de gestion, de la densité, etc. Finalement ce sont 25 fonctions de distance qui sont utilisées dans le modèle (Figure 6).

4.3.2. Modélisation des longueurs de traces directes l_{td}

La variable la plus discriminante est le type de véhicule, puis vient la taille de la ville, calculée par $R(V)$, le rayon moyen de la ville pondéré par le nombre de mouvements en trace directe de chaque zone de la ville V (Cf. [1]) comme le montre le Tableau 1 :

Figure 6
**Typologie en 25 groupes des fonctions de distance utilisées
 par le module 3 de FRETURB**

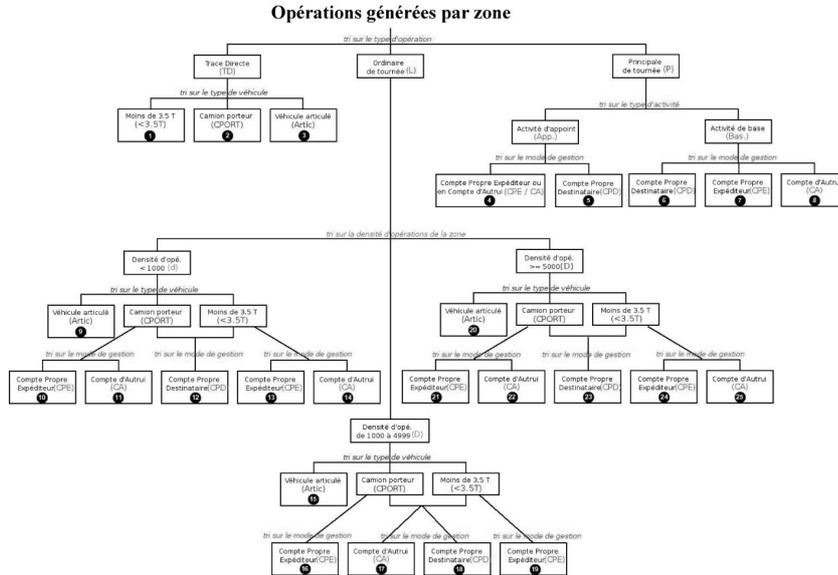


Tableau 1
**Paramètres déterminants des longueurs des traces directes
 retenus dans le modèle**

Véhicule v	Longueur moyenne d'une TD (km)
< 3,5t	8.7
Camion porteur	14.1
Ensemble articulé	23.6
wr (V)	
Marseille (568 km ²) : 8.8 km	18.2
Bordeaux (928 km ²) : 6.3 km	11.7
Dijon (161 km ²) : 3.6 km	5.1

Source : traitements des enquêtes TMV (LET, 1996, 1999)

Les enquêtes ont montré que pour un type de véhicule donné, l'activité desservie n'est pas un facteur discriminant des distances en traces directes. Le calcul des longueurs l_{td} d'une trace directe est alors fourni par l'équation :

$$l_{td}(v) = \alpha_{v,*} R(V) + \beta_v$$

La distance totale Ltd générée par le trafic des véhicules en trace directe dans une zone z est de la forme :

$$Ltd(v, z) = \sum_{\varepsilon, v} N_z \cdot f_{\varepsilon, v}(td) \cdot l_{td}(v) \quad [2]$$

où $f_{\varepsilon, v}(td)$ désigne la proportion des traces directes dans l'ensemble des mouvements de chaque catégorie d'établissement ε , pour chaque type de véhicule v .

Comme les résidus du modèle $l_{td}(v)$ sont indépendants du mode de gestion, ce paramètre n'apparaît pas dans l'équation. La présence dans le modèle l_{td} du rayon de la ville pondéré par la quantité de traces directes générées dans chaque zone traduit un modèle non gravitaire, bien que les trajets suivis par les marchandises en trace directe soient identiques aux trajets des véhicules.

4.3.3. Longueur des trajets principaux (l_{tp})

La variable la plus discriminante est la distance du générateur principal au centre de la ville. En effet, les tournées trouvent le plus souvent leur point de départ dans des entrepôts situés en périphérie urbaine. La fonction qui ajuste le mieux la longueur du trajet principal est une fonction linéaire de la distance de la zone au centre de gravité de l'agglomération pondérée par le nombre de mouvements de chaque zone. Elle s'écrit :

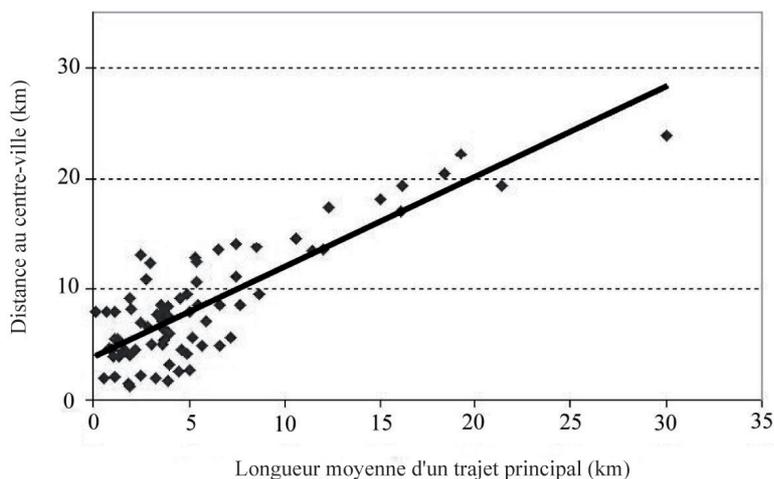
$$l_{tp_z} = \alpha_* vo(z) + \beta$$

où l_{tp_z} est la longueur d'un trajet principal généré dans la zone z , et $vo(z)$ est la distance à vol d'oiseau de la zone z au centre de gravité pondéré de l'agglomération.

L'analyse des résidus du modèle l_{tp_z} montre d'une part qu'il existe un écart significatif entre les distances générées par les activités de base (industrie, commerce de gros, entrepôts, agriculture) et par les activités de proximité (artisanat, services, petit commerce, grande distribution), et d'autre part que les distances des trajets principaux générés par les opérateurs en compte d'autrui sont différentes de celles qui

Figure 7

**Longueur moyenne d'un trajet principal de tournée
selon la distance au centre**



Source : traitement des enquêtes TMV (LET, 1996, 1999)

sont générées par le compte propre, qu'il soit réalisé par l'expéditeur ou par le destinataire.

$$ltp_{z, m} = \alpha_m * vo(z) + \beta_m$$

Tableau 2

Paramètres de détermination des distances des trajets principaux

Catégorie d'activité	Mode de gestion	α_m	p-value (test T)	β_m	p-value (test F)
Activités de proximité	Destinataires	0.540	1.3 E ⁻⁰⁴	2.15	0.1*
	Autres	0.543	1.1 E ⁻⁰⁵	4.28	1.7 E ⁻⁰⁵
Activités de base	Compte d'autrui	0.814	1.5 E ⁻⁷	4.65	1.6 E ⁻⁷
	Expéditeur	0.644	2.E ⁻⁶	5.75	2.E ⁻⁶
	Destinataires	0.806	0.02	4.49	0.22*

Source : enquêtes TMV (LET, 1996, 1999)

En ce qui concerne les destinataires, le nombre d'observations est insuffisant pour obtenir une bonne estimation du paramètre β_m du modèle. La part des trajets principaux dans l'ensemble des mouvements réalisés en tournée n'est pas significativement différente entre

Tableau 3
Part des trajets terminaux parmi les trajets en tournées selon l'activité
 (=TP%_{m,a})

Catégorie d'activité a	Compte d'autrui	Compte propre expéditeur	Compte propre destinataire
Services et artisanat	1%	11%	14%
Industrie	10%	36%	34%
Commerce de gros	5%	19%	46%
Grande distribution	5%	21%	0%
Petit commerce de détail	1%	10%	87%
Tertiaire de bureaux	3%	20%	1%
Transport / Entrepôts	72%	75%	100%

les trois villes d'enquêtes. Le Tableau 3, obtenu sur l'ensemble des établissements enquêtés des trois villes a été utilisée dans le modèle.

La distance totale des trajets principaux générés par une zone s'exprime ainsi :

$$Ltp(z) = \sum_{m,r,a,z} L_{m,z} \cdot N_{m,r,a,z} \cdot TP\%_{m,a}$$

La détermination de la longueur d'un trajet principal tp dépend du mode de gestion. Cela est cohérent avec le fait que la part de ces derniers varie fortement selon la catégorie d'activité (Cf. Tableau 3). Le type de véhicule n'est pas distingué à ce niveau, mais il est possible de calculer la distance par type de véhicule de la manière suivante :

$$Ltp(v,z) = \sum_{m,r,a,z} L_{m,z} \cdot N_{v,m,r,a,z} \cdot TP\%_{m,a} \quad [2]$$

$$\text{où : } N_{v,m,r,a,z} = \sum_{\varepsilon \in a} N_{\varepsilon,z} \cdot f_{v,m,r}(\varepsilon)$$

4.3.4. Longueur des connecteurs

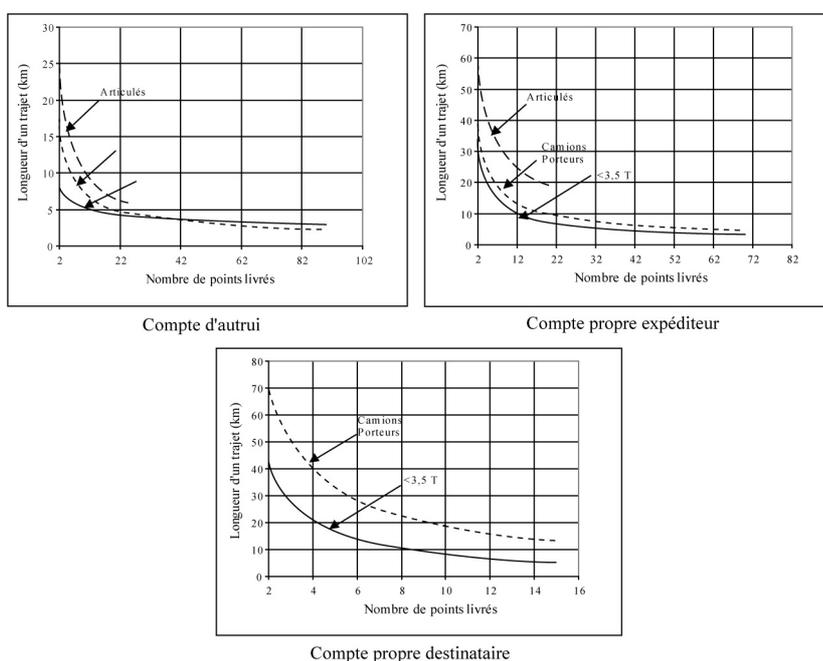
Les variables discriminantes dans la formation des longueurs d'un connecteur entre les arrêts pour les livraisons ou les enlèvement réalisés dans le cadre d'une tournée (Figure 8) sont les suivantes :

– le nombre d'arrêts pour livraison/enlèvement s dans la tournée (dans une journée de travail type d'un chauffeur, toutes choses égales par ailleurs, plus le nombre de points touchés est important, plus la durée totale des arrêts pour livraison est importante, plus le temps réservé à la circulation du véhicule est réduit et à vitesse constante, plus les distances des connecteurs sont petites) ;

- le type de véhicule v (les véhicules légers sont plutôt dédiés à la messagerie express dont les connecteurs sont plus rapprochés que ceux des poids lourds) ;
- le mode de gestion (les distances entre points de livraison réalisées en compte d'autrui sont plus rapprochées que celles du compte propre).

Figure 8

Longueur des connecteurs en fonction du nombre d'arrêts de la tournée, du mode de gestion et du type de véhicule utilisé



Pour prendre en compte les caractéristiques des espaces desservis, deux variables significatives ont également été introduites : la taille de la ville $R(V)$ définie plus haut, et la densité de mouvements δ_z dans les zones z (plus la zone est dense, plus les connecteurs sont courts, par le jeu des opportunités de chalandise).

$$l = \varphi(v, m, s, R(V), \delta_z)$$

Trois classes de densité δ ont été identifiées. La fonction générale devient alors :

$$l_{v,m,\delta}(s,T) = \alpha_{v,m,\delta} \log(s) + \beta_{v,m,\delta} R(V) + \gamma_{v,m,\delta} \quad [4]$$

où $\alpha < 0$,

Avec trois types de véhicules v , trois modes de gestion m , trois classes de densité δ , vingt sept relations ont dû être estimées. Dans certaines situations, le nombre d'observations était insuffisant pour obtenir une bonne estimation du modèle (R^2 faible, p -value des coefficients trop élevé) ; une formulation simplifiée a été adoptée. Finalement, un système de 17 équations de type [4] a été constitué pour prendre en compte la plus grande variété mesurable à partir des données disponibles (Toilier *et al.*, 2005a). La distance totale des connecteurs générée par une zone z est de la forme :

$$Lc(v, z) = \sum_{m,r,a,z} l_{v,m,\delta}(s, T) \cdot N_{v,m,r,a,z} \cdot (1 - TP\%_{m,a}) \quad [5]$$

La distance D_z (vehicule.km) générée par l'activité d'une zone z est selon [2], [3], [5] :

$$D_{z,v} = Ltd(v, z) + Ltp(v, z) + Lc(v, z)$$

Pour rendre compte de l'effet de la taille du véhicule sur la congestion, nous utilisons un coefficient de pondération qui permet d'exprimer les distances en UVP-équivalent :

$$D_z = 1.5 * D_{z,v1} + 2 * D_{z,v2} + 2.5 * D_{z,v3}$$

Il convient de relever que les distances générées par l'activité de chaque zone ont été calculées sans qu'il soit nécessaire d'affecter les flux sur un réseau, comme cela est généralement le cas dans les modèles de transport urbain de personnes. La difficulté liée à la structure non gravitaire des flux de véhicules entre les espaces urbains a été surmontée par la construction d'une segmentation des comportements logistiques des différentes activités dans la ville. Cela a permis d'expliquer comment se comportent les véhicules utilisés et les distances ont été calculées selon une décomposition des parcours en trajets. Selon les types de trajets, la fonction de résistance est soit la taille de la ville, soit la distance du générateur de la tournée, soit une fonction de densité.

4.4. Calcul de la durée de stationnement pour chargement et déchargement des marchandises

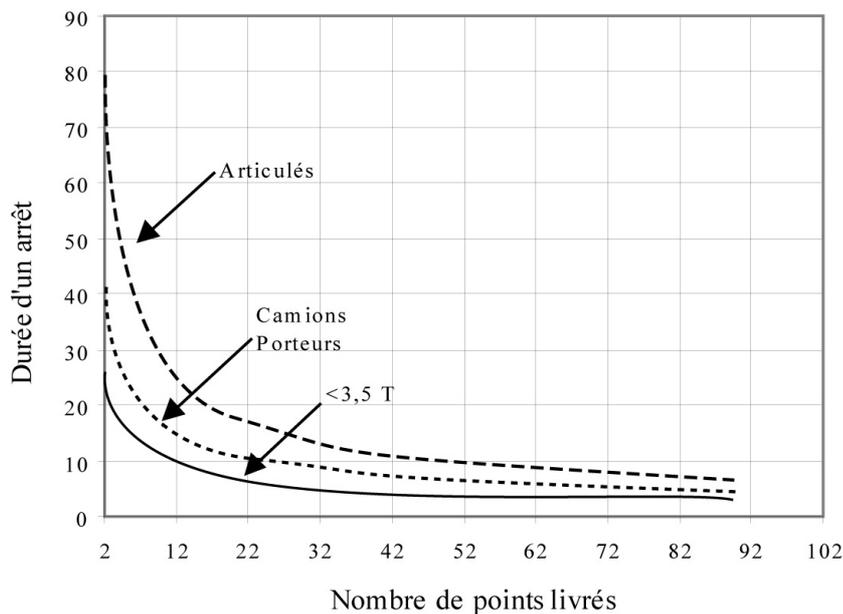
Comme nous l'avons précisé en introduction, le stationnement des véhicules de livraison sur la voirie représente un facteur de congestion important. C'est la raison pour laquelle nous avons développé un module de durée de stationnement pour livraison. Selon les enquêtes,

les principales variables explicatives de la durée des livraisons sont les suivantes :

- le type de véhicule v (qui rend compte en partie du volume des marchandises chargées ou déchargées et du conditionnement) ;
- la nature de l'arrêt (td : chargement ou déchargement lors d'une trace directe, tp : chargement principal d'une tournée, c : livraison ou enlèvement ordinaire) ;
- le nombre d'arrêts s lorsqu'il s'agit d'une tournée ;
- un paramètre de densité de la zone où s'effectue le mouvement (selon la densité de population δp_z et la densité de mouvements δm_z de la zone). C'est un indicateur synthétique qui rend compte de l'espace disponible autour de l'établissement à livrer et de la facilité ou non de trouver une place de parking et de réaliser rapidement la livraison ;
- la catégorie fine d'activité livrée (en 45 types) qui reflète le type de conditionnement, le volume des marchandises, la fréquence de livraisons.

Figure 9

Durée de stationnement selon le nombre d'arrêts d'une tournée
 $t_{s,v} = \varphi(s, v)$



Le stationnement peut se réaliser dans quatre conditions : (i) en double file, ce qui est le plus fréquent dans les zones denses des villes françaises, (ii) en stationnement interdit, (iii) en stationnement auto-

risé sur voirie (y compris les emplacements de livraison) ou (iv) en parking privé. Le stationnement en double file ayant l'impact sur la congestion le plus important, il a été examiné avec précision et peut être considéré de la manière suivante :

$$Tdp_z = \sum_{s,v,m,r} t_{s,v} \cdot dp_z \% \cdot N_{v,m,r,z}$$

où : Tdp_z est la durée totale de stationnement en double file dans la zone z , $t_{s,v} = \varphi(s, v)$ est la durée moyenne de stationnement (cf. Figure 7), $N_{v,m,r,z}$, le nombre de mouvements caractérisés par v, m, r dans la zone z , et $dp_z \% = \psi(\delta p_z, \delta m_z)$ est la part du stationnement réalisé en double file, avec :

$$dp_z \% = \alpha * \delta p_z + \beta * \delta m_z + \gamma$$

tel que : $\alpha = 0,00002$; $\beta = 0,00001$; $\gamma = 0,10013$, avec $R^2 = 0,76$

Comme observé dans les enquêtes, le parking en double file est en premier lieu dépendant de la densité de la zone, la réglementation du stationnement venant en second lieu. La part de parking en double file est toujours supérieure à $\gamma = 10\%$.

4.5. Heures de pointe du TMV

Le modèle fournit une indication sur les heures de pointe des livraisons par type de véhicules et selon la couronne desservie. Cette indication s'appuie sur les heures de livraisons observées sur une semaine auprès des 4500 établissements enquêtés. Ici encore, nous avons constaté que les heures de livraison sont d'abord soumises aux logiques propres des activités desservies, la taille et la géographie de la ville étant des facteurs de second ordre. Bien entendu cette simulation ne peut pas rendre compte des réglementations particulières et des horaires de livraisons susceptibles d'être en vigueur dans un quartier. Il est donc possible, sur une ville non enquêtée, de simuler les grands rythmes horaires des livraisons. Cela est précieux pour alimenter les modèles multimodaux d'affectation de trafic, notamment, à partir du moment où l'on aura distribué les flux dans l'espace, comme le point ci-après le propose.

4.6. Distribution zone à zone des trajets

La distribution des flux dans l'espace est utile à plus d'un titre. Sans cette étape, il n'est pas possible de modéliser les voies les plus utilisées par le trafic de marchandises, ni les conflits d'usage de la voirie avec les

véhicules particuliers. La distribution de zone à zone revient à calculer une matrice origine-destination. Elle permet en premier lieu de « nourrir » les modèles urbains d'affectation de trafic qui, traditionnellement, intègrent les transports de marchandises de manière assez frustrante : ces derniers s'appuient généralement soit sur des résultats d'enquêtes « cordon », souvent sujettes à caution lorsqu'on veut en rapporter les résultats aux générateurs, soit sur les enquêtes françaises TRM (SITRAM) qui manquent de précision à l'échelle urbaine et ne prennent pas en compte les véhicules utilitaires légers. Il s'avère donc utile de tenter d'orienter les flux de véhicules de marchandises de manière à les rapporter aux infrastructures afin d'en calculer l'impact sur la congestion, la consommation d'énergie ou la pollution locale.

Certaines méthodes de distribution des flux de zone à zone en milieu urbain, comme les modèles de distribution des marchandises ne permettent pas de rendre compte de la distribution des trafics de véhicules (Routhier et Toilier, 2007). En d'autres termes, à l'intérieur d'une agglomération, modéliser les origines / destinations des biens ne permet pas de construire les chemins suivis par les véhicules de livraison. En effet, la proximité du destinataire n'est pas le principal déterminant de localisation du générateur (le prix du foncier ou la proximité des infrastructures rapides en sont des déterminants autrement plus importants). La délocalisation rapide et continue des commerces de gros, des entrepôts et de la grande distribution vers la périphérie de plus en plus éloignée des centres urbains en est un bon exemple (Ambrosini et Routhier, 2004).

Pour toutes ces raisons, et à la lumière des résultats précédents, une méthode de distribution probabiliste a été choisie (Toilier et *al.*, 2005a). Comme indiqué dans les sections précédentes, le modèle a permis de construire une distribution statistique des livraisons et des enlèvements selon le mode de gestion, l'organisation (type de véhicule, qualification des arrêts, taille de la tournée) et l'environnement (densité d'activité de la zone, distance au centre). Pour l'ensemble de ces facteurs, la longueur moyenne d'un trajet a été calculée. Excepté pour les traces directes, comme l'émission de la marchandise ne coïncide pas avec l'émission d'un véhicule, il n'est pas possible de construire une matrice de distribution des trajets qui soit orientée.

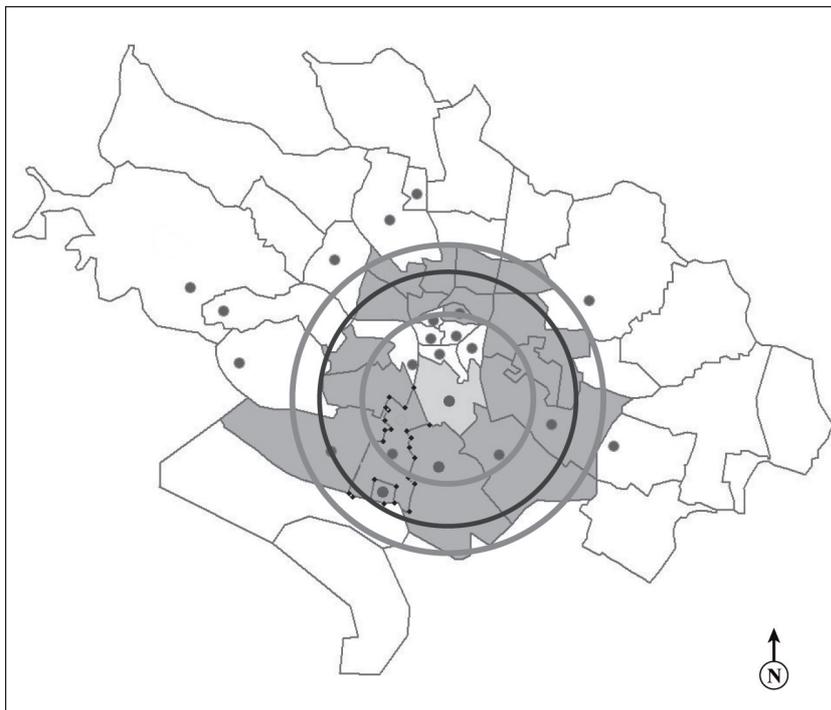
A partir de la typologie des fonctions de distances τ élaborée pour calculer les distances générées, et qui prend en compte, selon les cas, le type de trajet (td , tp , c), le type de véhicule, le mode de gestion m (compte d'autrui, compte propre expéditeur, compte propre destinataire), le nombre d'arrêts pour livraison ou enlèvement de marchandises, etc., on associe à chaque trajet τ un ensemble de mouvements du

même type qu'il convient d'apparier judicieusement. Le mouvement au départ de chaque trajet de type τ qui se trouve dans la zone z_j est apparié avec un mouvement du même type τ généré en z_i . Comme indiqué précédemment, une distance moyenne du trajet est affectée à chaque type τ . Deux possibilités existent : (i) soit on entre un distancier zone à zone (quadrillage en mailles carrées permettant le calcul de distance euclidienne) dans le logiciel, (ii) soit la distance est calculée par le logiciel à partir d'un algorithme de plus court chemin.

Pour chacune des 25 fonctions de distance retenues dans le module de génération des distances, un intervalle de confiance est calculé. Il permet de déterminer une fourchette de distance qui est utilisée pour identifier les zones susceptibles d'échanger des flux, à type d'opération, mode de gestion, et véhicule donnés. Pour une zone i , c'est ainsi un anneau de zones j qui peut être mis en relation, comme le montre la Figure 10.

Figure 10

Zones d'accueil éligibles pour recevoir les trajets issus de la zone en jaune
Exemple de Dijon (France)



La matrice de distribution s'en déduit :

$$T_{ij} = [t_{ij}] = \sum_v [t_{ij}(v)]$$

où t_{ij} est la somme des traces directes (allers et retours) des trajets principaux et des connecteurs de tournées entre les zones i et j .

Il est contrôlé que les zones d'accueil peuvent recevoir les trajets émis par la zone z_i . Si la capacité de ces zones est insuffisante, la couronne est élargie pour permettre d'adjoindre les zones avoisinantes jusqu'à obtenir une capacité suffisante. Une méthode itérative probabiliste est ainsi appliquée pour distribuer l'ensemble des trajets d'une zone à une autre. Trois règles sont appliquées :

- Pour chaque type τ , les zones d'accueil « remplies » en premier sont celles dont le nombre d'arrêts de type τ est le plus important ;
- Les zones d'accueil dont le centroïde est le plus proche du cercle de distance moyenne sont « remplies » en premier ;
- La répartition des mouvements par classe d'activité (artisanat-services, industrie, commerce de gros, grande distribution, petit commerce, tertiaire de bureaux, entrepôts et agriculture) est contrôlée.

La méthode est convergente et satisfait les conditions suivantes :

$$t_{i,j}(v) = \sum_{m,r,a} N_{v,m,r,a,i} \cdot f_{i,j}(\tau)$$

où f_{ij} est la fréquence de la distribution des trajets de type τ entre i et j , et :

$$\mu_i(v) = \sum_j t_{i,j}(v)$$

où $\mu_i(v)$ est le nombre de mouvements réalisés dans la zone i avec un véhicule de type v .

Ce modèle de distribution permet d'alimenter un modèle d'affectation de trafic sur un réseau. Il peut être calibré sur la base de comptages et d'enquêtes cordon. Les premiers tests ont montré que les résultats sont cohérents avec les trafics observés sur les voies principales, comme à Genève (Toilier et Routhier, 2010). A partir de la distribution des flux, un modèle de simulation de la consommation d'énergie et des effets externes (gaz à effet de serre, émissions de polluants, etc.) peut être utilisé (Segalou *et al.*, 2004 ; Toilier *et al.*, 2005b). Les résultats obtenus permettent aux aménageurs de mesurer l'importance de ce segment mal connu en termes de circulation et d'environnement urbain. Outre le volet diagnostic quantitatif du TMV, le modèle

FRETURB a également pour objectif de permettre de simuler les effets de diverses politiques d'aménagement et d'organisation logistique sur la base du diagnostic ainsi établi.

4.7. FRETURB V2 : un outil de simulation

Comme nous l'avons indiqué, le modèle génère des distances directement à partir du comportement logistique des établissements générateurs et de données géographiques simples. Cela a l'avantage de permettre de réaliser de nombreux calculs sans qu'il soit nécessaire de mettre en œuvre la construction de la matrice OD ni d'appliquer un modèle d'affectation de trafic souvent lourd à mettre en œuvre. De plus, aucune enquête spécifique n'est nécessaire pour obtenir une image correcte des flux de véhicules de transport de marchandises générés par les activités en zone urbaine.

A cette étape du développement du modèle, il est possible d'estimer le trafic généré par l'activité commerciale et industrielle d'une ville selon les caractéristiques suivantes : les différentes activités (45 types), le mode de gestion du transport, le type de véhicule. Ce modèle a fait l'objet d'une large diffusion auprès des villes sous la forme d'un logiciel dénommé FRETURB®V2 (Routhier *et al.*, 2002a). Ce logiciel est utilisé depuis lors dans une trentaine de villes françaises, essentiellement pour fournir aux aménageurs locaux un diagnostic spatialisé de l'activité logistique dans la ville : dénombrement des livraisons et enlèvements par zones, kilomètres générés selon trois types de véhicules, d'où il peut être déduit un bilan environnemental (Segalou *et al.*, 2004 ; Toilier *et al.*, 2005b). Il est de fait utilisé de plus en plus dans la préparation des plans de déplacements urbains. Dans le même temps, plusieurs simulations ont été réalisées. Deux principaux champs peuvent ainsi être simulés :

- les changements de localisation des activités, comme la création de nouvelles zones d'activité industrielle ou commerciale, le déplacement d'un marché d'intérêt national ou les stratégies de retour de la grande distribution vers les zones denses ;
- les changements de stratégies logistiques, comme l'implantation de centres de distribution urbains ou encore la mutualisation de moyens des acteurs sur un territoire, ou les deux à la fois (Ambrosini *et al.*, 2004b).

4.8. Applications récentes de Freturb et pistes de recherche

Deux exemples permettent d'illustrer ce que l'on peut faire à l'aide de FRETURB : la mesure de l'impact de la frontière sur les trafics de

marchandises dans l'agglomération genevoise, et l'intégration de FRETURB au modèle SIMBAD (cf. Chapitre 4) pour simuler l'évolution des trafics marchandises à l'horizon 2025.

4.8.1. Mesure de l'impact de la frontière sur les trafics de marchandises dans l'agglomération genevoise

Dans le cadre de l'élaboration d'un modèle multimodal transfrontalier sur l'agglomération genevoise, le LET a été sollicité pour réaliser la modélisation des échanges urbains de marchandises. L'enjeu était double. Il s'agissait d'une part de tester si le modèle pouvait être utilisé en dehors des frontières nationales, et donc alimenté par des données différentes de celles produites par l'INSEE. D'autre part, en confrontant les flux modélisés aux flux observés par des comptages ou des enquêtes locales, il s'agissait de quantifier l'impact de la frontière comme frein aux échanges de marchandises. Le territoire d'étude s'étendant sur les départements français de l'Ain, de la Haute-Savoie, et sur les cantons Suisses de Genève et de Nyon, les données utilisées en entrée du modèle ont été issues de trois fichiers différents :

- le fichier SIRENE pour la part de l'agglomération située sur le territoire français ;
- le Répertoire des Entreprises Genevoises (REG), pour les établissements implantés dans le canton de Genève ;
- le Registre des entreprises et des établissements pour ceux du district de Nyon.

La compatibilité des fichiers SIRENE et REG est forte, même si certains champs ne sont pas totalement identiques. A quelques activités près, le passage par la Nomenclature statistique des activités économiques dans la Communauté Européenne (NACE) a permis de convertir immédiatement les codes NOGA (utilisés en Suisse) en codes NAF (utilisés en France). Les données disponibles pour Nyon, d'un niveau de détail moindre, ont pu être intégrées moyennant des hypothèses sur les valeurs des variables manquantes.

A partir de ces intrants, deux scénarios contrastés ont pu être testés. Le premier traitait le territoire comme un espace dénué de frontière, où les flux pouvaient donc s'échanger librement. Le second au contraire, considérait qu'aucun échange n'était possible entre les deux pays. Ainsi, dans ce scénario, les échanges de marchandises se réalisaient entre établissements français d'une part, et suisses d'autre part. Dans chacun de ces deux scénarios, les flux distribués par FRETURB ont été injectés sur le réseau routier principal, moyennant une procédure d'affectation propre au logiciel DAVISUM. En confrontant les trafics ainsi simulés à ceux enquêtés sur le Cordon du périmètre, ainsi

qu'aux comptages automatiques autoroutiers ou aux passages en douane, nous avons pu estimer que seuls 6% des flux modélisés par le scénario « Absence de Frontière » avaient effectivement circulés sur le réseau, le reste du trafic de marchandises se cantonnant à des échanges internes à chaque pays.

4.8.2. *Intégration de FRETURB au modèle SIMBAD pour simuler l'évolution des trafics marchandises à l'horizon 2025*

Dans le cadre du projet SIMBAD dont l'objet est de simuler les interactions entre le système de transport et l'espace (Nicolas *et al.*, 2009), présenté dans cet ouvrage (cf. Chapitre 4), FRETURB a été utilisé pour simuler les flux de marchandises et permettre leur affectation sur le réseau routier dans l'objectif de les confronter aux flux de personnes tant en matière de contribution à la congestion qu'aux émissions polluantes. Les modalités pratiques d'interaction entre FRETURB et les modèles de mobilité des personnes et de localisation des activités utilisés dans SIMBAD ont été présentées dans la partie 2.3 du chapitre consacré à SIMBAD auquel nous renvoyons le lecteur.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Le modèle FRETURB peut être qualifié de modèle analogique dans la mesure où il est construit sur la base de comportements observés à l'aide d'enquêtes adaptées à la problématique. Il est segmenté car il aboutit à une typologie des acteurs en présence : segmentation de la demande selon les activités, segmentation de l'offre selon les modes de gestion, les modes d'organisation du transport, segmentation des espaces selon la densité ou l'éloignement du centre). La démarche de FRETURB a permis d'apporter des réponses à plusieurs questions de méthodologie :

- l'unité d'observation : le choix du « mouvement » a permis de résoudre la question essentielle de la complexité du TMV (en particulier l'organisation en tournées avec des véhicules de tailles diverses) ;
- la variable à simuler : la macro-variable retenue est l'occupation de la voirie. Elle implique non seulement de considérer la circulation des véhicules, mais aussi leur consommation d'espace lorsqu'ils sont à l'arrêt pour livraison ;
- la distinction entre les différents modes de gestion (compte propre destinataire ou expéditeur/compte d'autrui) n'est pas utilisée dans

les autres approches dont nous avons connaissance. Cette variable est cependant centrale pour expliquer une part importante de la variance des comportements des opérateurs de transport dans la ville ;

- les trajets terminaux de la marchandise : la prise en compte des déplacements d'achat, que l'on peut considérer comme une externalisation du trajet terminal du transport auprès des consommateurs finaux. Un modèle, non présenté ici, permet de calculer les déplacements d'achats motorisés, générés au lieu d'achat (Segalou, 2000 ; Toilier *et al.*, 2005a, Gonzalez-Feliu *et al.*, 2009). Une fois intégré à FRETURB, il permettra de comparer l'impact conjoint des modifications des comportements d'achat tels que le commerce électronique ou la livraison à domicile d'une part, et des changements de logistique en amont des magasins et lieux de distribution qui découlent de ces changements d'autre part. Le projet ETHEL II (Raux *et al.*, 2009) présente les premiers résultats de ce modèle, encore à l'état de maquette, à partir de scénarios caricaturaux ;

- le calcul des distances : par l'observation simultanée des mouvements réalisés dans les établissements et des comportements des chauffeurs réalisant ces mouvements, il a été possible de s'affranchir de l'affectation des trafics sur un réseau pour calculer les véhicules.km, et d'établir ainsi un diagnostic en termes d'occupation de la voirie et de bilan environnemental ;

- la simplicité d'utilisation : l'approche désagrégée à l'échelle de l'établissement a permis d'apporter une grande richesse d'information sur les comportements et les localisations. Elle permet aussi d'appliquer le modèle par simple lecture du fichier SIRENE de l'INSEE et de données géographiques agrégées. Le fait de ne pas nécessiter d'enquête spécifique sur la zone d'application en fait un outil accessible à l'ensemble des agglomérations françaises disposant d'un registre d'établissements exhaustif (tel que SIRENE). Diffusé sous la forme d'un logiciel facile d'utilisation et d'un coût symbolique, le modèle a, sous ses diverses versions, été mis en application sur plus d'une trentaine d'agglomérations. Il a servi essentiellement pour l'aide au diagnostic du TMV dans le cadre des plans de déplacements urbains. Il reste, à notre sens, sous-utilisé pour l'aide à la prévision.

La puissance prédictive d'un tel modèle provient du fait que les comportements logistiques des activités introduits dans le modèle présentent une grande variété, ce qui permet de simuler de nombreux scénarios en observant l'impact des changements des caractéristiques des acteurs (délocalisation des activités, changements dans les modes d'organisation). Les changements se traduisent dans le modèle par des glissements d'un segment à l'autre selon des règles de substitution bien

définies. Ses limites proviennent du fait que, puisqu'il est construit sur des fonctions caractéristiques estimées sur des enquêtes déjà anciennes, les effets de comportements émergents sont difficiles à introduire dans les scénarios. Les enquêtes qui se renouvelleront à partir de 2010 selon la même méthodologie devront permettre non seulement de mesurer la stabilité dans le temps des fonctions caractéristiques du modèle mais aussi d'en mettre en évidence de nouvelles. Les données chronologiques obtenues permettront de faire la part des changements liés à l'évolution de la structure des activités et de ceux qui résultent des modifications dans les organisations et les comportements des acteurs économiques.

Pour faire évoluer le modèle, les chercheurs s'orientent désormais dans trois directions :

- introduction de la nature de la marchandise, de son poids et de son conditionnement. Actuellement absente du modèle, la prise en compte de la marchandise transportée permettra notamment de construire des simulations sur l'évolution des modes de transport utilisés pour les livraisons et enlèvements. Cela permettra par exemple de construire les tables de transferts d'un type de commerce à un autre (grande distribution *versus* petit commerce) ;

- amélioration de la génération et mise en œuvre de la distribution des flux achats des ménages. En particulier, les différentes évolutions de l'urbanisme commercial et de l'habitat, ainsi que les nouvelles pratiques d'achat liées aux innovations technologiques (e-commerce, livraison à domicile) sont en cours d'intégration dans le modèle (Gonzalez-Feliu *et al.*, 2009). Une recherche exploratoire a été réalisée dans le cadre du projet ETHEL 2 (Raux *et al.*, 2009) ;

- élaboration de scénarios de simulations. Pour l'heure, les seules simulations permises par FRETURB concernent l'évolution des localisations des établissements, de leur taille ou de leur activité. A terme, en fonction des résultats des deux perspectives de recherches évoquées précédemment, les changements d'organisations logistiques ou de réglementations devront pouvoir être simulés.

Références bibliographiques

- Ambrosini, C. et Routhier, J.L., 2004a, Objectives, methods and results of surveys carried out in the field of urban freight transport : an international comparison, *Transport Reviews*, 24, 1, pp. 57-77.
- Ambrosini C., Routhier J.L., Toilier F., 2004b, How do urban policies work on the urban goods transport flows ?, *Proceedings of the 10th World Conference on Transport Research*, Istanbul, Turkey.
- Bonnafous A., 1989, *Le siècle des ténèbres de l'économie*, Economica.

- Bonnafous A., 2000, Les marchandises en ville : le problème méthodologique de l'appréhension statistique, *Proceedings of the 13th Jacques Cartier Conference*, Montreal, Canada.
- Browne M., Allen J., Woodburn A., Patier D., Routhier J.L., Ambrosini C., 2007, Comparison of urban freight data collection in European countries, *Proceedings of the 11th World Conference on Transport Research*, Berkeley, USA.
- Durand S., 2001a, L'analyse et la modélisation spatiales des transports de marchandises par la méthode des coefficients structurels, *Les Cahiers Scientifiques du Transport*, 39, pp. 87-114 .
- Durand S., 2001b, *Analyse et modélisation spatiales à long terme du transport national de marchandises*, Thèse pour le doctorat de sciences économiques, Université de Lyon II, 447 p.
- Friedrich M., Haupt T., Nökel K., 2003, Freight modelling : data issues, survey methods, demand and network models, *10th International Conference on Travel Behaviour Research*, Lucerne, Suisse.
- Gallez C., 2000, *Indicateurs d'évaluation de scénarios d'évolution de la mobilité urbaine*, Rapport de recherche, DTT – INRETS, 120 p.
- Gaudry M., Picard G., Nguyen S., 1998, Fret : un modèle de simulation des flux de marchandises au Canada, *Les Cahiers Scientifiques du Transport*, 17-18, pp. 183-200.
- Gentile G., Vigo D. 2007, *Movement generation and trip distribution for freight demand modelling in city logistic*, Technical Report, Università di Bologna, Dipartimento di Elettronica Informatica e Sistemistica.
- Gonzalez-Feliu J., Toilier F., Routhier J.L. 2009, End consumer goods movement generation in french medium urban areas, *CityLogistics conference*, Puerto Vallarta, Mexico.
- Jourquin B.A.M., 1996, *Un outil d'analyse économique des transports de marchandises sur des réseaux multi-modaux multi-produits. Le réseau virtuel, concept, méthodes et applications*, Thèse de doctorat en sciences économiques, Faculté Universitaires Catholiques de Mons, Belgique.
- LET, Gérardin Conseil, 2000, *Diagnostic du transport de marchandises dans une agglomération*, Rapport de recherche, DRAST, 85p.
- LET, 1999, *Transport de marchandises en ville, enquête quantitative à Marseille et Dijon*, DRAST, 120 p.
- LET, 1996, *Transport de marchandises en ville, enquête quantitative à Bordeaux*, DRAST, 250 p.
- Lohse D. 2004, *Travel demand modelling with model EVA. Simultaneous model for trip generation, trip distribution and mode choice*, Working Paper, Université technique de Dresde, Allemagne.
- Meimbresse B., Sonntag H., 2000, Modelling urban commercial traffic with model WIVER, *Proceedings of the 13th Jacques Cartier Conference*, Montreal, Canada.
- Patier D., Routhier J.L., 2009, Une méthode d'enquête du transport de marchandises en ville pour un diagnostic en politiques urbaines, *Les cahiers scientifiques des transports*, 55, pp. 11-38.
- Patier D., 2002, *Les marchandises dans la ville*, Selse, 167 p.
- Patier D., 2001, Diagnostic sur les enquêtes françaises, tentative de globalisation. In : Patier D. (ed.), 2001, *L'intégration des marchandises dans le système des déplacements urbains*, Actes des XIIIe Entretiens Jacques Cartier, Montréal, LET, pp. 125-144

- Patier D., Routhier J.L., 1998, Livraisons de marchandises en ville, *Revue TEC*, 145.
- Pini G., 1990, *Géographie des échanges interrégionaux de marchandises par voie ferrée et par route en Suisse*, Thèse de doctorat en sciences économiques et sociales, Université de Genève, Suisse.
- Raux C., Routhier J.L., Gonzalez-feliu J., Henriot F., 2009, *Ethel II*, Rapport de recherche, ADEME-GICC.
- Ripert C. 2000, *Les enjeux environnementaux du transport de marchandises en ville*, Congrès de l'ATEC, Presses des Ponts et Chaussées, Paris, pp. 110-119.
- Routhier J.L., Toilier, F. 2007, FRETURB V3 : a policy oriented urban freight Model, *Proceedings of the 11th World Conference on Transport Research*, Berkeley, USA.
- Routhier J.L., Segalou E., Durand S., 2002a, *Mesurer l'impact du transport de marchandises en ville. Le modèle de simulation FRETURB*, Rapport de recherche, DRAST-ADEME, 104 p.
- Routhier J.L., 2002b, Du transport de marchandises en ville à la logistique urbaine, *Synthèses et Recherches*, Centre de Prospective et de veille scientifique, 59, 67 p.
- Routhier J.L., 2001a, Un outil de simulation des effets des politiques urbaines sur le transport de marchandises en ville. In : Patier D. (ed.), 2001, *L'intégration des marchandises dans le système des déplacements urbains*, Actes des XIII^e Entretiens Jacques Cartier, Montréal, LET, pp. 85-91.
- Routhier J.L., Segalou E., Araud C., 2001b, *Données nécessaires pour les bilans environnementaux du transport de marchandises en ville – le cas de Bordeaux, Dijon et Marseille*, Rapport de recherche, ADEME-EDF, 120 p.
- Routhier J.L., Aubert P.L., 1999, FRETURB : un modèle de simulation des transports de marchandises en ville, *Proceedings of the 8th World Conference on Transport Research*, Antwerp proceedings, Elsevier, 1, pp. 531-544.
- Russo F., Comi A., 2006, Demand model for city logistics : a state of the art and a proposed integrated system. In : Taniguchi E., Thompson R.G. (ed.), 2006, *Recent advances for city logistics*, Proceedings of the 4th International Conference on City Logistics, Langkawi, Malaysia.
- Stefan K.J., McMillan J.D.P., Hunt J.D. 2005, An urban commercial vehicle movement model for Calgary, *Compendium of Papers for the 84th Annual Transportation Research Board Conference*, Washington, USA.
- Segalou E., Routhier J.L., Albergel A., 2006, *Méthodologie pour un bilan environnemental physique des transports de marchandises en ville*, ADEME, 104 p.
- Segalou E., Ambrosini C., Routhier J.L., 2006, The environmental assessment of urban goods movement, *Logistics Systems for Sustainable Cities*. In : Taniguchi E., Thompson R.G. (ed.), 2006, *Recent advances for city logistics*, Proceedings of the 4th International Conference on City Logistics, Langkawi, Malaysia.
- Segalou E., Routhier J.L., Durand S., 2001, Les transports de marchandises et l'urbanisme : d'une prise en compte législative à la simulation des interactions, *XXXVIII colloque de l'ASRDLF*, Trois-Rivières, Canada.
- Sonntag H., Meimbresse B., Ambrosini C., Routhier J.L., 2007, Urban freight policy-oriented modelling in Europe, *Citylogistics Conference*, Crete Island, Greece.
- Sonntag, H., 1985, A Computer Model of Urban Commercial Traffic, *Transport, Policy and Decision Making*, Vol. 3 (2).

- Tanigushi, E., Thompson, R.G., M., Yamada, T., 2006, Data collection for modeling, evaluating and benchmarking city logistic schemes. In : Taniguchi E., Thompson R.G. (ed.), 2006, *Recent advances for city logistics*, Proceedings of the 4th International Conference on City Logistics, Langkawi, Malaysia.
- Toilier F., Routhier J.L., 2010, *Application de FRETURB sur l'agglomération de Genève*, à paraître.
- Toilier F., Alligier, L., Patier, D., Routhier, J.L., 2005a, *Vers un modèle global de simulation de la logistique urbaine : FRETURB, version 2*, Rapport de recherche, DRAST-PREDIT, 121 p.
- Toilier F., Routhier J.L., Albergel A., Perdriel S., 2005b, *Intégration d'un module environnemental dans FRETURB V2*, Rapport de recherche, ADEME, 124 p.

CHAPITRE 9

CWS : UN MODÈLE PROSPECTIF DES DYNAMIQUES SPATIALES ET DE L'ÉTALEMENT URBAIN

Jean-Philippe Antoni
Johanne Hirtzel et Pauline Joannès

Laboratoire ThéMA
UMR 6049 CNRS – Université de Franche-Comté
32 rue Mégevand – F25000 Besançon
jean-philippe.antoni@univ-fcomte.fr

Développé sur la base du programme CamDeus¹, le modèle CWS (*Cellular World Simulation*) est issu de la famille des automates cellulaires (CA pour *Cellular automata*) : à l'instar du « jeu de la vie » mis au point par le mathématicien J. Conway (1970), les cellules qu'il contient peuvent changer d'état en fonction du voisinage qui les entoure. Le modèle se fonde ainsi sur les principes de l'intelligence artificielle distribuée, dont sont également issus les Systèmes multi-agents (SMA). Toutefois, à l'inverse du « jeu » de J. Conway, les cellules ne représentent pas des états théoriques simples (vie – mort), mais correspondent à l'occupation du sol d'un territoire (eau, forêt, bâti, non-bâti, etc.), visualisée à travers un carroyage de l'espace géographique. L'automate vise alors à en simuler l'évolution, par l'intermédiaire d'un certain nombre de « règles » indiquant de quelle manière une cellule peut changer d'état, passant par exemple de l'état « non-bâti » à l'état « bâti ».

Une telle transposition de la théorie mathématique vers la problématique de l'aménagement du territoire et de l'étalement urbain n'est toutefois pas aisée. En effet, même s'ils offrent un outil puissant pour la simulation, les automates cellulaires ne permettent pas toujours de reproduire avec pertinence les règles et les processus à l'origine de

1. Le programme CamDeus (*Cellular Automata Models to design Environmental and Urban Systems*) a été développé au Laboratoire de géographie Image, Ville et Environnement (actuellement ERL 7230 du CNRS et de l'Université de Strasbourg) par J.P. Antoni, entre 2000 et 2003. Comme CWS, il a été programmé par G. Vuidel.

l'urbanisation d'une ville ou d'une région : il est souvent nécessaire de les contraindre par d'autres modèles, comme en témoigne l'émergence des CCA (*Constrained cellular automata*) dans ce domaine. Ici, le modèle CWS est contraint par des étapes préliminaires qui se combinent logiquement. Dans un premier temps, une chaîne de Markov permet de quantifier les changements qui interviendront, alors que dans un deuxième temps, un modèle de potentiel permet de les localiser selon une logique proprement géographique. L'ensemble s'enchaîne ainsi en trois étapes, répondant successivement à trois questions : combien ? où ? et quand ? Cette combinaison a l'avantage de simplifier la modélisation et apparaît comme un véritable atout pédagogique pour son utilisation auprès des acteurs et des collectivités territoriales. Après avoir été testé sur la ville de Belfort, le modèle CWS a été utilisé à Besançon et Montbéliard, puis à Angers et à Nantes, lors des réflexions liées à la mise en place des Schémas de cohérence territoriaux (SCoT) ou des Programme locaux de l'habitat (PLH), pour lesquels il est apparu comme un outil de modélisation utile à la prospective territoriale et à l'aide à la décision.

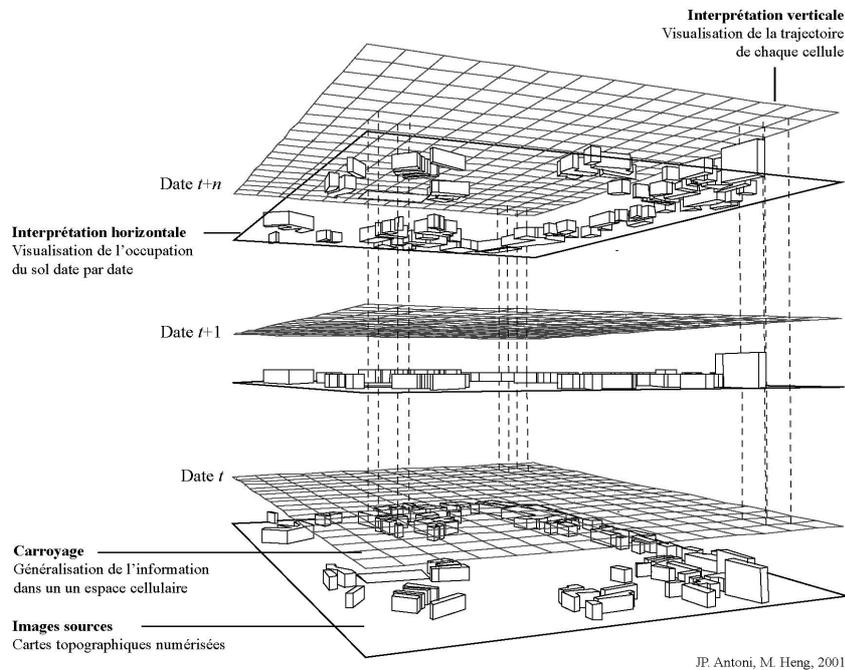
1. UNE MODÉLISATION PROSPECTIVE EN TROIS ÉTAPES

La modélisation est généralement assimilée à une simplification de la réalité, qui vise à la reproduire et à mieux en connaître certains aspects. Pour la dynamique des systèmes urbains et périurbains, tenir compte de cette simplification peut consister à considérer l'évolution urbaine à travers trois questions simples à propos de l'occupation du sol : « combien ? », « où ? » et « quoi ? » : combien d'hectares évolueront dans le futur ? Où sont-ils situés ? Et de quoi sont-ils composés ? La démarche prospective et la modélisation présentées ici reprennent ces questions en trois étapes distinctes et complémentaires qui fondent la logique du modèle CWS. Mais elles s'appuient sur un préalable nécessaire qui servira de fil conducteur à la modélisation : la visualisation des dynamiques spatiales et leur évolution à travers un espace cellulaire.

1.1. Visualiser les dynamiques urbaines : l'espace cellulaire

L'une des principales difficultés liées à la mesure de l'occupation du sol réside dans la visualisation de son évolution. Certes, les archives et les cartothèques disposent de nombreux documents, l'Institut géographique national (IGN) en a commercialisé beaucoup et depuis longtemps, et les satellites survolent l'espace terrestre et créent chaque jour

Figure 1

Une base de données spatio-temporelle carroyée

une information géographique plus détaillée. Mais, si ces informations, qui s'échelonnent dans le temps, offrent une vision diachronique de la dynamique de l'occupation du sol, elles ne sont pas suffisamment comparables entre elles pour en permettre une lecture précise. Une méthode plus rigoureuse s'impose pour étudier les évolutions dans l'espace et dans le temps. Le carroyage offre ici une solution simple et adéquate, qui consiste à visualiser chaque document (qui correspond alors à un état daté dans le temps) par l'intermédiaire d'une grille et à identifier les dynamiques de l'évolution du sol à travers chacune de ses cellules (Figure 1).

Dans le cadre des exemples que nous présentons ici, deux bases de données spatio-temporelles carroyées ont été construites à partir de cartes topographiques anciennes et actuelles, montrant l'évolution des aires urbaines² de Belfort et de Besançon. Pour la première ville, des

2. Nous employons l'expression « aire urbaine » au sens général et non au sens de l'Institut national de la statistique et des études économiques (INSEE).

cartes topographiques levées par l'IGN en 1955 et 1975³ ont été empruntées aux archives municipales de la ville ; pour la seconde, des cartes identiques sont disponibles à la cartothèque du laboratoire ThéMA, et montrent l'agglomération en 1960 et en 1980. Pour les deux villes, les données les plus récentes (1995 et 2000) sont issues du Scan25® de l'IGN. La comparaison de l'ensemble de ces documents permet de visualiser l'évolution de nombreux éléments, urbains et périurbains, au cours du temps : l'expansion urbaine, l'apparition des grands ensembles, celle des échangeurs autoroutiers, etc. Au total, treize catégories d'occupation du sol ont été retenues et carroyées à partir de cette base. Elles sont présentées dans la Figure 2.

Au sein de l'espace carroyé, nous considérons que chaque état $E(t)$ correspond à un système défini par N carreaux de carroyage qui sont autant de cellules. Pour chacun des états, les cellules contiennent une variable d'occupation du sol. L'occupation du sol au temps t de la cellule N_i donnée du système spatial est notée k . Les catégories d'occupation du sol étant attribuées aux cellules de manière exclusive, à chaque cellule ne peut correspondre qu'une seule valeur d'occupation du sol k (eau, forêt, bâti, etc.) pour chaque date⁴. Mathématiquement, ceci peut être formalisé ainsi (cf. Almeida, 2002) :

$$\forall i, \forall t, N_{i,k}(t) = 1,$$

$$N_{i,l}(t) = 0,$$

$$\sum_k N_{i,k}(t) = 1$$

Avec : $l \in M$ et $l \neq k$;
i : une cellule de l'ensemble

Issus de sources diverses, les états peuvent alors s'assimiler à des matrices montrant l'occupation du sol pour chaque date. Leur superposition exacte engendre leur comparabilité exacte et, par après, une possibilité de lecture spatio-temporelle rigoureuse de l'occupation du

3. En réalité, les cartes n'ont pas été relevées en 1955, mais entre 1954 et 1957 pour le premier jeu, et en 1973 pour le second.

4. Cette exclusivité pose la question de l'occupation du sol à retenir lorsqu'une cellule en contient plusieurs. La méthode retenue est celle de l'« écrasement hiérarchique » (Antoni, 2003) : la catégorie retenue *in fine* est celle dont la position hiérarchique est la plus élevée. Cette hiérarchie (de 1 à 13) est indiquée par les numéros associés à chaque catégorie dans la Figure 2.

sol, qui peut être cartographiée et quantifiée cellule par cellule (Antoni, 2002). Le carroyage apparaît ainsi comme une méthode simple et adéquate pour visualiser l'évolution de l'occupation du sol d'un territoire, particulièrement la dynamique de l'étalement urbain (cf. la Figure 2 au point 2.1) ; l'espace cellulaire qu'il produit est déterminant pour la modélisation de cette dynamique.

1.2. Quantifier les dynamiques urbaines

Toutefois, la lecture de trois images statiques juxtaposées de l'occupation du sol (Figure 2) n'a que peu d'intérêt dans le cadre d'un exercice prospectif. La prise en compte de ce qui se passe entre chaque image peut par contre conduire à la formulation d'un processus de transition, plus constructif dans le cadre d'une modélisation. En confrontant les états deux à deux et cellule par cellule, il est en effet possible de connaître les mutations de l'occupation du sol de chaque cellule entre t et $t+1$, afin de les saisir de façon dynamique. Théoriquement, chaque cellule a la possibilité d'évoluer vers n'importe quelle autre catégorie d'occupation du sol, ou bien de rester dans sa catégorie d'origine. La dynamique du modèle peut donc se présenter comme une série de transitions possibles d'une occupation du sol de départ k à une occupation du sol d'arrivée l . Au niveau d'une cellule N_i donnée, une transition Δ de k au temps t vers l au temps $t+1$ peut s'écrire ainsi :

$$\begin{aligned} \Delta N_{i,kl}(t) &= 1 \\ \text{si } N_{i,k}(t) &= 1 \text{ et } N_{i,l}(t+1) = 1 \\ \text{sinon} &= 0 \end{aligned}$$

De manière à simplifier la complexité engendrée par le nombre théorique de transitions possibles, on peut ne plus considérer ces mutations au niveau des cellules, mais au niveau des catégories d'occupation du sol (ce qui revient à passer du niveau *micro* au *macro*). La transition agrégée pour le système complet est alors :

$$\Delta N_{kl}(t) = \sum_{i=1}^n \Delta N_{i,kl}(t)$$

Ce faisant, il devient également possible de construire un tableau entre chaque date correspondant à une matrice de contingence qui relève le nombre de cellules passées d'une catégorie k à l entre t et $t+1$. Cette matrice peut aisément être transformée en une matrice de tran-

Tableau 1
Exemple d'une matrice de transition : Belfort entre 1975 et 1995

		Occupation du sol en 1995												
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Occupation du sol en 1975	1	82,15	10,73	0,14	3,1	1,06	0,05	0,52	0,15	1,07	0,48	0,32	0,23	0
	2	4,62	93,88	0,01	0,54	0,23	0	0,05	0,06	0,32	0,1	0,18	0,01	0
	3	0,67	2,16	95,96	0,69	0,05	0	0,13	0,08	0,19	0,05	0,03	0	0
	4	0,07	0	0	96,1	1,34	0,14	0,22	0,07	0,58	1,45	0,07	0	0
	5	0,07	0	0	0,24	97,29	0,47	0,41	0,17	0,37	0,98	0	0	0
	6	0	0	0	0	0	99,55	0	0	0,45	0	0	0	0
	7	0	0	0	0	0	0	99,67	0	0,33	0	0	0	0
	8	0	0	0	0	0	0	0	99,07	0,47	0,47	0	0	0
	9	0,17	0	0	0	0	0,17	0	0,17	99	0,51	0	0	0
	10	0,93	4,45	0,25	0,81	1,26	0,03	0	0	0,51	91,38	0,18	0,2	0
	11	2,67	0,18	0,09	1,07	0,18	0	0,09	0,09	0,09	6,93	88,62	0	0
	12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100	0
	13	0	0	20	0	20	0	0	0	0	0	0	0	60

Pour une meilleure lecture, les valeurs de probabilité ont été multipliées par 100. Avec : 1 = Espaces libres (champs), 2 = Surfaces en eaux, 3 = Bois et forêts, 4 = Bâti résidentiel individuel, 5 = Bâti résidentiel dense ; 6 = bâti résidentiel collectif ; 7 = Equipements ; 8 = Structures d'encadrement ; 9 = Zones d'activités ; 10 = Routes départementales ; 11 = Routes nationales ; 12 = Echangeurs autoroutiers ; 13 : Gares.

sition indiquant la probabilité de chaque cellule de passer d'une catégorie à une autre (Tableau 1). Pour ce faire, on pose simplement :

$$p_{kl}(t) = \frac{\Delta N_{kl}(t)}{N_k(t)} \quad \text{et} \quad \sum_{k=1}^m p_{kl}(t) = 1$$

Sur ce même principe, l'occupation du sol peut également se résumer en un vecteur pour chaque date, de taille égale au nombre de catégories d'occupation du sol considérées. Leur somme étant toujours égale à 1, ces vecteurs indiquent la proportion de chaque catégorie sur l'ensemble de l'espace considéré, ce qui fournit les éléments nécessaires à la construction d'une chaîne de Markov.

Une chaîne de Markov correspond en effet à « un processus dont les probabilités de transition sont des probabilités conditionnelles au passé » (Feller, 1968 ; Berchtold, 1998), qui exprime l'état d'une variable à une époque t en fonction d'observations passées de cette variable. Sa « mise en marche » (Rimbert, 1995) nécessite la préparation préalable : (i) De la description d'un état en valeurs relatives de sa masse totale (l'occupation du sol visualisée sous la forme d'un vecteur par exemple), (ii) d'une matrice de transition où sont exprimées les probabilités de déplacement des différents groupes d'observations, d'une catégorie vers une autre et (iii) d'un opérateur de transformation diachronique, en l'occurrence une multiplication matricielle à itération. Ainsi, une simulation de l'état $E(t+1)$ est possible si l'on multiplie le vecteur correspondant à un état E par la

matrice de contingence correspondant, après que celle-ci ait été transformée en une matrice de probabilités de transition d'une catégorie d'occupation du sol vers une autre. On considère alors la chaîne de Markov de la façon suivante :

$$N_i(t+1) = \sum_{k=1}^m p_{ki} \cdot N_k(t)$$

où : $p_{ki} = \frac{\Delta N_{ki}(t)}{N_k(t)} = \frac{\Delta N_{ki}(t)}{\sum_l \Delta N_{kl}(t)}$ et : $\sum_l p_{kl} = 1$

Ainsi définie, une chaîne de Markov offre donc une possibilité prospective : elle permet de calculer un état futur à partir d'un état présent connu, en se basant sur l'observation des évolutions passées et leur probabilité de changement. Pour chaque espace étudié, on calcule ainsi le nombre de cellules de chaque catégorie d'occupation du sol dans le futur à partir des états passés, ce qui correspond effectivement à quantifier les dynamiques urbaines, en indiquant le nombre de cellules qui évolueront d'un état vers un autre dans le futur, par exemple d'une catégorie d'occupation du sol « non-bâtie » à une catégorie d'occupation du sol « bâtie ».

1.3. Localiser les dynamiques urbaines

Le modèle de transition (chaîne de Markov) permet donc bien de répondre à la question « combien ? » en déterminant le nombre de cellules de chaque catégorie d'occupation du sol dans le futur. Mais il ne dit rien sur leur localisation. Pour répondre à cette question « où ? », nous faisons référence à la notion d'interactions spatiales introduite par E.L. Ullman (1957), qui aide à prendre en compte la multitude des possibilités de localisation qu'offrent une ville et son aire urbaine.

L'interaction spatiale se définit comme une « action réciproque (rétroaction) entre deux ou plusieurs acteurs ou lieux dans un système. Tous les échanges (de matière, de personnes, d'information), par exemple au niveau individuel entre producteurs et clients, entre partenaires, ou au niveau agrégé entre des villes et des régions sont des interactions dans la mesure où ils provoquent des changements interdépendants dans les comportements ou dans les structures »

(Hypergéométrie)⁵. E.L. Ullman (1957) a également proposé trois conditions permettant de prendre en compte et de caractériser ces interactions spatiales : la complémentarité, la substitution et la friction de la distance.

1. Généralement, une interaction résulte de la différence qui existe entre deux lieux. A partir de cette différence peut naître une demande de l'un et une offre de l'autre, c'est-à-dire une complémentarité entre des attributs demandés à un endroit et présents à un autre endroit. Nous parlons bien alors d'attributs et non uniquement d'objets ou de produits comme le font R. Abler *et al.* (1972) ou P. Haggett (1973) car dans ces cas, l'idée d'interaction sert à introduire un mouvement de produits de consommation (transportés par camions, par exemple, chez M. Helvig (1964)). Ici, l'interaction peut également s'interpréter comme une migration de personnes, possiblement définitive, si une complémentarité spécifique existe entre des gens qui veulent disposer d'un cadre particulier pour habiter, et des lieux qui disposent de ce cadre. C'est en ce sens qu'elle s'associe à la problématique de la dynamique urbaine ;

2. Toutefois, une telle complémentarité ne génère une interaction qu'en cas d'absence de substitution, comme a pu le montrer par exemple S.A. Stouffer (1940). En effet, si l'on considère une interaction possible entre un lieu i et un lieu j , il est nécessaire de considérer simultanément tout autre lieu k , qui pourrait également apparaître comme une origine ou une destination possible pour chaque mouvement, et de tester s'il n'est pas finalement une « meilleure » origine ou destination (Abler *et al.*, 1972). L'interaction se ferait alors entre i et k , et non entre i et j . Pour l'estimer, il est nécessaire de ne pas considérer les lieux deux à deux, mais de les prendre en compte tous simultanément ;

3. Enfin, la troisième condition fait intervenir la notion de « transférabilité » (*transferability*), c'est-à-dire la friction de la distance, généralement mesurée en temps (ou en coût) : si le temps (ou l'argent) dépensé pour parcourir la distance qui sépare i et j est trop important, l'interaction ne se fera pas, même si il n'y a aucune substitution, et même si la complémentarité est parfaite. Si les choses ne peuvent bouger d'un lieu à un autre à cause de leur coût de déplacement, on les remplacera par d'autres choses, ou bien on s'en passera.

5. <http://www.hypergeo.eu/spip.php?article2>. Lien consulté en mars 2010.

Sur le plan théorique, un modèle de potentiel permet de prendre en compte simultanément ces trois conditions, nécessaires à la considération des interactions spatiales :

$$P_i = \sum_{j=1; j \neq i}^n \frac{m_j}{d_{ij}} + \frac{m_i}{1/2rs}$$

Avec : P_i = valeur de potentiel d'une cellule i donnée ;
 m_j = valeur de masse d'une cellule i ou j ;
 d_{ij} : distance entre i et j ;
 rs = résolution spatiale des cellules.

Le potentiel de chaque lieu étant égal à la somme des masses m des lieux de son voisinage, divisées par la distance qui les sépare de ces lieux, le modèle tient compte du fait que tout lieu est fortement déterminé par une certaine forme de dépendance spatiale : « *everything is related to everything, but near things are more related than distant things* » (Tobler, 1976). Cette formalisation pose la question de la valeur des masses à utiliser, et avec elle, celle du paramétrage d'un modèle de potentiel, que nous étudierons dans la deuxième partie.

Malgré la difficulté du paramétrage, un modèle de potentiel permet ainsi, sous réserve que l'on accepte les hypothèses décrites plus haut, de localiser le nombre n de cellules qui évolueront dans le futur (n étant déterminé à la première étape par la chaîne de Markov) : ce sont celles dont la valeur de potentiel est la plus élevée. Cette deuxième étape permet donc effectivement de localiser les dynamiques en fonction des critères retenus par le modèle de potentiel, c'est-à-dire des masses et des distances utilisées pour son paramétrage. Comme précédemment, des illustrations seront données dans la deuxième partie, à partir des exemples de Besançon et de Belfort.

1.4. Différencier les dynamiques urbaines

A la troisième étape de la modélisation (différenciation des changements, question « quoi ? »), on considère l'occupation du sol qui différencie chaque cellule. Car si l'on connaît leur nombre et leur localisation, on ne sait rien encore de ce qu'elles sont, c'est-à-dire de la catégorie d'occupation du sol à laquelle elles appartiennent. La méthode employée ici s'appuie sur les automates cellulaires, dont l'utilisation en géographie fait écho à la conception cellulaire de l'espace géographique qu'ont pu défendre W. Tobler (1979) et H. Couclelis (1985) et qui a permis de révéler le caractère profondément spatialisé de ce type d'outils (Couclelis, 1988). Le carroyage (cf. point 1.1) correspond en effet parfaitement à une configuration d'auto-

mates cellulaires, dont les catégories d'occupation du sol rappellent les deux seules possibilités (vie ou mort) de l'expérience de J. Conway (1970). Pour définir l'automate cellulaire de façon formelle, on pose alors que la catégorie de chaque cellule est déterminée par son voisinage, c'est-à-dire par la catégorie d'occupation du sol des cellules environnantes dans un rayon donné (cf. Batty *et al.*, 1999) :

$$S_{it+1} = f(S_{it}, I_{it}^h)$$

Avec : S_i = occupation du sol d'une cellule donnée i ;
 $f()$ = fonction ;
 I_i = voisinage de la cellule i ;
 h = taille du voisinage ;
 t = temps.

Issus de l'intelligence artificielle distribuée, les automates cellulaires ont alors le double avantage de permettre la détermination de la catégorie d'occupation du sol des cellules en fonction de leur voisinage (c'est-à-dire de différencier les cellules précédemment quantifiées et localisées), et de disposer de la souplesse nécessaire pour intégrer les deux précédents modèles : ils sont contraints par les résultats du modèle de transition (étape 1) et du modèle de potentiel (étape 2), pour produire *in fine* une modélisation qui combine les trois étapes. Ceci est rendu possible par l'intermédiaire de « règles de transition » propres aux automates, qui permettent de tenir compte de cas de figure multiples. Le problème majeur consiste alors à définir des règles pertinentes, ce qui rappelle la problématique générale de la modélisation et surtout de son paramétrage. Comme précédemment, des exemples seront fournis au point 2.4.

2. PARAMÉTRER UN MODÈLE COMPLEXE

L'espace cellulaire jouant le rôle de fil conducteur, la juxtaposition de modèles associés et dédiés chacun à une question particulière offre une modélisation « simple ». L'expérience montre en effet que la communication du contenu, des tenants et des aboutissants des trois étapes et de leur combinaison est généralement aisée et pédagogique. Dans le cadre de simulations liées à un exercice prospectif, cette originalité se différencie fortement des travaux pourtant similaires de R. White *et al.* (2003) par exemple, et facilite la mise en œuvre d'une démarche de modélisation en collaboration avec les élus ou les techniciens en charge de gestion territoriale. Toutefois, si l'ensemble apparaît plus simple, le paramétrage de chaque modèle demeure complexe et déter-

minant dans la production des résultats liés à la simulation de l'évolution de l'occupation du sol. Aussi, autant que sur la modélisation en elle-même, il est indispensable de montrer comment ses paramètres peuvent être estimés, les biais qu'ils introduisent, et les incertitudes auxquelles ils demandent de faire face.

2.1. La difficulté de l'exercice prospectif

En effet, si l'enchaînement de modèles autorisant la prise en compte d'une multitude de cas complexes et différents est cohérent sur le plan théorique, ses applications concrètes apparaissent quant à elles délicates et posent un certain nombre de questions. Pour en prendre conscience, utilisons un exemple simple qui montre que le lien entre les résultats d'un modèle et les paramètres utilisés pour les déterminer sont variables et difficiles à appréhender. Pour obtenir un résultat égal à 10 – c'est l'exemple – plusieurs « chemins » sont possibles. Une addition offrira onze possibilités : 0+10, 1+9, 2+8, 3+7, 4+6, 5+5, 6+4, 7+3, 8+2, 9+1 et 10+0. Si l'on cherche uniquement la bonne solution, l'ensemble de ces possibilités peut être considéré comme juste. Par contre si la manière avec laquelle cette solution est obtenue importe, chaque possibilité reflète un processus différent ; aucune n'est équivalente. Des scénarios différents mènent donc possiblement à un résultat identique. Ainsi, si un processus est validé pour l'exactitude de son résultat, il ne peut être considéré comme correct tant que l'on n'aura pas montré qu'il est l'unique processus permettant d'atteindre ce résultat, ou encore que parmi une multitude de processus permettant de l'atteindre, il est le seul qui puisse être interprété correctement sur le plan thématique. Pour pallier cette difficulté, on pourrait imaginer tester toutes les possibilités de manière à sélectionner celles qui offrent les résultats les plus proches de la réalité, voire celles qui reproduisent exactement la réalité.

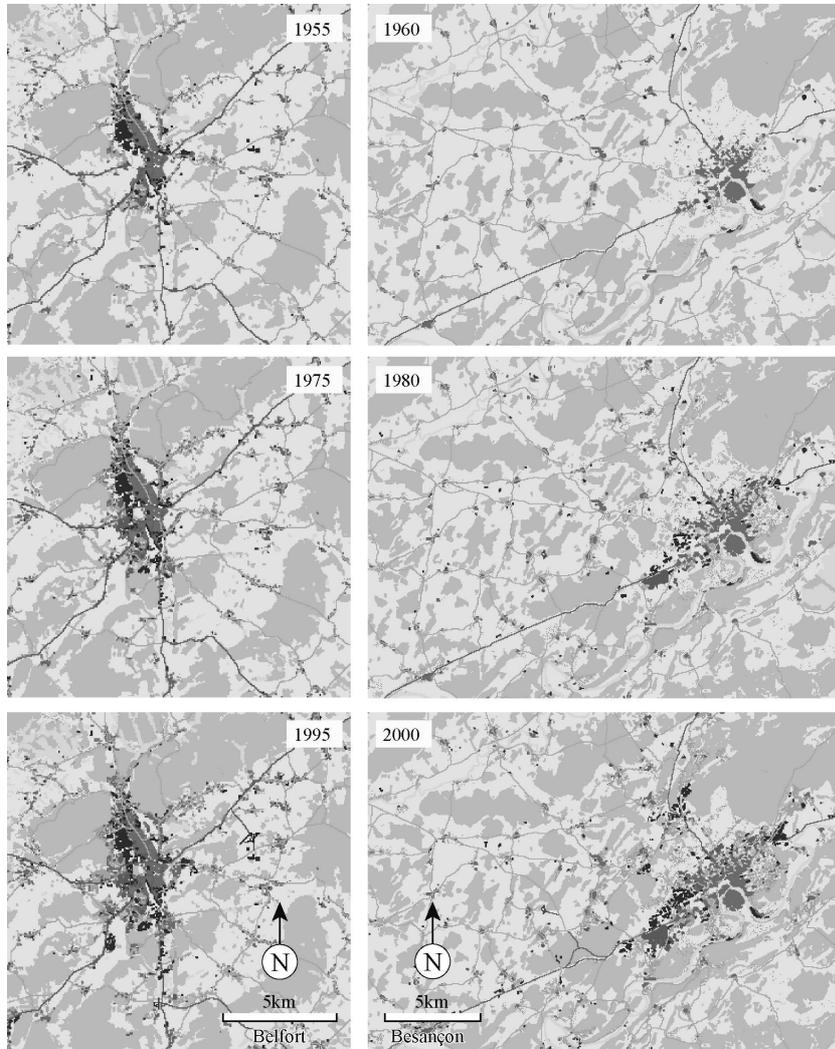
Dans ce contexte, afin de réduire la masse des possibles, l'observation méticuleuse du passé est enrichissante. Sur le plan thématique d'abord, elle montre des grandes tendances qui renseignent sur ce qui s'est passé de manière quantitative. Sur le plan des simulations ensuite, ces tendances peuvent être reproduites et extrapolées. La modélisation et l'usage qui en est fait change donc de cadre puisqu'il ne s'agit plus de faire correspondre les paramètres à situation que l'on souhaite reproduire, mais plutôt de les associer à une réalité dont on connaît les limites ou que l'on imagine. La prospective autorise en effet à postuler une correspondance totale entre cette réalité et les paramètres utilisés pour la simuler. Ceci peut se faire par l'intermédiaire de scénarios. Dans le dictionnaire de R. Brunet *et al.* (1992), on lit effecti-

vement que « la méthode des scénarios [...] participe des modèles de simulation. Elle est une des entrées commodes de la prospective en économie, en aménagement du territoire ». Un scénario est défini comme une « méthode d'anticipation poussant à bout les conséquences logiques d'hypothèses ou de tendances préalables, sous des contraintes imposées ou contrastées ; ou au contraire, imaginant les conséquences d'un infléchissement, d'une nouvelle stratégie ». Chaque scénario apparaît donc intéressant pour mettre en correspondance une certaine vision du futur, qu'il s'agit de modéliser par l'ajustement d'un certain nombre de paramètres.

Dans ce contexte, la question du paramétrage et des possibilités offertes par le modèle CWS peuvent être illustrées par deux exemples : Belfort et Besançon. L'objectif de la simulation consiste ici à développer un scénario prospectif « au fil de l'eau » à l'horizon d'une dizaine d'année, sur ces deux villes très différentes par leur échelle et leur structure. La question que l'on se pose est alors la suivante : « que se passerait-il si tout continuait dans le futur selon les tendances observées dans le passé ? ». Pour tenter de répondre à cette question, nous disposons des données spatio-temporelles carroyées pour trois dates (1960, 1980 et 2000 pour Besançon ; 1955, 1975 et 1995 pour Belfort), obtenue à partir de cartes topographique de l'IGN, numérisées et carroyées selon la méthodologie développée au point 1.1 (Figure 2). Ces images sont instructives en elles-mêmes. A Belfort, par exemple, elles permettent de calculer, par un simple comptage (du nombre de cellules dont l'occupation du sol a évolué), que la ville s'est étendue de 18 % de 1955 à 1975, de 36,5 % de 1975 à 1995, soit une évolution totale de 62% sur la période 1955-1995. A Besançon, le même calcul montre un étalement urbain nettement plus important : près de 200 % entre 1960 et 1980, plus de 150 % entre 1980 et 2000, soit expansion de la surface urbanisée de plus de 300 % sur l'ensemble de la période 1960-2000.

A partir de cette base carroyée, la simulation à l'aide du modèle CWS est effectuée en deux temps. D'abord, il s'agit d'identifier les variables qui ont eu une influence sur l'urbanisation des deux villes, et de mesurer avec quelle « force » elles l'ont eue. Ensuite, une simulation fondée sur ces mêmes paramètres va permettre de construire un scénario de continuation de tendances « au fil de l'eau », et de simuler ce qu'il pourrait advenir de cette urbanisation dans le futur, toutes choses égales par ailleurs.

Figure 2
Evolution de l'occupation du sol à Belfort et à Besançon (cartes)



2.2. Quantifier les changements passés

A Besançon comme à Belfort, l'étude des évolutions passées peut en effet aisément être reproduite pour simuler les changements futurs à l'aide d'une chaîne de Markov, dont l'intérêt méthodologique est détaillé au point 1.2. Deux matrices de transitions étant calculées pour chacune des deux villes, nous les uniformisons ici deux par deux en une matrice unique, tenant compte à 25 % des tendances observées dans la

première période (1960-1980 à Besançon et 1955-1975 à Belfort), et à 75 % des tendances observées dans la seconde (1980-2000 à Besançon et 1975-1995 à Belfort). Ceci revient à poser une hypothèse, contenue dans le scénario « au fil de l'eau » : les évolutions futures se calquent sur les évolutions passées, mais seront plus influencées par la période récente (75 %) que la période plus ancienne (25 %). Appliquées à l'occupation du sol la plus récente de chaque ville, les probabilités de transitions contenues dans ces matrices uniformisées permettent alors de calculer le nombre de cellules de chaque catégorie qui évolueront dans le futur, à savoir en 2020 pour Besançon, et en 2015 pour Belfort, selon l'hypothèse contenue dans le scénario au « fil de l'eau », selon laquelle les changements futurs se feront sur la même base que les changements passés. Le résultat de ce calcul est présenté par un graphique (Figure 3) montrant l'évolution des catégories d'occupation du sol les plus significatives, dans le passé (valeurs observées) et dans le futur (valeurs simulées par le modèle).

2.3. Reproduire les logiques spatiales

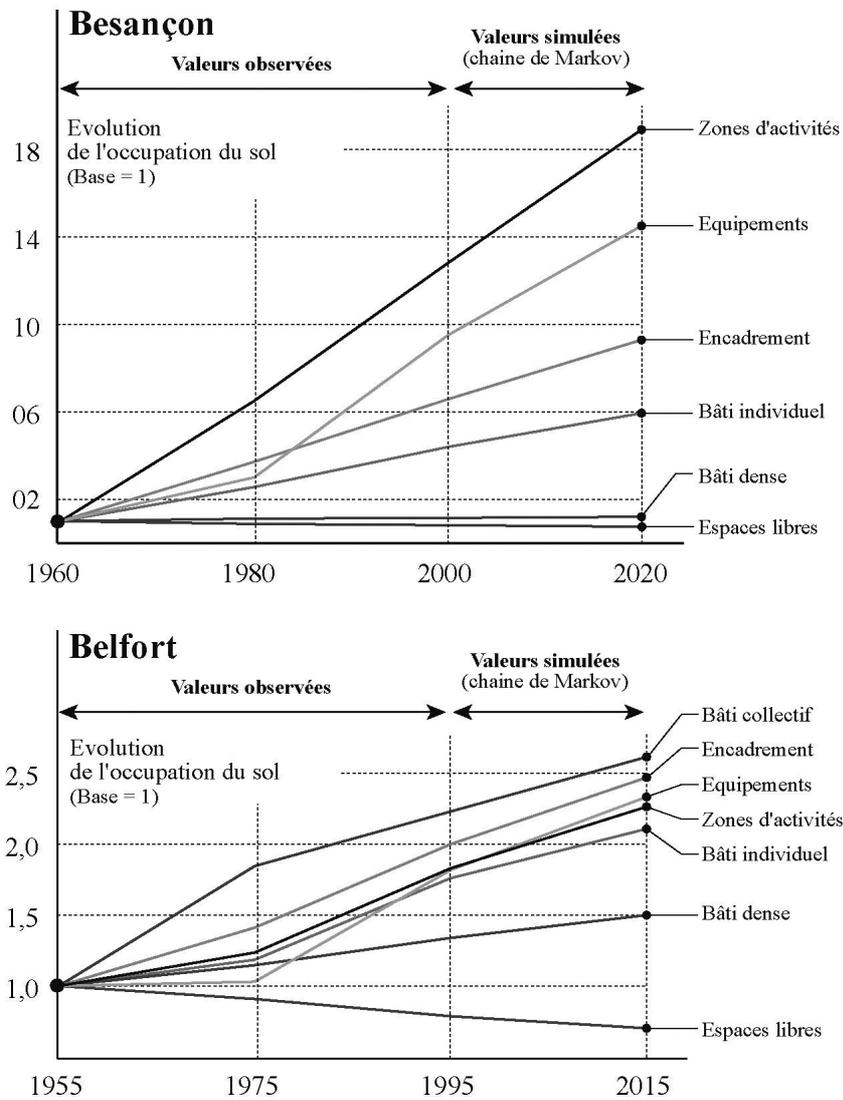
Construite sur des probabilités de transition observées dans le passé, une chaîne de Markov a donc permis de déterminer le nombre de cellules qui changeront de catégorie d'occupation du sol dans le futur, notamment, pour ce qui nous intéresse le plus, à savoir celles qui passeront d'un état « non bâti » à un état « bâti ». Il s'agit désormais de les localiser, c'est-à-dire d'identifier les variables permettant de paramétrer le modèle de potentiel décrit au point 1.3. Mais, alors que le paramétrage des chaînes de Markov est construit de manière endogène par reproduction des matrices de probabilités, celui du modèle de potentiel est plus délicat et ne peut être endogénéisé. Il peut par contre s'obtenir par un exercice de postdiction empirique, qui consiste à tester différentes possibilités de paramétrage, et à évaluer lesquelles reproduisent le mieux les changements observés dans le passé. Pour cela, plusieurs combinaisons peuvent être testées, en modifiant les valeurs de masse m du modèle de potentiel, et donc en quelque sorte l'attractivité de chaque catégorie d'occupation du sol. Plusieurs scénarios tests ont permis de repérer les seuils possibles pour les paramètres à retenir.

2.3.1. A Belfort

A Belfort, quatre tests ont été effectués, dont les paramètres sont indiqués dans le Tableau 2.

La pertinence de chacun de ces tests peut être évaluée en comparant les résultats qu'ils permettent d'obtenir avec la réalité observa-

Figure 3
Evolution de l'occupation du sol à Belfort et Besançon (graphiques)



ble sur les cartes de chaque période. Ainsi, en appliquant le modèle de potentiel sur la configuration spatiale de 1975, on obtient une simulation pour la date de 1995, dont les écarts avec la situation observée pour la même date peuvent être mesurés. Plusieurs méthodes peuvent être utilisées pour ce type de mesures comparatives, parmi lesquelles on peut notamment citer les *Map comparison*

Tableau 2

Tests de paramétrage du modèle de potentiel (valeurs de masse m)

	Espace libre (champs)	Bâti résidentiel individuel	Bâti résidentiel dense	Bâti résidentiel collectif	Routes départementales	Routes nationales
Test 1	0	3	2	2	3	4
Test 2	0	2	4	2	3	4
Test 3	0	1	5	4	3	4
Test 4	0	2	5	4	1	2

Tableau 3

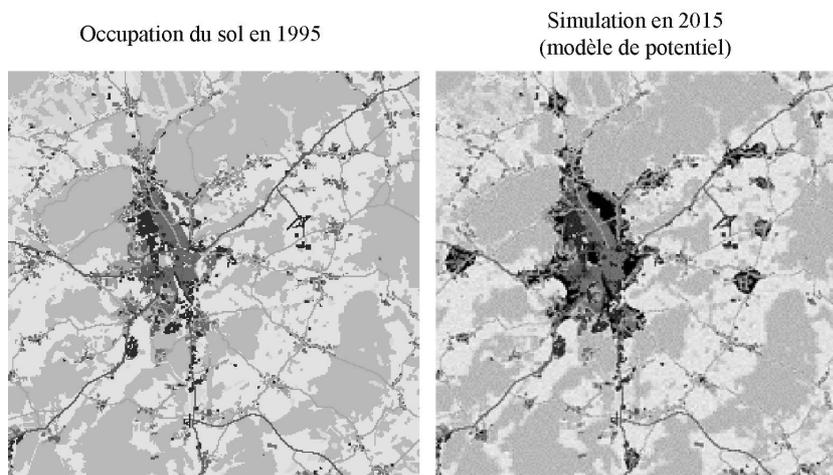
Une validation : comparer les résultats du modèle aux changements observés

	Nombre de cellules correctement localisées					
	Correctement localisées	Correctement localisées (%)	à 150m	à 150m (%)	à 400m	à 400m (%)
Test 1	291	16	962	54	1160	65
Test 2	391	17	1269	55	2085	91
Test 3	425	19	1311	59	2063	92
Test 4	465	21	1367	61	2060	92

methods (Hagen-Zanker, 2006). Ici, une approche fondée sur les possibilités d'analyse des Systèmes d'information géographiques (SIG) est toutefois apparue suffisante : en superposant l'image de 1995 et la simulation produite par le modèle, il est en effet possible de compter le nombre de cellules correctement localisées par le modèle, puis les cellules plus ou moins bien localisées à différentes distances (150 et 400 mètres) par l'intermédiaire de *buffers*. Les résultats montrent que le quatrième paramétrage est celui qui reproduit le mieux les tendances observées : une cellule sur cinq est correctement localisée, 60 % le sont à 150 mètres près, et plus de 90 % le sont à 400 mètres près (Tableau 3).

Ces résultats permettent de saisir l'importance relative de chaque catégorie d'occupation du sol dans le processus d'urbanisation. Le bâti dense semble le plus attractif pour les nouvelles constructions qui s'agglomèrent autour de la ville existante, mais privilégie une proximité relative aux espaces moins denses et aux routes, notamment les routes nationales. Une reproduction de ce schéma d'urbanisation permet de simuler l'urbanisation future et de construire une carte de l'étalement urbain à l'horizon 2015, présentée sur la Figure 4.

Figure 4

Une localisation possible de l'étalement urbain belfortain à l'horizon 2015

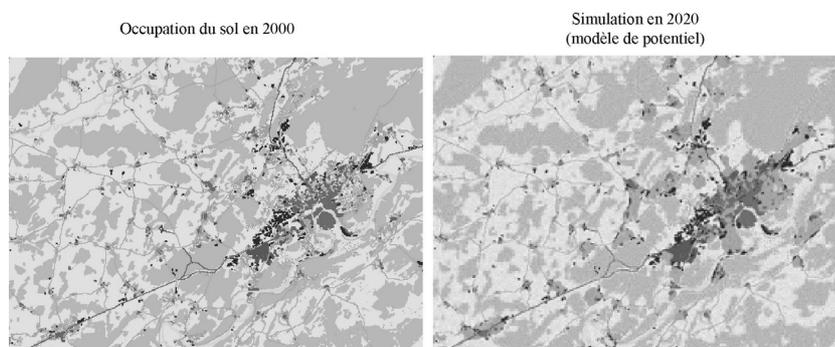
P. Joannès, J.P. Antoni (2009)

Sur l'image de droite (simulation par un modèle de potentiel), les cellules « noires » sont celles qui passeront d'un état « non-bâti » à un état « bâti ».

2.3.2. A Besançon

Sur l'exemple de Besançon, un exercice similaire permet de retenir le paramétrage suivant : en considérant que les nouvelles constructions vont se faire à proximité du bâti existant, et à plus forte raison à proximité des maisons individuelles (l'aire étudiée est en majorité périurbaine), les maisons individuelles ont été estimées comme les plus attractives ($m=3$) par l'exercice de postdiction, le bâti collectif un peu moins ($m=2$) et les espaces denses comme les moins attractifs ($m=1$). Les différents tests ont également révélé que les espaces naturels et ouverts n'exercent pas particulièrement d'attraction, tout comme les fonctions d'encadrement (fonctions administratives, d'enseignement, etc.) et les équipements. L'attractivité des routes départementales, quant à elle, a été évaluée à 2 et celle des routes nationales à 1 seulement. En effet, augmenter leur poids exerçait une influence beaucoup trop importante sur le développement spatial par rapport à la réalité observée. Le scénario le plus satisfaisant présente donc une configuration telle que, à partir de l'image de 1980, 30 % des cellules potentiellement urbanisables sont correctement localisées (à l'endroit exact que montre l'image de 2000) et 80 % sont correctement situées à 150m près. La reproduction de ces tendances à l'horizon 2020 est présentée sur la Figure 5.

Figure 5

Une localisation possible de l'étalement urbain bisontin à l'horizon 2020

J. Hirtzel, J.P. Antoni (2009)

2.4. Différencier l'urbanisation à venir

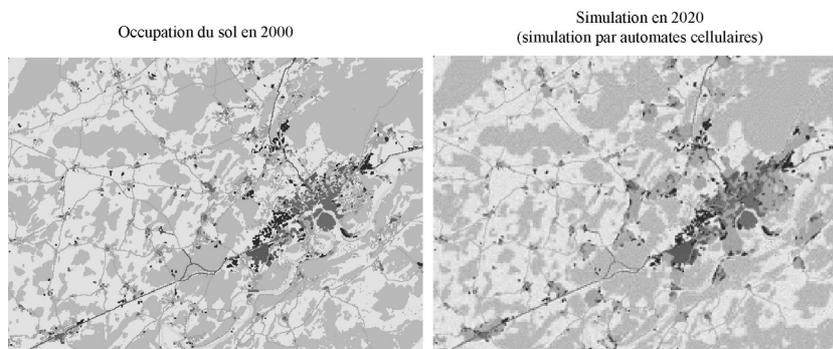
La troisième étape du modèle CWS consiste à différencier les cellules quantifiées à la première étape et localisées lors de la deuxième étape. Elle requiert un modèle d'automates cellulaires dont la logique a été décrite au point 1.4. L'application de ce modèle nécessite de traduire le scénario « au fil de l'eau » en une série de règles faisant intervenir les catégories d'occupation de chaque cellule et celle de leurs voisines, selon des rayons de proximité variables. Comme précédemment, plusieurs tests ont été effectués afin de reproduire au mieux l'état de développement urbain de la dernière date observée pour chacune des deux villes.

2.4.1. A Besançon

A Besançon, les règles de transition d'une catégorie d'occupation du sol à une autre (pour chaque cellule) qui ont été retenues sont les suivantes :

- le bâti résidentiel se positionne à proximité du bâti résidentiel existant : la proportion de voisins dans un rayon de 2 cellules (100 mètres) de type bâti résidentiel doit être supérieure ou égale à 30% ;
- les zones activités se positionnent à proximité d'autres activités : la proportion de voisins dans un rayon de 2 cellules (100 mètres) de type activités doit être supérieure ou égale à 40 % ;
- le bâti collectif se positionne à proximité du bâti collectif : la proportion de voisins du même type dans un rayon de 2 cellules (100 mètres) doit être supérieure ou égale à 20 %.

Figure 6

Besançon : simulation de l'urbanisation à l'horizon 2020

J. Hirtzel, J.P. Antoni (2009)

Les équipements et les structures d'encadrement présentes sur l'aire urbaine n'ont quant à eux pas été retenus dans la construction des règles, compte tenu de leur faible influence sur l'urbanisation, révélée à l'étape précédente (cf. le point 2.3.). De même, l'intégration forte du bâti dense (pour paramétrer la localisation du bâti collectif notamment) s'est avérée peu concluante dans le cadre de l'exercice de postdiction. Les résultats obtenus en comparant les résultats issus du modèle à ceux que l'on peut observer dans la réalité présentent des pourcentages globalement identiques aux précédents : 24 % des cellules différenciées sont correctement localisées, c'est-à-dire à l'endroit exact que montre l'image de 2000, et 77 % des cellules sont correctement identifiées dans un rayon de 150 mètres. La création de cellules « activités » a été la plus faible et la moins fidèle à la réalité (aucune cellule « activité » n'est localisée au bon endroit et seulement 8 % dans un rayon de 150 mètres). Les résultats de cette troisième étape, qui conclut la modélisation, sont présentés sur la Figure 6, où les cellules de couleur noire sont celles que le modèle n'a pas pu différencier compte tenu du paramétrage retenu.

Ainsi, le résultat (issu d'un paramétrage censé reproduire un scénario « au fil de l'eau ») montrent qu'à Besançon, les espaces déjà fortement urbanisés renforcent encore leur densité : une véritable « ceinture » urbaine semble émerger autour de la ville-centre. Les communes les plus éloignées (couronne périurbaine), par contre, possèdent comparativement moins d'atout en termes d'attractivité pour les futures expansions ; elles ne connaissent donc qu'une croissance limitée.

2.4.2. A Belfort

A Belfort, la différentiation des changements a nécessité de traduire le scénario « au fil de l'eau » par les règles suivantes, à peine différentes des précédentes, mais tout de même plus complexes :

- l'urbanisation est de type « maisons individuelles » si la proportion de maisons individuelles dans un voisinage d'une cellule (50 mètres) est supérieur ou égale à 30 % et si la proportion de bâti dense dans un voisinage de trois cellules (150 mètres) est supérieure ou égale à 20 % ;

- les cellules deviennent « bâti collectif » si la proportion de bâti dense dans leur voisinage de deux cellules (100 mètres) est supérieure ou égale à 50 % ;

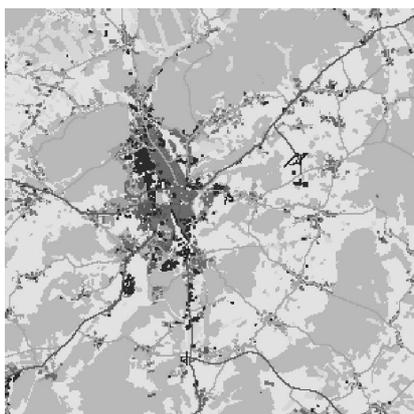
- les zones d'activité apparaissent si la proportion d'activités dans un voisinage de 100 mètres est supérieure ou égale à 40 % et si le nombre de routes départementales dans un voisinage de cinq cellules (250 mètres) est supérieur ou égale à 30 %.

Comme le montre la Figure 7, ces trois règles permettent de localiser le bâti résidentiel dans les espaces laissés libres à proximité des constructions existantes, en comblant certaines « dents creuses ». L'aire urbaine étant relativement dense et majoritairement urbaine, et ne présentant que de petites communes périurbaines, la ville centre de Belfort apparaît bien comme le pôle principal. Par contre, la généra-

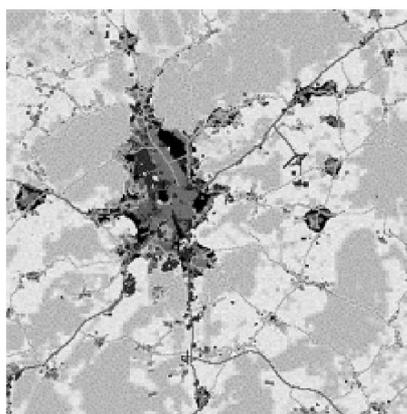
Figure 7

Belfort : simulation de l'urbanisation à l'horizon 2015

Occupation du sol en 1995



Simulation en 2015
(simulation par automates cellulaires)



P. Joannès, J.P. Antoni (2009)

tion des cellules susceptibles d'accueillir des zones d'activités est importante et fait émerger des « tâches » autour de la ville. L'ensemble offre une image possible de l'urbanisation à venir sur ce territoire, sous réserve, évidemment, que les hypothèses d'une continuation de tendance incluses dans le scénario au « fil de l'eau » se réalisent.

CONCLUSION

Comme le montre ces deux exemples, le modèle CWS permet aujourd'hui de générer rapidement des simulations simples et opérationnelles quant à l'avenir des territoires urbains. Pour autant, il ne répond pas spécifiquement à toutes les questions que se posent les urbanistes et les aménageurs : le vieillissement des zones résidentielles et d'activités n'est pas directement pris en compte, la distance au centre n'intervient pas en tant que telle, le modèle « tourne » en système clos, et ne tient pas compte d'évolutions qui pourraient provenir de son espace régional (autres villes par exemple), etc. De ce fait, deux voies orientent les recherches en cours. Dans un premier temps, il s'agit de compléter l'outil par des indicateurs nouveaux permettant d'évaluer la pertinence des différents scénarios produits, notamment en termes de coûts (coût social, environnemental, financier, etc.) des différentes options envisagées. Ensuite, il conviendrait de mieux y intégrer la problématique de la mobilité et du transport, c'est-à-dire autrement que par une simple prise en compte de la distance à vol d'oiseau qui sépare chaque cellule de ses voisines. L'accessibilité, par exemple, pourrait être considérée dans le modèle par une série de développements complémentaires, qui rapprocheraient alors le modèle CWS d'un modèle LUTI (*Land use Transport Integrated models*). Cela étant, le modèle offre aujourd'hui une réelle visibilité rétrospective (il permet de mesurer ce qui s'est passé) et prospective (il permet d'extrapoler ces tendances et/ou de les modifier pour qu'elles correspondent à une volonté) des territoires urbains : « Que risque-t-il de se passer, et à quelle condition ? ». *De facto*, il s'agit donc véritablement d'un outil de réflexion accompagnant les décisions d'aménagement, et permettant d'en évaluer les conséquences.

Références bibliographiques

- Abler R., Adams J.S, Gould P., 1972, *Spatial organization. The geographer's view of the world*, Prentice Hall International, 587 p.
- Almeida C.M. et al., 2002, Empiricism and stochastics in cellular automaton modeling of urban land use dynamics, *Working Paper series*, Centre for Advanced Spatial Analysis, 42, 38 p.

- Antoni J.P., 2002, Urban sprawl modelling : a methodological approach, *Cybergeo : European Journal of Geography*, 207, <http://193.55.107.45/Ectqg12/antoni/antoni.htm>
- Antoni J.P., 2002, Urban sprawl modelling : combining models to make decision, *Proceedings of the 6th International Conference on Design and Decision Support Systems in Architecture and Urban Planning*, Ellecom, The Netherlands, pp. 12-23.
- Antoni J.P., 2003, *Modélisation de l'étalement urbain. Aspects conceptuels et gestionnaires*, Thèse de doctorat, Université Louis Pasteur, Strasbourg, 535 p.
- Antoni J.P., 2004, Modelling : A means to share information and knowledge in urban Planning Issues, *Proceedings of the 18th International Conference Informatics for Environmental Protection*, Geneva, Switzerland, Editions du Tri-corne, pp. 163-171.
- Batty M., Jiang B., 1999, Multi-agent simulation : new approaches to exploring space-time dynamics within GIS, *Working paper Series*, Centre for Advanced Spatial Analysis, 10, 25 pages.
- Berchtold A., 1998, *Chaînes de Markov et modèles de transition. Application, aux sciences sociales*, Hermes, 284 p.
- Brunet R., 2001, Models in Geography ? A sense to research, *Cybergeo : European Journal of Geography*, 204.
- Conway J., 1970, Mathematical games, *Scientific American*, October, pp. 120-127.
- Couclecis H., 1985, Cellular World : a framework for modelling micro-macro dynamics, *Environment and Planning A*, 17, pp. 585-596.
- Couclecis H., 1988, Of mice and men : what rodent population can teach us about complex spatial dynamics, *Environment and Planning A*, 20, pp. 99-109.
- Feller W., 1965, *An introduction to probability theory and its application* (2nd edition), John Wiley & Sons, 461 p.
- Grasland C., 1994, Limites politiques et barrières migratoires : l'exemple de l'ex-Tchécoslovaquie de 1961 à 1990. In : Gallusser W., 1994, *Political Boundaries and Coexistence*, UGI.
- Hagen-Zanker A., 2006, Map comparison methods that simultaneously address overlap and structure, *Journal of geographical systems*, 8, pp. 165-185.
- Haggett P., Chorley R.J., 1967, Models, paradigms and the new geography. In : Haggett P., Chorley R.J., 1967, *Models in Geography*, The Trinity Press, pp. 19-41.
- Helvig M., 1964, *Chicago's external Truck Movements : Spatial interactions between the Chicago area and its hinterland*, University of Chicago, Department of Geography, Research paper, 90, 132 p.
- Rimbert S., 1995, *Carto-graphies*, Hermès, 176 p.
- Stouffer S.A., 1940, Intervening opportunities : a theory relating to mobility and distance, *American Sociological Review*, V, 6, pp. 845-867.
- Tobler W. R., 1979, Cellular geography. In : Gale S., Olsson G., 1979, *Philosophy in geography*, Reidel Pub., pp. 379-386.
- Ullman E.L., 1957, *American commodity flow. A geographic interpretation of rail and water traffic based on principles of spatial interchange*, University of Washington Press.
- White R., Engelen G., 2003, A calibrating procedure for constrained large neighbourhood cellular automata based land use models, *13th European Colloquium on Theoretical and Quantitative Geography*, Lucca, Italy.

CHAPITRE 10

MUP-CITY : UNE APPROCHE MULTI-ÉCHELLE POUR LE DÉVELOPPEMENT RÉSIDENTIEL DES NOUVEAUX ESPACES URBAINS

Pierre Frankhauser, Cécile Tannier,
Gilles Vuidel et Hélène Houot

Laboratoire ThéMA
UMR 6049 CNRS – Université de Franche-Comté
32 rue Mégevand – F25000 Besançon
pierre.frankhauser@univ-fcomte.fr

1. MODÈLES DE VILLE ET ÉTALEMENT URBAIN

De nombreux d’auteurs ont mis en évidence les effets néfastes de la périurbanisation qui contribue à une augmentation du nombre et de la longueur des déplacements, au morcellement de l’habitat et à la fragmentation des espaces naturels et agricoles, comme par exemple G. Dantzig et T. Saaty (1973) ou P.W.G. Newman et J.R. Kenworthy (1989, 1992). L’alternative souvent mise en avant est le retour à la ville dense car celle-ci offre une bonne accessibilité aux commerces et services et favorise l’utilisation des transports en commun.

1.1. Le débat sur la périurbanisation

Toutefois, il faut être conscient que la périurbanisation correspond à un mode de vie et n’est pas seulement la conséquence d’un prix foncier plus bas dans les zones plus éloignées des villes. Une enquête récente, réalisée en 2007 par le Département Stratégies d’Opinion / Société de l’Institut d’études marketing et d’opinion TNS Sofres (Gault et Bedeau, 2007) a mis en évidence le fait que l’habitat souhaité par 56 % des ménages français est la maison individuelle isolée. La maison individuelle dans un ensemble pavillonnaire est préférée par 20 % des ménages et le petit habitat individuel en ville par 11 %. Bon

nombre de résidents s'installant dans les zones périurbaines fuient la densité urbaine, car ils souhaitent habiter dans une maison individuelle entourée d'un jardin et bénéficier d'un environnement vert et calme. Il paraît évident qu'une telle tendance favorise l'étalement urbain (Wiel, 2002 ; von Hoffmann et Felkner, 2002), mais il paraît difficile de convaincre des ménages d'une densification dans leur environnement résidentiel, s'ils ont choisi d'éviter la densité (Breheny, 1997 ; Gordon et Richardson, 1997 ; Pouyanne, 2004). Certains auteurs, comme M. Amerigo *et al.*, (1997) ou M.L. Martinez *et al.* (2002) ont posé l'hypothèse qu'il existe un système de relations entre la structure et la fonction du paysage, sa perception par les habitants et leur niveau de satisfaction. L'impact positif de la proximité d'un parc ou d'espaces verts sur le prix foncier des maisons a en effet été constaté par différents auteurs (Bolitzer et Netosil, 2000 ; Hobden *et al.*, 2003). L'accessibilité par la marche à pied paraît être un critère important dans l'évaluation de l'accès aux espaces de loisirs (Hobden *et al.*, 2003 ; Tyrvaïnen et Miettinen, 2000). Il n'est donc pas surprenant que les opérations de densification des zones résidentielles soient souvent contestées par les populations concernées (Garcia et Riera, 2003 ; Owens, 1992 ; Rémy, 1994 ; Fouchier, 1995).

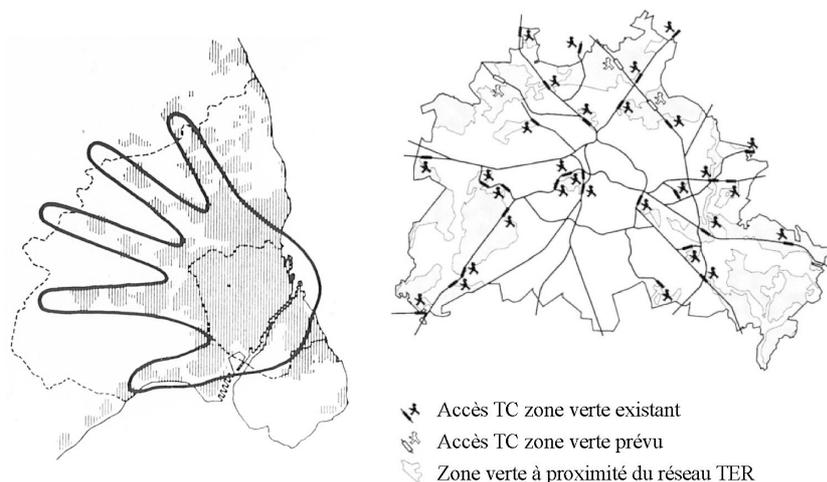
Soulignons aussi que l'impact de la ville dense sur la génération de trafic est à nuancer (Pouyanne 2004 ; Dupuy, 2002). Ainsi, comme l'ont constaté D.M. Levinson et A. Kumar (1997) pour les migrations alternantes aux Etats Unis, le temps de déplacement baisse en fonction de la densité de population, mais augmente dès que la densité de population dépasse un certain seuil. Comme le soulignent également T. Schwanen *et al.* (2004), les ménages tendent à choisir des lieux résidentiels qui minimisent la distance ou le temps d'accès aux emplois (Brun et Fagnani, 1994 ; McDowell, 1997), mais aussi aux commerces (Lerman, 1976) ainsi qu'aux zones de loisirs fréquentées (Guo et Bhat, 2002). En conséquence, T. Schwanen *et al.* (2004) voient dans la densification un risque à moyen terme de relocalisation des ménages vers des zones moins denses.

Il paraît donc utile d'intégrer la demande sociale dans une stratégie d'aménagement, dont le but serait de « canaliser » la périurbanisation, au lieu de la refuser (Beaucire *et al.*, 1999). Dans ce contexte, la localisation de nouvelles constructions par rapport à l'accessibilité des lieux régulièrement fréquentés est un élément essentiel à prendre en compte.

Dans le but de réduire la longueur des trajets en voiture et de limiter l'étalement urbain diffus, certaines agglomérations européennes ont mis en place depuis longtemps des stratégies d'aménagement

Figure 1

Plan de développement en « doigts de gants » pour l'agglomération de Copenhague (gauche) et accessibilité aux zones de loisir à Berlin (droite)



Source : Städtebauliches Institut, Stuttgart ; Landschaftsprogramm Artenschutzprogramm.

qui favorisent l'utilisation des transports en commun. Cette politique se traduit par la définition d'axes de développement prioritaires le long des lignes de transport en commun. Un autre objectif est également de préserver, dans les espaces interstitiels, des zones naturelles qui peuvent accueillir des activités de loisirs. Le rôle positif de coulées vertes sur le climat à l'échelle urbaine a été mis en évidence et est devenu un argument courant dans les stratégies d'aménagement en Allemagne (cf. notamment *Land-schaftsprogramm Artenschutzprogramm*, 1994). Citons comme exemples le fameux plan en « doigts de gants » de Copenhague (Figure 1a) ou les différents schémas d'aménagement de Berlin (Figure 1b). Dans les deux cas, les zones urbanisées, et les zones de loisir à Berlin, sont desservies par un réseau de type RER.

Cependant, le seul développement axial ne paraît pas suffisant pour assurer une structuration fonctionnelle à l'échelle des grandes agglomérations. Les nouveaux espaces urbains correspondent en effet à un système de peuplement rassemblant différents types et niveaux de fonctions. De ce fait, un développement polycentrique paraît nécessaire. Ainsi, pour V. Fouchier (1995), le développement de centres secondaires semble indispensable à la réduction du trafic dans les agglomérations. R. Camagni et M.C. Gibelli (1997), ainsi que D. Mignot *et al.* (2004) ont également souligné l'intérêt d'une ville polycentrique en réseau.

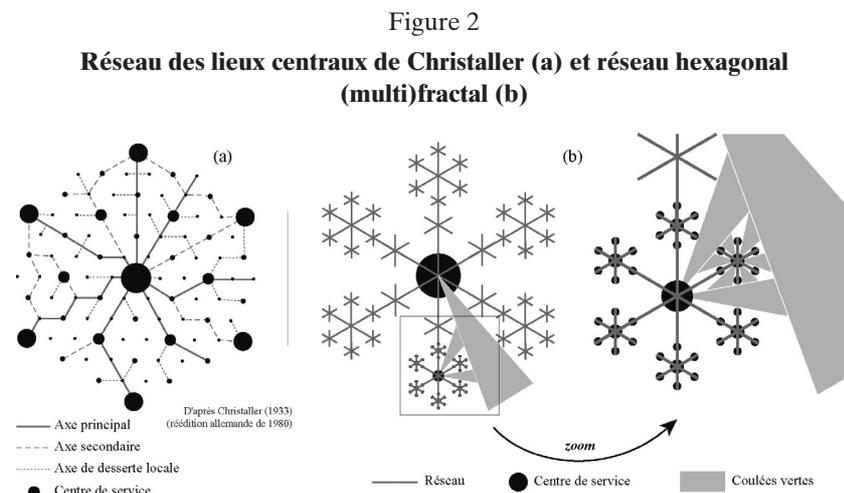
S'inscrivant dans cette logique, nous proposons un concept d'aménagement polycentrique multi-échelle des espaces périurbains, qui se réfère à une logique fractale. L'objectif est d'optimiser l'accessibilité à différents types de commerces et services, ainsi qu'aux espaces verts, naturels et de loisir, tout en évitant le morcellement des zones bâties et non bâties (naturelles ou agricoles). Après avoir introduit le concept d'aménagement multi-échelle, nous illustrons son application. Nous présentons ensuite le progiciel MUP-City qui préfigure un outil d'aide à la décision via la simulation de scénarios d'urbanisation. Cette recherche a été réalisée dans le cadre du Programme de recherche et d'innovation dans les transports terrestres (PREDIT) (Frankhauser *et al.*, 2007a).

1.2. Optimiser l'accessibilité à différents types d'aménités à travers un concept d'aménagement multi-échelle

Introduire un système hiérarchique de villes qui distingue différents niveaux de services rappelle la logique de la Théorie des lieux centraux (Christaller, 1933), dont une illustration est fournie par la Figure 2a. Ce modèle introduit un système hiérarchisé de services qui tient compte de leur fréquence de recours. Le semis des habitats reste toutefois uniforme ce qui induit des distances assez importantes aux centres les plus proches offrant un certain niveau de services. Dans le modèle de W. Isard (1956), la répartition des habitats n'est plus uniforme, cependant les critères d'optimisation des coûts de transport sont basés sur les services et les activités industrielles et ne considèrent donc pas l'accès aux zones non construites, notamment récréatives.

Par définition, la géométrie fractale génère des structures spatiales multi-échelles hiérarchisées. Il paraît donc possible d'établir un lien entre les hiérarchies spatiales des modèles d'aménagement et la géométrie fractale, ce qui a notamment été fait par S. Arlinghaus (1985). Toutefois, d'après la logique christallérienne, les habitats sont répartis de manière uniforme dans l'espace, ce qui est aussi le cas dans le modèle proposé par S. Arlinghaus.

Nous montrons ici l'intérêt d'appliquer le principe d'une hiérarchie spatiale également à la répartition des espaces non-bâties en modifiant le schéma de Christaller selon une logique (multi)fractale (Figure 2b). Dans ce modèle, nous avons rapproché les centres urbains secondaires de la ville-centre. Ainsi, les centres secondaires sont plus proches des principaux axes de transport qui relient les espaces périphériques au centre principal, situé au cœur du schéma.

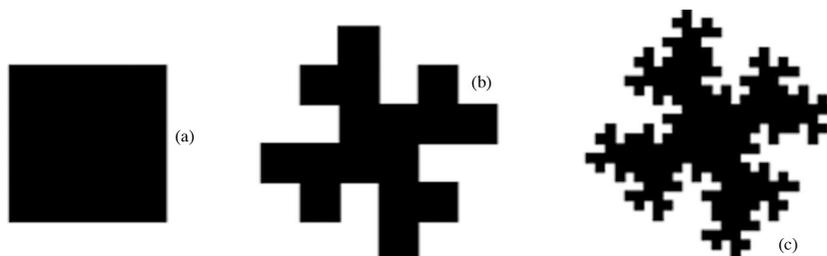


Comme les centres secondaires sont en même temps des points d'interconnexion du réseau de transport, la concentration des flux vers les axes de transport principaux permet d'imaginer la mise en place d'un système de transport en commun pertinent et une logique de rabattement vers ce réseau. Cette configuration permet aussi de ménager des coulées vertes qui pénètrent à de multiples endroits de l'agglomération. Les coulées vertes de taille importante peuvent être associées à des réserves naturelles, des zones rurales ou des zones de loisir, dont la fonction se situe à une échelle plutôt régionale. Elles séparent les aires de chalandises des centres urbains secondaires, ce qui réduit l'accessibilité aux centres offrant le même type de services et évite un morcellement des zones vertes. Finalement, ce schéma généralise les réflexions conceptuelles appliquées notamment à Copenhague et Berlin, en appliquant une logique d'organisation radioconcentrique aux sous-centres de différents niveaux. Les impacts économiques d'un modèle similaire ont été étudiés par J. Cavailhès *et al.* (2004, 2009).

Considérons maintenant un autre niveau d'analyse, celui de la répartition de la surface bâtie à l'échelle d'une ville ou d'un village périurbain. Le modèle de la ville compacte se traduit souvent par des aménagements visant à lisser les bordures urbaines. Au contraire, notre modèle articule les zones habitées et le paysage ouvert en allongeant la bordure urbanisée, tout en évitant un morcellement des zones non-urbanisées. Ceci permet d'améliorer l'accessibilité aux zones de loisir de proximité, et ainsi de répondre à une certaine demande sociale (Bolitzer et Netosil, 2000 ; Hobden *et al.*, 2003) tout

Figure 3

**Trois manières d'envisager la bordure urbaine :
du carré (a) au téragone (b et c)**
D'après B. Mandelbrot (1983)



en évitant un morcellement du bâti. En outre, l'articulation entre espaces naturels et zones urbanisées permet une meilleure ventilation des cœurs de ville, et l'évaporation de la couverture végétale contribue à une réduction du réchauffement local. La Figure 3 illustre cette possibilité d'articuler, selon une logique multi-échelle, les zones bâties et le paysage ouvert à travers trois scénarios (a), (b) et (c) pour lesquels une même surface bâtie est spatialement répartie de manière différente.

Le scénario (a) est celui d'une ville carrée, compacte, offrant peu de terrains situés en bordure de la ville, donc limitrophes au paysage ouvert. Dans le scénario (b), des poches non bâties pénètrent dans la surface bâtie ; la longueur de la bordure urbanisée est ainsi le double de celle du carré. Dans le scénario (c), de nouvelles petites poches « vertes » ont été ajoutées et la longueur de la bordure a encore doublé. Un tel allongement de la bordure, qui correspond à une logique fractale, permet à un nombre important de personnes de s'implanter sur des parcelles situées en bordure de la ville et de bénéficier d'un contact direct avec le paysage ouvert, tant que les poches vertes préservées ne sont pas trop petites. Nous avons démontré que le gain d'accessibilité au paysage ouvert de ce modèle de ville est globalement plus important que la perte d'accessibilité au centre ville (Frankhauser, 2000).

Ces exemples montrent que la géométrie fractale permet d'imaginer des modèles de villes qui amènent à réorienter l'aménagement des espaces urbains. Il est possible de travailler tant à partir de structures linéaires (réseaux notamment) (Figure 2b), que de structures surfaciques (Figure 3). Ils constituent la base conceptuelle de la méthodologie proposée ci-après.

Celle-ci est appliquée à une agglomération de taille moyenne, Besançon, située à l'Est de la France¹. Cette agglomération a connu une périurbanisation tardive. Les zones périurbaines sont essentiellement constituées de maisons individuelles et de petit habitat collectif. Le degré d'équipement en services et commerces varie fortement en fonction des secteurs de l'agglomération. Deux secteurs ont été plus particulièrement analysés. L'un, situé à l'Est de Besançon sur le premier plateau du Jura, dispose d'un tissu commercial bien développé et hiérarchisé. Les villes et villages y sont relativement concentrés et l'habitat est peu diffus. L'autre secteur, situé au Nord de l'agglomération bisontine, montre au contraire une urbanisation assez incohérente. Il souffre, en plus, d'une absence de commerces de proximité qui peut s'expliquer par la présence d'un des grands centres commerciaux de l'agglomération. Son développement futur sera affecté par la future gare TGV², actuellement en construction.

2. NORMES D'AMÉNAGEMENT ET MÉTHODOLOGIE D'APPLICATION DU CONCEPT D'AMÉNAGEMENT MULTI-ÉCHELLE

Nous introduisons maintenant un certain nombre de règles dans le but de rendre opérationnelles les réflexions conceptuelles exposées précédemment.

2.1. Caractéristiques spatiales considérées

Ces caractéristiques sont les suivantes :

- aspects morphologiques (articulation entre bâti et paysage ouvert, non-fragmentation du bâti et des espaces non-bâti) ;
- accessibilité aux aménités urbaines et rurales ;
- potentiel de développement résidentiel ;
- contraintes naturelles et préconisations environnementales.

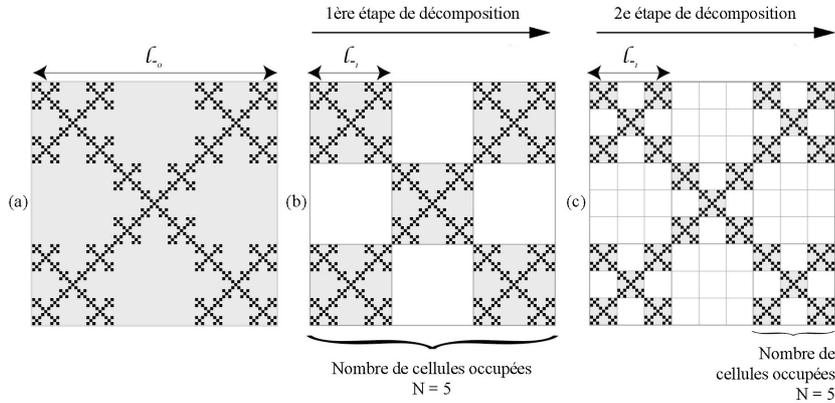
2.2. Approches multi-échelles de l'occupation du sol

Afin d'obtenir une répartition hiérarchique de la surface bâtie, nous utilisons la dimension fractale comme une « norme d'urbanisation ».

1. Les données nécessaires (BD TOPO® IGN) ont été mises à disposition dans le cadre d'une convention associant l'Agence d'urbanisme de l'agglomération de Besançon (AUDAB) au laboratoire ThéMA pour le contrat PREDIT précité.

2. associée à la Branche Est de la Ligne à grande vitesse (LGV) Rhin-Rhône reliant Mulhouse à Dijon, via Belfort-Montbéliard et Besançon.

Figure 4

La décomposition fractale, illustrée pour une fractale théorique

Le passage à une grille de plus en plus fine permet de déterminer la dimension fractale et d'étudier différentes propriétés morphologiques du tissu bâti.

Nous illustrons sa signification à travers la méthode qui nous servira aussi bien de base pour l'analyse du tissu bâti existant que pour l'élaboration de scénarios de développement. Cette méthode, qui s'inspire de la méthode d'analyse fractale dite du quadrillage, est appelée « décomposition fractale » du tissu bâti.

Dans la Figure 4, nous appliquons la décomposition fractale à une structure fractale simple. On entoure la structure en question d'un carré de longueur de base l_0 (Figure 4a) qu'on découpe lors, d'une première étape de décomposition, en neuf carrés de longueur $l_1 = 1/3 l_0$ appelés « cellules ». On identifie alors le nombre N_{emp} de cellules occupées, c'est-à-dire qui contiennent des éléments noirs. Dans l'exemple présenté $N_{emp} = 5$ (Figure 4b). On poursuit ce type de découpage à l'étape de décomposition suivante. Nos cellules de taille l_1 générées à la première étape constituent maintenant les mailles d'un grillage plus fin composé de cellules de taille $l_2 = 1/3 l_1$ (Figure 4c). Chacune de ces mailles de taille l_1 contient de nouveau $N_{emp} = 5$ cellules occupées de taille $l_2 = 1/3 l_1$. Ainsi chaque cellule de taille l_i d'une étape i de décomposition devient lors du passage à l'étape de décomposition suivante une maille qui contient 9 cellules de taille réduite $l_{i+1} = 1/3 l_i$.

Le paramètre de découpage r , ici un tiers, et le nombre N_{emp} de cellules occupées déterminent ensemble la dimension fractale selon la formule suivante (Mandelbrot, 1983) :

$$D = -\frac{\log N_{emp}}{\log r}$$

Si nous interprétons les éléments « noirs » comme des bâtiments, la procédure présentée rappelle le passage d'une représentation cartographique simplifiée au 1 : 500 000, où tous les détails sont gommés à l'intérieur d'une agglomération, à une représentation fine qui se rapproche de celle d'un plan cadastral. En divisant le nombre de cellules bâties par la surface totale du carré initial qui contient l'objet fractal, nous obtenons la densité. Cette densité change en passant d'une étape de découpage i à la suivante $i+1$, car dans chacune des mailles bâties nous découvrons de nouvelles cellules vides dont la taille devient à chaque étape de plus en plus petite. On vérifie que, pour une dimension fractale donnée, la baisse de la densité constatée à l'étape de découpage i , ρ_i , est liée à celle de l'étape suivante ρ_{i+1} par la relation suivante (Batty et Kim, 1992 ; Thomas *et al.*, 2007) :

$$\frac{\rho_{i+1}}{\rho_i} = \left(\frac{1}{9}\right) N = \left(\frac{1}{3}\right)^{(2-D)}$$

où nous avons tenu compte du facteur de découpage fixé à $r = 1/3$.

On constate donc qu'à chaque étape, la densité du bâti est réduite d'un facteur qui correspond à la part de la surface bâtie dans chaque maille, à une étape donnée i . Ainsi en changeant le découpage, on obtient des informations de plus en plus détaillées, et la densité varie à chaque étape. Ceci traduit le fait que la surface occupée est répartie de façon très inégale dans une fractale : elle forme des agrégats à chaque échelle. Cette information est transcrite par la dimension fractale qui peut donc être interprétée comme un « coefficient multi-échelle d'emprise au sol » ou un « indice trans-échelle de concentration du bâti ».

Pour toute application, nous fixons le facteur de réduction du maillage à $r = 1/3$. En effet, avec $r = 1/2$, les possibilités de variations quant à l'arrangement spatial des cellules bâties dans une maille sont restreintes. Inversement, avec un $r = 1/4$ ou moins, c'est le nombre de niveaux d'analyse qui est réduit. Nous indiquons ici quelques valeurs de dimensions fractales qui correspondent au nombre indiqué de cellules occupées N (Tableau 1).

La dernière colonne du tableau montre que la baisse de la densité est moins importante si la dimension fractale est plus élevée. En effet, plus la dimension fractale est élevée, plus la surface occupée est répar-

Tableau 1

Dimension fractale, nombre de cellules occupées et baisse de densité

Dimension fractale D	Nombre N de cellules occupées à chaque échelle	$\frac{\rho_{n+1}}{\rho_n}$
1.26	4	0.44
1.46	5	0.55
1.63	6	0.67
1.77	7	0.78

tie de façon uniforme. La taille des espaces vides varie alors moins, et l'effet de concentration se fait moins ressentir en passant d'une étape à la suivante. Rappelons qu'une répartition entièrement homogène du bâti correspondrait à la valeur $D = 2$.

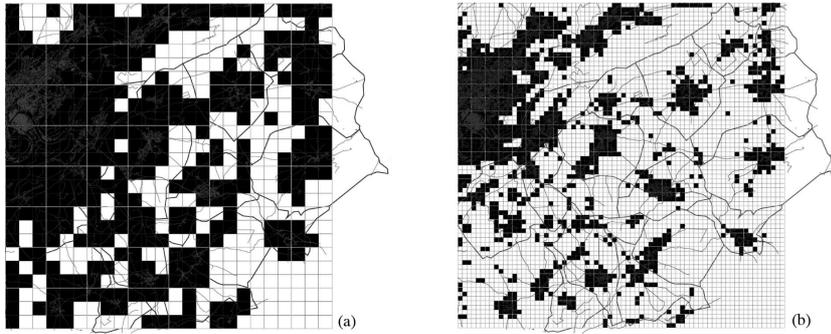
L'application du principe d'urbanisation fractale dans une visée prospective suppose de choisir une valeur de dimension fractale à atteindre dans le futur. Pour ce faire, la première étape consiste à effectuer une analyse du tissu bâti existant en vue d'en déterminer la dimension fractale actuelle. Ceci peut être fait en recourant à la décomposition fractale. Nous comptons alors pour chaque étape de décomposition fractale (c'est-à-dire pour chaque taille de maille), le nombre de cellules occupées par maille (Figure 5). La moyenne géométrique³ de ces nombres donne une mesure de la dimension fractale du tissu réel :

Nous décrivons maintenant la méthodologie qui permet d'élaborer des scénarios d'urbanisation à partir du concept présenté précédemment. Nous fixons d'abord la dimension fractale D_{norm} à atteindre dans le futur qui peut être soit la dimension fractale actuelle, soit une autre valeur. Le choix de la dimension fractale contraindra le choix des lieux pour lesquels une urbanisation sera envisageable. Notre base de travail est celle de la décomposition fractale et nous choisissons une des valeurs du Tableau 1 qui associe à chacune des valeurs de dimensions fractales à atteindre dans le futur D_{norm} un nombre N_{norm} qui nous servira de référence pour les scénarios de développement. Après avoir couvert la zone d'étude par des mailles composées de 9 cellules (Figure 5a), nous comptons pour chacune des mailles le nombre de cellules N_{emp} qui contiennent du bâti et nous vérifions si ce nombre est

3. La moyenne géométrique est un opérateur multiplicatif en accord avec la logique également multiplicative des fractales.

Figure 5

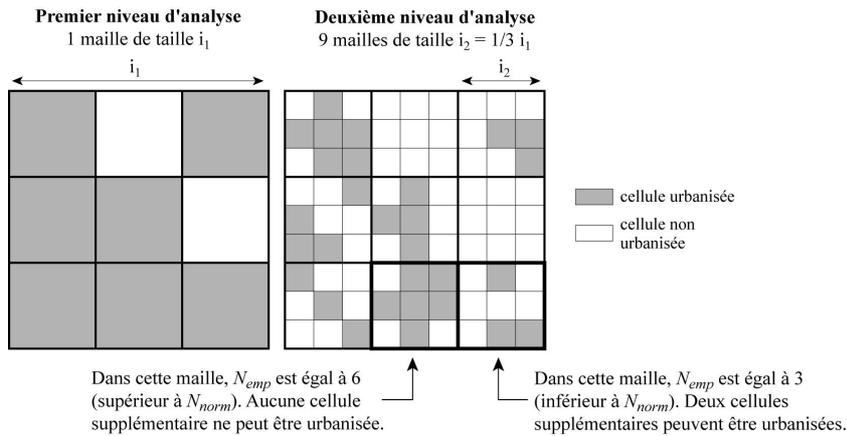
Les deux premières étapes de décomposition fractale du secteur de Saône :
 (a) couverture par des mailles de 440 mètres ;
 (b) décomposition en mailles de 147 mètres



Source : Frankhauser *et al.* (2008)

Figure 6

Exemple d'application de la règle fractale d'urbanisation avec $N_{norm} = 5$



supérieur, égal ou inférieur à notre norme N_{norm} (Figure 6). Si le nombre N_{emp} est égal ou supérieur à N_{norm} , l'urbanisation a atteint ou déjà dépassé la limite donnée par la dimension fractale. En revanche si N_{emp} est inférieur à N_{norm} , nous choisissons $N_{norm} - N_{emp}$ cellules que nous ouvrons à une urbanisation future (Figure 6). Ainsi conformément à notre norme fractale, N_{norm} cellules seront urbanisées. Pour l'étape suivante, chaque cellule urbanisée devient une maille d'un découpage plus fin où chaque maille contient de nouveau neuf cellules d'un tiers de longueur et nous répétons la procédure décrite. Souli-

gnons que les cellules non constructibles à une étape de décomposition, ne deviendront jamais constructibles lors des étapes suivantes.

Il est évident qu'il existe à chaque étape de décomposition une multitude de choix possibles de cellules qui se prêtent à une urbanisation potentielle. Ceci sera encore le cas après avoir pris en compte d'autres critères tels que l'accessibilité aux services, que nous introduisons plus loin.

Le concept proposé donne donc suffisamment de marges de manœuvre aux décideurs tout en respectant la structure bâtie telle qu'elle s'est développée. Il ne s'agit pas de transformer brutalement la situation donnée, mais de canaliser le développement futur. La méthode proposée s'affranchit cependant de la vision du zonage qui nous paraît trop étroite dans un contexte d'urbanisation qui affecte des zones plus larges. L'adoption d'une approche transversale aux échelles permet de créer des scénarios de développement résidentiel à l'échelle d'une agglomération ou d'une partie d'une agglomération. La Figure 7 montre un développement résidentiel possible, considérant deux étapes de décomposition, pour une partie de la zone représentée sur la Figure 5.

2.3. L'articulation du bâti et des espaces ouverts

Dans l'objectif d'éviter le morcellement du bâti et des zones non bâties, mais aussi de renforcer l'articulation entre bâti et non-bâti, la seule prise en compte du nombre de cellules occupées n'est pas suffisante. C'est pourquoi nous introduisons des contraintes supplémentaires concernant la contiguïté du bâti et non-bâti :

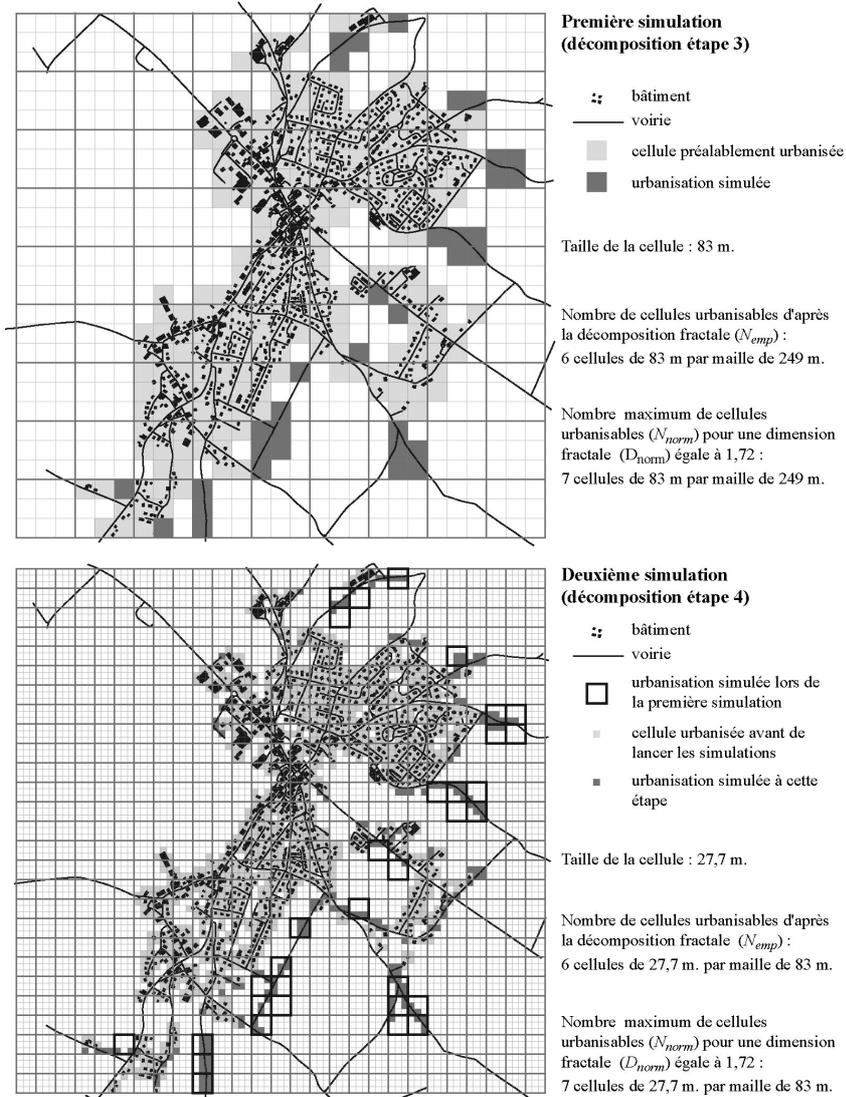
- dans le but d'éviter un morcellement du bâti, la cellule considérée doit être voisine d'une maille déjà construite ou constructible ;
- dans le but d'éviter une fragmentation du non-bâti, la même règle s'applique aux cellules non-construites ou non-constructibles ;
- une cellule construite ou constructible doit être voisine d'une maille non construite afin d'assurer un accès au paysage ouvert ;
- afin d'assurer l'accès direct du bâti au paysage ouvert, il n'est pas possible de convertir une cellule non-bâtie en cellule bâtie si elle obstrue l'accès au paysage des mailles voisines déjà bâties ;
- dans le but de minimiser la construction de nouvelles routes, la maille doit être traversée ou à proximité d'une voie de communication.

2.4. Une approche multi-échelle de l'accessibilité

Outre l'articulation du bâti et du non-bâti, l'accessibilité aux différents types d'aménités offertes aux résidents, l'identification des

Figure 7

Application du principe d'aménagement fractal à une partie de la zone représentée sur la Figure 5



Source : Frankhauser *et al.* (2007b)

endroits mal desservis et les potentialités de développement sont des enjeux importants dans le contexte donné. En effet, un objectif principal est de proposer des scénarios d'aménagement qui permettent une réduction de la longueur totale des déplacements. Nous distinguons donc différents types d'aménités « urbaines » (commerces et services)

en tenant compte de leur fréquence de recours par les résidents. Citons comme exemple les résultats de l'enquête précédemment citée, réalisée par le Département Stratégies d'Opinion / Société de l'institut d'études marketing et d'opinion TNS Sofres (Gault et Bedeau, 2007), qui a montré que les ménages souhaitent avoir accès à une crèche et à l'école, à un médecin, à un supermarché et un espace vert à moins d'un kilomètre de leur domicile, tandis qu'ils acceptent une distance de moins de dix kilomètres pour accéder à leur lieu de travail, à un café, une piscine, un hôpital, divers commerces, et une grande surface, une gare, etc.

Pour une ville de taille moyenne comme Besançon, nous avons ainsi distingué trois niveaux de commerces et services :

– Niveau 1 (recours quotidien ou pluri-hebdomadaire) : boulangeries, tabac/journaux, écoles et crèches, boucheries-charcuteries-traiteurs, commerces alimentaires (supermarchés, hypermarchés, et, éventuellement, supérettes pour les populations captives, surtout en milieu urbain). Pour les services et commerces de ce niveau nous supposons qu'un accès à pied à partir du domicile est souhaitable. La portée maximale considérée est fixée à 400 m (Wiel *et al.*, 1997).

– Niveau 2 (recours hebdomadaire) : marché, réparation automobile, vente de carburant, cafés, hypermarchés (deux niveaux de fréquence de recours), épicerie-supérette, bibliothèque-médiathèque, ou lieu de fréquentation contrainte assez régulière : postes, pharmacies, médecins généralistes (on ne s'y rend pas forcément toutes les semaines, mais quand on doit s'y rendre, tout le monde doit y avoir accès assez facilement). Comme la littérature donne peu d'indication au sujet des distances préconisées, nous suggérons d'identifier pour chaque commerce/service les bâtiments qui sont plus proches de ce commerce ou service que des autres établissements du même type, ce qui correspond à une aire de chalandise théorique. On détermine ensuite la distance maximale qui existe entre l'établissement considéré et les différents bâtiments de son aire de chalandise théorique. Ceci permet d'identifier la portée maximale de la distance à parcourir pour accéder à un service/commerce d'un certain type avec un véhicule motorisé.

– Niveau 3 (recours mensuel et plus rare) : coiffeurs, petites, moyennes et grandes surfaces spécialisées, banques et assurances, restaurants, bars spécialisés ou thématiques, cinémas, théâtres, patinoires. Sont aussi affectés à ce niveau des lieux de fréquentation contrainte plus épisodique tels que les mairies, préfectures, impôts, hôpitaux, médecins spécialistes, laboratoires d'analyse médicale, halls d'exposition, magasins spécialisés, services et administrations de fréquentation rare, à destination d'un grand nombre de personnes. Comme le développement de nouveaux centres paraît peu probable

pour le niveau 3, les distances associées à ce niveau conditionnent de façon essentielle le développement futur potentiel d'une commune. En effet une urbanisation trop lointaine d'un centre du niveau 3 ne paraît pas souhaitable. Des critères précis concernant cette distance n'ont pas encore été mis en place.

En ce qui concerne l'accessibilité aux espaces verts et naturels deux critères sont pris en compte :

- le nombre de parcelles situées en bordure de l'agglomération ce qui introduit l'idée du téragone (Figure 3) ;
- différents types d'espaces verts et naturels de loisir selon leur taille, leur fréquence de recours (espaces verts de proximité, parcs, massifs forestiers, etc.) et leur accessibilité via le réseau de transport (Tannier *et al.*, 2006).

2.5. L'approche multi-échelle du développement démographique

Conformément au système spatial proposé, qui s'appuie sur l'existence d'une organisation hiérarchique du système de villes proche de la logique proposée par W. Christaller (1933), la taille des communes et donc leur potentiel de développement devrait correspondre au niveau de service qui leur est affecté. W. Christaller indique en effet une relation approximative entre la taille des villes et leur niveau de service (Tableau 2).

Tableau 2

Niveaux urbains et population approximative chez Christaller – Relation entre population et nombre de centres

Niveau de ville	Population	Nombre
P	100 000	1
G	30 000	3
B	10 000	9
K	4 000	27
A	2 000	81
M	1 000	243

Comme le montre le graphique de droite, la hiérarchie christallienne se traduit par une relation presque linéaire décroissante entre le nombre de centres de différents niveaux et leur population, dans une représentation bi-logarithmique. Une telle distribution correspond à une loi de puissance bien connue en géographie urbaine. En effet, en classant les villes en ordre décroissant selon leur population, on obtient

Tableau 3
Niveaux urbains dans la planification en Allemagne

	Schéma d'aménagement	Population approximative
<i>Oberzentren</i> (centres supérieurs)	<i>Landesentwicklungsplan</i> (région)	supérieure à 100 000
<i>Mittelzentren</i> (centres intermédiaires)	<i>Landesentwicklungsplan</i> (région)	20 000 à 100 000
<i>Unterszentren</i> (centres inférieurs)	<i>Regionaleentwicklungsplan</i> (Aire urbaine/communauté d'agglomération)	10 000 à 20 000
<i>Kleinzentren</i> (centre bourg)	<i>Regionaleentwicklungsplan</i> (Aire urbaine/communauté d'agglomération)	5 000 à 10 000

Source : Timo Cyriax (1999)

pour les pays développés une telle distribution qui est l'expression d'une organisation hiérarchique des systèmes de villes (Pumain, 1981). Une hiérarchie comparable caractérise les structures fractales (voir par exemple dans le schéma multifractal de la Figure 2, la relation entre le nombre de centres urbains et leur taille et niveau de service associés).

En se référant à W. Christaller, l'Allemagne, la Suisse et l'Autriche ont introduit dans le droit de l'aménagement une hiérarchie de centres dont les fonctions et la taille sont définies (cf. Tableau 3). Il est évident que le contexte local (agglomération, zone rurale, etc.) influence ces chiffres.

En France, peu de travaux ou d'analyses empiriques ont étudié la relation entre la fonction et la taille des villes. Par ailleurs, les réglementations d'aménagement ne contiennent pas de préconisation explicite sur ce sujet. Citons toutefois les travaux de M. Rochefort (1960) et de P. Durey (1987) qui ont étudié les fonctions des villes à une échelle régionale. Ces travaux confirment l'existence d'une relation approximative entre les niveaux de services et les effectifs de population. La situation spécifique de chacune des études – par exemple, un contexte très rural dans le cas de P. Durey – ne permet pas d'en tirer de conclusions d'ordre général. Il paraîtrait d'ailleurs plus raisonnable de définir un rapport de population entre les niveaux de villes qui se suivent dans la hiérarchie urbaine plutôt que des chiffres absolus.

3. L'OUTIL DE SIMULATION MUP-CITY (MULTI-SCALE URBAN PLANNING FOR A SUSTAINABLE CITY)

MUP-City 0.3 est une application informatique consacrée à l'identification de lieux où une urbanisation serait possible suivant un prin-

cipe d'urbanisation fractale (Tannier *et al.*, 2010). Cette application ne prend en compte qu'une partie des normes et principes d'aménagement évoqués précédemment. En partant d'un tissu urbain existant, MUP-City 0.3 permet de simuler différents scénarios fractals de développement résidentiel pour les espaces périurbains des grandes villes françaises de taille comprise entre 100 000 et 1 000 000 d'habitants. Seule l'accessibilité à des aménités locales est considérée : accessibilité locale aux commerces et services de fréquentation quotidienne ou hebdomadaire ; proximité directe des espaces bâtis et non bâtis. Conçu sur la base du concept fractal présenté en sections 1 et 2, MUP-City permet de relever un des défis en modélisation urbaine qui est de mieux prendre en compte les caractéristiques multi-échelles des systèmes d'occupation du sol (Verburg *et al.*, 2004).

3.1. Principes généraux du modèle

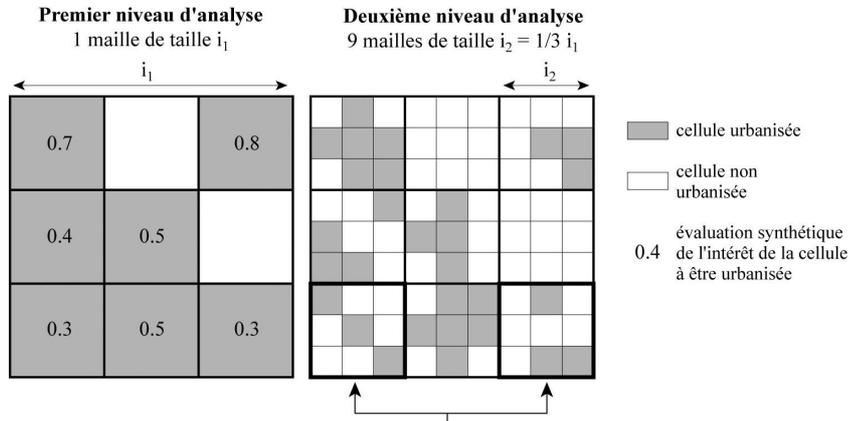
MUP-City 0.3 est basé sur une modélisation multi-échelle qui permet l'application d'une règle fractale d'urbanisation. Quatre autres règles introduisent des contraintes d'accessibilité aux commerces et services, aux espaces ouverts, et une contrainte de proximité au réseau routier existant (Figure 8). Ces quatre règles sont additionnelles ; elles servent à préciser les résultats de la modélisation fractale multi-échelle.

Figure 8

Règles d'accessibilité dans MUP-City 0.3

Intitulé de la règle	Objectifs à atteindre
Règle 1 Assurer une bonne accessibilité aux espaces ouverts tout en préservant leur connectivité	→ La cellule évaluée doit être contiguë à une cellule bâtie. L'urbanisation de la cellule évaluée ne doit pas amputer l'accès à l'espace ouvert des cellules urbanisées environnantes
Règle 2 Assurer une bonne accessibilité aux centres de commerces et services de fréquentation quotidienne	→ La cellule évaluée doit être suffisamment proche d'un centre de commerces et services de fréquentation quotidienne attractif
Règle 3 Assurer une bonne accessibilité aux centres de commerces et services de fréquentation hebdomadaire	→ La cellule évaluée doit être suffisamment proche d'un centre de commerces et services de fréquentation hebdomadaire attractif
Règle 4 Proximité du réseau routier existant	→ La cellule évaluée doit être traversée par ou proche d'un axe routier

Figure 9

Variante « stricte » de la règle fractale d'urbanisation avec $N_{norm} = 5$ 

Dans ces deux mailles, aucune nouvelle cellule ne peut être urbanisée.
 En effet, au premier niveau d'analyse N_{emp} est supérieur à N_{norm}
 et ces deux mailles sont caractérisées par les plus mauvaises valeurs d'évaluation.

La zone d'étude fait d'abord l'objet d'une décomposition fractale (Figure 5) basée sur facteur de découpage $r = 1/3$. Puis l'utilisateur fixe une dimension fractale à atteindre D_{norm} , qui correspond à un nombre maximal N_{norm} de cellules pouvant être urbanisées dans chaque maille (Figure 6). N_{norm} peut varier d'un scénario d'urbanisation à un autre. En revanche, pour un même scénario, il est constant quel que soit le niveau d'analyse considéré. Suite à l'application de la règle fractale d'urbanisation, on connaît le nombre de cellules pouvant être urbanisées dans chaque maille. Les quatre règles d'accessibilité additionnelles (Figure 8) permettent de choisir les cellules à urbaniser parmi les cellules potentiellement urbanisables.

Les règles d'accessibilité sont formalisées dans MUP-City 0.3 au moyen de variables floues (Tannier *et al.*, 2010). L'agrégation des valeurs des différentes variables floues permet d'obtenir une valeur d'évaluation synthétique, comprise entre 0 et 1, caractérisant chaque cellule potentiellement urbanisable. Parmi celles-ci, les cellules caractérisées par les valeurs d'évaluation les plus élevées sont urbanisées. En cas d'*ex-aequo*, la sélection est opérée de manière aléatoire.

MUP-City permet de développer des scénarios selon deux variantes : « basique » (Figure 6) et « stricte » (Figure 9). Avec la variante « stricte », le nombre N_{norm} ne peut être dépassé pour une urbanisation future. Ainsi, si dans une maille le nombre de cellules urbanisées N_{emp} est supérieur à N_{norm} , les $N_{emp} - N_{norm}$ cellules les moins bien évaluées ne seront plus urbanisables lors des étapes de décomposition

suivantes. La variante « basique » admet, elle, qu'une urbanisation est possible pour l'ensemble des cellules déjà urbanisées, quelle que soit l'étape de décomposition, en respectant évidemment la limite N_{norm} pour les étapes suivantes.

Avec MUP-City, il est également possible de développer des scénarios d'urbanisation non-fractals en travaillant uniquement à l'étape de décomposition la plus fine et en appliquant simplement les règles d'accessibilité précisées dans la Figure 8.

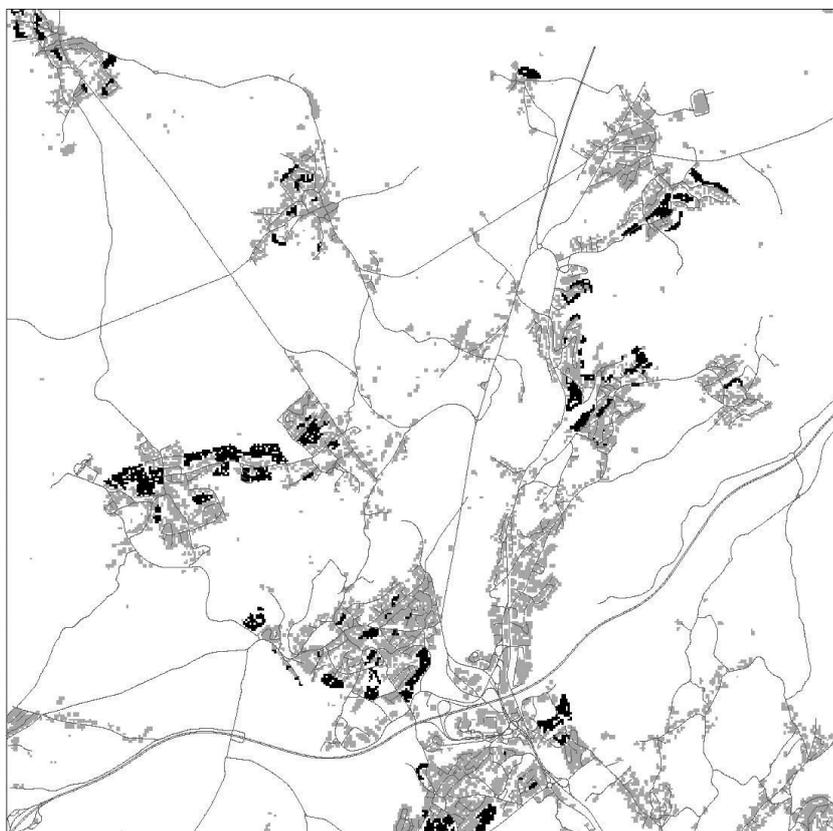
Au final, l'application fournit une cartographie « raster » des cellules intéressantes à urbaniser pour le scénario considéré. Un scénario se définit par (i) une valeur de N_{norm} (en général comprise entre 4 et 7 car la dimension fractale d'un tissu ne devrait pas dépasser 1,8 pour maintenir une certaine hiérarchie des espaces vides (Frankhauser, 2004 ; cf. Tableau 1), (ii) une taille de cellule à la dernière étape de décomposition (en général comprise entre 50 et 20 m), (iii) le positionnement de la grille de décomposition et (iv) l'activation ou non de chacune des règles additionnelles d'accessibilité. La création de scénarios peut aussi intégrer une ou plusieurs modifications de la configuration spatiale initiale du tissu urbain (création d'un nouvel axe de transport, modification de l'armature commerciale, etc.).

3.2. Utilisation expérimentale de MUP-City sur le secteur Nord de l'agglomération de Besançon

Le point de départ de l'expérimentation a consisté en un projet de développement urbain du secteur proposé par l'Agence d'urbanisme de l'agglomération de Besançon (AUDAB) et accepté par les maires des 10 communes concernées. Ce projet définissait des règles pour l'urbanisation future : 17 logements par hectare et une taille de parcelle comprise entre 500 et 600 m². Le nombre de logements à construire par commune était également fixé, et le projet spatialisé sous la forme d'un plan d'aménagement identifiant les zones dans lesquelles l'urbanisation serait possible. Sur cette base, l'AUDAB, nous a demandé de concevoir des scénarios de développement alternatifs répondant aux objectifs du projet.

Nous avons d'abord créé un scénario d'urbanisation qui représente une réalisation possible du projet d'aménagement de l'AUDAB. Concrètement, à partir de la carte du tissu urbain existant, environ 1 300 nouveaux bâtiments ont été cartographiés en respectant les règles et la spatialisation du projet de l'AUDAB. Cette représentation cartographique vectorielle a ensuite été convertie en

Figure 10
**Une spatialisation possible du projet de développement résidentiel
 de l'AUDAB**



Secteur Nord de l'agglomération de Besançon - Taille de la cellule : 20 m

■ 14 928 cellules antérieurement urbanisées

Réalisation : V. Paillot

■ 2 353 cellules intéressantes à urbaniser

mode raster⁴ pour pouvoir la comparer avec des scénarios issus de MUP-City (Figure 10). La carte raster comprend 2 353 cellules nouvellement urbanisées.

Dans un deuxième temps, nous avons créé quatre scénarios d'urbanisation alternatifs qui répondent aux objectifs du projet sans forcément correspondre à la spatialisation proposée par l'AUDAB. Le nombre de logements par commune fixé par l'AUDAB n'a pas non

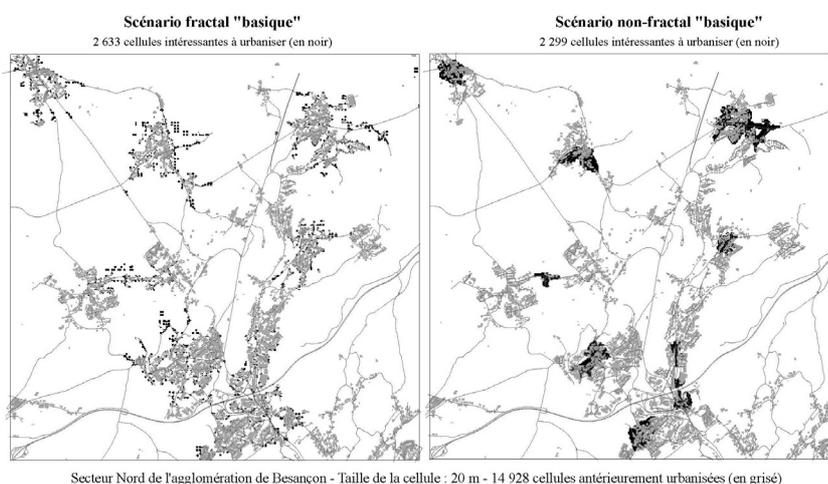
4. Il s'agit du passage d'une représentation cartographique en mode « point par point » donc une discrétisation de l'image.

plus été respecté. Deux des quatre scénarios ont été réalisés à partir de la version multi-échelle de MUP-City, dont un en version « basique » et un en version « stricte », la dimension fractale étant fixée à $D_{norm} = 1,26$ ce qui correspond à $N_{norm} = 4$. Dans les deux cas, les quatre règles additionnelles d'accessibilité ont été activées. Nous avons ainsi obtenu deux scénarios fractals de développement résidentiel comportant 7 765 cellules nouvellement urbanisées pour la version « basique » et 5 474 nouvelles cellules bâties pour la version « stricte ». Ces nombres étaient largement supérieurs au nombre de cellules nouvellement urbanisées correspondant à la spatialisation du scénario de l'AUDAB (2 353). Nous avons donc supprimé certaines cellules dans chacun des scénarios fractals via l'introduction *a posteriori* de nouvelles contraintes d'accessibilité. Pour le scénario fractal « basique », nous n'avons conservé que les cellules nouvellement bâties situées à moins de 1 000 mètres d'un centre de commerces et services de fréquentation quotidienne, et à moins de 1 500 mètres d'un centre de commerces et services de fréquentation hebdomadaire. Ceci a ramené le nombre de cellules nouvellement urbanisées à 2 633. Pour le scénario fractal « strict », nous avons conservé les cellules nouvellement bâties situées à moins de 1 400 mètres d'un centre de commerces et services de fréquentation quotidienne, et à moins de 1 420 mètres d'un centre de commerces et services de fréquentation hebdomadaire ; ainsi le nombre de cellules nouvellement urbanisées était de 2 352. Le nombre de cellules retenues pour l'urbanisation est donc dans les deux cas très proche de celui du scénario de la Figure 10 qui se réfère aux préconisations de l'AUDAB.

Les deux autres scénarios ont également été développés avec MUP-City, mais cette fois-ci en version mono-échelle, donc sans activer la règle d'urbanisation fractale. Une première simulation correspond à la version « basique » en fixant le nombre de cellules nouvellement urbanisées à 2 633, tandis que la deuxième simulation est l'équivalent de la version « stricte » car nous avons limité le nombre de cellules à urbaniser à 2 352.

La confrontation visuelle de trois des cinq scénarios créés montre que les formes de développement urbain obtenues sont très différentes (Figures 10 et 11). Le scénario non-fractal « basique » se caractérise par des formes complètement compactes et un développement résidentiel concentré en très peu de lieux. Le scénario correspondant à la spatialisation du projet de l'AUDAB présente des formes de développement moins compactes, et réparties en davantage de lieux. Les zones de contact entre secteurs bâtis et non bâtis sont très nettement dessinées et très rectilignes. Enfin le scénario fractal « basique » présente

Figure 11
Deux scénarios alternatifs générés avec MUP-City 0.3



des formes de développement plus dispersées tout en restant assez proches des noyaux bâtis existants. Des cellules nouvellement urbanisées se localisent également dans les tissus centraux des villages. Le contact entre zones bâties et non bâties est plus flou. Les cinq scénarios ont été évalués en terme d'accessibilité aux commerces et services et aux espaces non bâtis, sur la base de trois simples critères d'évaluation (Tableau 4).

Tableau 4
Performances comparées des différents scénarios en termes d'accessibilité aux aménités urbaines et rurales

Intitulé du scénario	Distance moyenne au commerce et service le plus proche		Nombre de cellules bâties contiguës à au moins une cellule non bâtie
	Fréquentation quotidienne	Fréquentation hebdomadaire	
Spatialisation AUDAB	- 4.2	- 4.3	14.2
Fractal « basique »	- 6.4	- 3.9	18.7
Fractal « strict »	- 3.9	- 2.7	16.7
Non-fractal « basique »	-11.3	- 8.8	- 3.8
Non-fractal « strict »	-11.0	-10.4	- 3.9

Taux de variation entre situation initiale et urbanisation simulée (en %). Sont représentés en gras les scénarios présentant un gain d'accessibilité aux espaces ouverts et aux centres de commerces et services par rapport à la situation actuelle.

Quel que soit le scénario d'urbanisation considéré, la distance moyenne au commerce et service le plus proche, calculée sur le réseau, diminue. Ceci indique que les cellules nouvellement urbanisées sont localisées à proximité des commerces et services existants. D'un point de vue global, les deux scénarios fractals et la spatialisation du projet de l'AUDAB permettent une amélioration de l'accessibilité aux aménités urbaines et rurales. L'amélioration paraît légèrement supérieure aux autres dans le cas du scénario fractal « basique ». Les deux scénarios non fractals améliorent eux davantage l'accessibilité aux commerces et services, mais de nombreuses cellules bâties se retrouvent privées d'un contact direct avec une cellule non bâtie.

La localisation des cellules nouvellement urbanisées dans les quatre scénarios fractals et non-fractals dépend en partie des seuils de distance aux commerces et services introduits *a posteriori*. Cependant, des analyses ont montrées qu'on n'observe pas de relation entre les valeurs des seuils fixés au préalable et la qualité de l'accessibilité aux commerces et services telle qu'elle figure dans le tableau 5. Par exemple, dans le cas des scénarios fractals, le seuil de distance aux commerces et services de fréquentation quotidienne est plus élevé pour le scénario « strict » (1 400 m) que « basique » (1 000 m). La distance moyenne d'une cellule bâtie au commerce et service le plus proche est également plus élevée pour le scénario « strict » (797 m) que pour le scénario « basique » (636 m). Inversement, le seuil de distance aux commerces et services de fréquentation hebdomadaire est légèrement plus élevé pour le scénario fractal « basique » (1 500 m) que pour le scénario « strict » (1 420 m). Or le premier scénario présente une distance moyenne de chaque cellule bâtie au commerce et service le plus proche inférieure à celle mesurée pour le deuxième scénario (710 m contre 769 m).

Finalement, cette expérimentation menée sur le secteur Nord de l'agglomération de Besançon suggère qu'une urbanisation fractale peut représenter une alternative intéressante à une urbanisation plus classique, proposant habituellement des formes assez compactes caractérisées par une limite nette et plutôt rectiligne du tissu urbanisé. Des explorations plus poussées doivent maintenant être menées, comparant davantage de scénarios (fractals et non fractals) sur la base de plusieurs critères d'évaluation de l'accessibilité à des aménités variées, tant urbaines que rurales.

4. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Le concept d'aménagement proposé introduit une approche qui articule les différentes échelles présentes dans une grande aggloméra-

tion. Il rapproche les zones résidentielles des lieux où sont localisés les services et commerces et conserve des coulées vertes à proximité des zones habitées. Le recours à un principe d'emboîtement d'échelles propre à la géométrie fractale permet en outre d'introduire une organisation hiérarchique des centres de services et des commerces qui tient compte de leur fréquentation. Le même principe hiérarchique rend possible la conservation d'un système connexe d'espaces naturels de tailles variées.

La méthodologie mise en place s'affranchit ainsi du zonage habituel et considère les espaces dans leur ensemble en se focalisant sur l'accessibilité à divers types d'aménités fréquentées par les résidents afin de garantir une bonne qualité de vie et de respecter leurs souhaits. La réduction des distances d'accès aux différents lieux fréquentés par les résidents et la conservation d'un système contigu et diversifié d'espaces naturels contribue directement à réduire les impacts négatifs de la périurbanisation sur l'environnement.

Un progiciel, MUP-City, permet non seulement de développer des scénarios, mais aussi d'évaluer leur pertinence par rapport aux objectifs introduits. Sa version interactive, dont un premier prototype est en essai, devrait déboucher sur un véritable outil d'aide à disposition des aménageurs et des acteurs politiques.

Toutefois, plusieurs questions sont encore à approfondir ou à intégrer. La première est l'analyse des différentes fonctions paysagères des zones non-urbanisées et de leur organisation spatiale, ainsi que l'importance croissante d'une agriculture périurbaine. Il paraît également important de prendre en compte de façon plus détaillée les distances acceptables pour accéder aux services et commerces des niveaux supérieurs, notamment à partir de l'utilisation des systèmes de transport en commun. Ceci permettra d'intégrer les gares, haltes ferroviaires et autres arrêts de transport en commun dans les scénarios de développement urbain. Enfin, des réflexions complémentaires restent à mener sur la taille des communes par rapport à leur fonction dans la hiérarchie urbaine.

Références bibliographiques

- Amerigo, M., Aragonés, J.I., 1997, Residential satisfaction in council housing, *Journal of Environmental Psychology*, 10, pp. 313-325.
- Arlinghaus S., 1985, Fractals take a central place, *Geografiska Annaler*, 67, 2, pp. 83-88.
- Batty M., Kim S., 1992, Form follows function : reformulating urban population density functions, *Urban Studies*, 29, pp. 1043-1070.
- Batty M., Longley P., 1994, *Fractal cities : a geometry of form and function*, Academic Press.

- Bolitzer B., Netusil N. R., 2000, The impact of open spaces on property values in Portland, Oregon, *Journal of Environmental Management*, 59, pp. 185-193.
- Beaucire F., Rosales-Montano S., Duflos E., Turchetti I., 1999, *Les outils de planification urbaine au service de la relation urbanisme/transport : approche dans la perspective du développement durable*, Rapport de recherche, PREDIT, 20 p.
- Brun J., Fagnani J., 1994, Lifestyles and locational choices – trade-offs and compromises : a case-study of middle-class couples living in the Ile-de-France region, *Urban Studies*, 31, 6, pp. 921-934.
- Breheny M. J., 1997, Urban compaction : feasible and acceptable ? , *Cities*, 14, pp. 209-217.
- Camagni R., Gibelli M. C. (éd.), 1997, *Développement urbain durable : quatre métropoles européennes*, Éd. de l'Aube.
- Cavailhès J., Frankhauser P., Peeters D., Thomas I., 2004, Where Alonso meets Sierpinski : an urban economic model of fractal metropolitan area, *Environment and Planning A*, 36, pp. 1471-1498.
- Cavailhès J., Frankhauser P., Peeters D., Thomas I., 2009, Residential equilibrium in a multifractal metropolitan area, *The Annals of Regional Science*, 21, 7, pp. 1-24.
- Christaller W., 1933, Die zentralen Orte in Süddeutschland, G. Fischer, Reproduktion par la Wissenschaftliche Buchgesellschaft, 1980.
- Dantzig G., Saaty T., 1973, *Compact city : a plan for a liveable urban environment*, Freeman.
- McDowell L., 1997, The new service class : housing, consumption and lifestyle among London bankers in the 1990s, *Environment and Planning A*, 29, pp. 2061-2078.
- Dupuy G., 2002, « Cities and automobile dependence » revisité : les contrariétés de la densité, *Revue d'Economie Régionale et Urbaine*, I, pp. 141-156.
- Durey P., 1988, La centralité dans le département du Cher d'après l'inventaire communal, *L'Espace géographique*, XVII, pp. 55-67.
- Fouchier V., 1995, La densification : une comparaison internationale entre politiques contrastées, *Les Annales de la Recherche Urbaine*, 67, pp. 95-108.
- Frankhauser P., 1994, *La fractalité des structures urbaines*, Anthropos.
- Frankhauser P., 2004, Comparing the morphology of urban patterns in Europe : a fractal approach. In : Borsdorf A., Zembri P. (Ed.), 2004, *European cities structures insights on outskirts : structures*, COST Action C10, pp. 93-103.
- Frankhauser P., Genre-Grandpierre C., 1998, La géométrie fractale, un nouvel outil d'analyse et de réflexion pour l'investigation des réseaux de transport, *Cahiers Scientifiques du Transport*, 33, pp. 41-78.
- Frankhauser P. (dir.), Houot H., Tannier C., Vuidel G., 2007a, *Vers des déplacements péri-urbains plus durables : propositions de modèles fractals opérationnels d'urbanisation*, Rapport de recherche, PREDIT, 114 p.
- Frankhauser P., Tannier C., Vuidel G., Houot H., 2007b, Approche fractale de l'urbanisation. Méthodes d'analyse d'accessibilité et simulations multi-échelles, *Proceedings of the 11th World Conference on Transportation Research*, Berkeley, USA.
- Frankhauser P., Tannier C., Vuidel G., Houot H., 2008, Une approche multi-échelle de l'accessibilité pour maîtriser l'étalement urbain, *Actes en ligne du Colloque mobil.TUM*, Munich, Allemagne, 19 p.

- Garcia D., Riera P., 2003, Expansion versus density in Barcelona : a valuation exercise, *Urban Studies*, 40, 10, pp. 1925-1936.
- Gault G., Bedeau L. (dir.), 2007, *Les Français et leur habitat. Perception de la densité et des formes d'habitat*, TNS Sofres, Département Stratégies d'Opinion / Société.
- Gordon P., Richardson H. W., 1997, Are compact cities a desirable planning goal ?, *Journal of the American Planning Association*, 63, pp. 95-106.
- Guo J., Bhat C., 2002, *Residential Location modeling : accommodating sociodemographic, school quality and accessibility effects*, Department of Civil Engineering, University of Texas, Austin.
- Isard W., 1956, *Location and space economy*, MIT Press.
- Hobden D., Laughton G., Morgan K., 2004, Green space borders – a tangible benefit ? Evidence from four neighbourhoods in Surrey, British Columbia, 1980-2001, *Land Use Policy*, 21, 2, pp. 129-137.
- Landschaftsprogramm Artenschutzprogramm 1994, Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umweltschutz-Abteilung III http://www.stadtentwicklung.berlin.de/umwelt/landschaftsplanung/lapro/download/lapro94_eri-bericht.pdf
- Lerman S. R., 1976, Location, housing, automobile ownership, and mode to work : a joint choice model, *Transportation Research Record*, 610, pp. 5-11.
- Levinson D. M., Kumar A., 1994, The rational locator : why travel times have remained stable, *Journal of the American Planning Association*, 60, pp. 319-332.
- Mandelbrot B., 1983, *The Fractal Geometry of Nature*, Freeman.
- Martinez M.L., Black M., Starr R.H., 2002, Factorial structure of the perceived neighbourhood scale (PNS) : a test of longitudinal invariance, *Journal of Community Psychology*, 30, 1, pp. 23-43.
- Mignot D., Aguilera A., Bloy D., 2004, *Permanence des formes de la métropolisation et de l'étalement urbain*. Rapport de recherche, ADEME, 114 p.
- Newman P.W.G., Kenworthy J.R., 1989, *Cities and Automobile Dependence : An International Sourcebook*, Gower, Aldershot/Brookfield.
- Newman P.W.G., Kenworthy J.R., 1992, Is there a role for physical planners ?, *Journal of the American Planning Association*, 58, pp. 353-362.
- Owens S. E., 1992, Land-use planning for energy efficiency, *Applied Energy*, 43, pp. 81-114.
- Pumain D., 1982, *La dynamique des villes*, Economica, 231 p.
- Pouyane G., 2004, Des avantages comparatifs de la ville compacte à l'interaction forme urbaine mobilité. Méthodologie, premiers résultats, *Les Cahiers Scientifiques du Transport*, 45, pp. 49-82
- Rémy J., 1994, La ville : réseau alvéolaire et mobilité spatiale. In : Pellegrino P. (ed), 1994, *Figures architecturales. Formes urbaines*, Anthropos.
- Rochefort M., 1960, *L'organisation urbaine de l'Alsace*, Thèse soutenue à l'Université de Strasbourg, Les Belles Lettres.
- Schwanen T., Dijst M., Dieleman F.M., 2004, Policies for urban form and their impact on travel : the Netherlands experience, *Urban Studies*, 41, 3, pp. 579-603.
- Shen G., 2002, Fractal dimension and fractal growth of urbanized areas, *International Journal of Geographical Information Science*, 16, 5, pp. 519-437.
- Tyrvaïnen L., Miettinen A., 2000, Property prices and urban forest amenities, *Journal of Environmental Economics and Management*, 39, pp. 205-223.

- Tannier C., Frankhauser P., Houot H., Vuidel G., 2006, Optimisation de l'accessibilité aux aménités urbaines et rurales à travers le développement de modèles fractals d'urbanisation, *XLIIe Colloque de l'ASRDLF, XIIe Colloque du GRERBAM*, Sfax, Tunisie, 19 p.
- Tannier C., Vuidel G., Frankhauser P., Houot H., 2010, Simulation fractale d'urbanisation. MUP-City, un modèle multi-échelle pour localiser de nouvelles implantations résidentielles, *Revue internationale de géomatique*, à paraître.
- Thomas I., Frankhauser P., Biernacki C., 2008, The morphology of built-up landscapes in Wallonia (Belgium) : a classification using fractal indices, *Landscape and Urban Planning*, 84, pp. 99-115.
- Thomas I., Frankhauser P., De Keersmaecker M-L., 2007, Fractal dimension versus density of built-up surfaces in the periphery of Brussels, *Papers in Regional sciences*, 86, pp. 287-308.
- Verburg P., Schot P., Dijst M., Veldkamp A., 2004, Land use change modelling : current practice and research priorities, *GeoJournal*, 61, pp. 309-324.
- Von Hoffman A., Felkner J., 2002, *The historical origins and causes of urban decentralization in the United States*. Joint Center for Housing Studies, Harvard University.
- Wiel M., Tauty S., Rollier Y., Morvan A., Le Guirriec P., Desse R.P., Barthélémy J.P., 1997, *Comportement de mobilité et évolution de l'organisation urbaine (région urbaine de Brest)*, Rapport de recherche DRAST, DTT, UTP, Plan urbain.
- Wiel M., 2002, *Agencement spatial et optimisation du temps*, Rapport de recherche, PREDIT.

CHAPITRE 11

ILOT : UN MODELE MULTI-AGENTS DE STRUCTURATION SOCIALE DE LA VILLE

Rémy Lemoy⁽¹⁾, Charles Raux⁽¹⁾
et Pablo Jensen⁽²⁾

⁽¹⁾ Laboratoire d'Economie des Transports
UMR 5593 CNRS, ENTPE, Université de Lyon
Rue Maurice Audin – 69 518 Vaulx-en-Velin Cedex
charles.raux@let.ish-lyon.cnrs.fr

⁽²⁾ Institut des Systèmes Complexes Rhône-Alpes, IXXI – ENS de Lyon
15 parvis René Descartes – 69 342 Lyon Cedex 07

Le projet ILOT (Interactions Localisations Transports) consiste à appliquer la modélisation multi-agents aux rapports entre mobilité locale et transformation des espaces dans les aires urbaines. Il vise à développer un ensemble de « briques » théoriques susceptibles de représenter de manière pertinente l'émergence de comportements collectifs en matière de localisation et de rythmes temporels d'activités. Notre originalité consiste à développer des modèles simples, pour étudier de manière rigoureuse les ingrédients de base du modèle avant de se lancer dans les simulations de grande taille. A plus long terme, ces « briques » théoriques seront le matériau de base pour élaborer des modèles appliqués, susceptibles d'être confrontés à des situations réelles.

Nous pensons que les modèles de micro-simulation de type multi-agents constituent de bonnes briques de base pour modéliser la répartition spatiale des ménages dans la ville selon les classes de revenu, expliquer notamment les phénomènes de ségrégation, en introduisant les possibilités d'usage de modes de transport différents, la préférence pour la surface et la taille des ménages. Ces modèles doivent également permettre de simuler et d'évaluer l'impact des coûts de transport sur la structuration sociale des villes, notamment à travers une pluralité de modes de transport (coûts et vitesses différents).

Nous partons de la base théorique du modèle standard de l'économie urbaine (Fujita, 1989 ; Fujita et Thisse, 2003), dans lequel la ville est monocentrique (tous les emplois et les services sont regroupés au centre-ville). D'autres hypothèses simplificatrices sont introduites pour permettre une résolution analytique du problème.

Les modèles que nous développons permettent de s'affranchir pas à pas des hypothèses simplificatrices du modèle standard, et notamment celle de la localisation centrale des emplois, pour introduire de l'hétérogénéité sociale et spatiale et faire émerger, ultérieurement, des « centres » de manière endogène comme résultat des interactions sociales entre agents : ces interactions s'exercent soit directement, soit par l'intermédiaire de la concurrence pour les logements. Ces modèles permettent également de revisiter le débat sur la structuration sociale des villes, et notamment les différences observées dans la valorisation du centre entre les villes européennes et les villes nord-américaines (Brueckner *et al.*, 1999).

1. MÉTHODOLOGIE

Ce travail a pour particularité l'utilisation d'un outil de simulation de plus en plus présent en sciences humaines et sociales : la programmation multi-agents. Cet outil permet de faire évoluer des agents économiques dans un espace de simulation défini, et, à l'aide d'interactions simples et en utilisant la puissance de calcul des ordinateurs actuels, de faire émerger des comportements collectifs peu accessibles tant par l'intuition que par le calcul analytique.

Les modèles multi-agents comprennent trois ingrédients de base : les agents, l'environnement et les règles. L'agent a des états internes (certains sont fixés, d'autres peuvent changer, comme les préférences) et des règles de comportement. L'environnement est représenté par un treillis de sites supportant des ressources, il peut aussi être un réseau de communication. C'est une entité séparée des agents, sur laquelle ces derniers agissent et avec laquelle ils interagissent. Les règles de comportement concernent les interactions « agent-agent », « agent-environnement » et « environnement-environnement ». On utilise ici le langage de programmation multi-agents NETLOGO et l'environnement de simulation du même nom.

L'étude menée part d'un modèle bien connu, le modèle standard de l'économie urbaine développé par Alonso, Muth et Mills, et exposé dans la section 3. Une littérature abondante s'y rattache, théorique mais aussi avec des applications empiriques, notamment pour étudier les facteurs qui peuvent expliquer la localisation des

ménages (Brueckner *et al.*, 1999 ; Goffette-Nagot *et al.*, 2000). Certains ont ajouté au modèle des aménités exogènes (Wu et Plantinga, 2003) pour étudier leur influence sur la localisation des ménages.

La première étape de ce travail a été de reproduire les résultats classiques du modèle d'économie urbaine. L'implémentation d'un modèle numérique nécessite sa discrétisation : les agents sont en nombre fini et agissent individuellement. C'est là un atout de la simulation multi-agents, puisque la réalité d'un système social est également faite de l'interaction d'un nombre fini d'agents, mais cela ne permet pas de reproduire exactement le modèle standard de l'économie urbaine, qui est un modèle continu. La comparaison entre les résultats des simulations et les résultats analytiques est réalisée et discutée dans la section 4.

Une fois vérifiée l'adéquation des résultats, le modèle multi-agents obtenu peut être complexifié pour étudier des phénomènes peu ou pas accessibles par le calcul analytique, ce qui est réalisé dans les sections 5 avec l'hétérogénéité sociale des agents, et 6 avec le polycentrisme et l'introduction d'aménités. La force principale de la simulation multi-agents réside dans le fait qu'on manipule aisément les états des agents, les règles de comportement ou l'environnement du modèle, ce qui permet de modéliser par exemple des effets de voisinage, de regrouper les agents qui doivent subir un traitement semblable, de suivre les comportements individuels et collectifs. De plus, les simulations se déroulent dans le temps, ce qui en fait un modèle dynamique – alors que la plupart des modèles économiques, et entre autres le modèle standard de l'économie urbaine, sont des modèles d'équilibre statique. On peut ainsi explorer l'évolution temporelle du système étudié et reproduire les grandes lignes d'une évolution temporelle réelle, ce qui constitue une des perspectives de ce travail.

2. LE MODÈLE

Nous présentons ici le modèle d'Alonso, Muth, Mills, la manière dont il est implémenté grâce au modèle multi-agents et l'exploitation des résultats de celui-ci.

2.1. Modèle standard de l'économie urbaine

Le modèle d'économie urbaine d'Alonso, Muth, Mills étudie la localisation d'agents économiques dans un espace bidimensionnel où ils sont en concurrence pour l'utilisation du sol. Ces agents subissent des coûts monétaires et temporels pour accéder à leurs emplois, les-

quels sont localisés au centre. Ils peuvent également avoir une préférence pour des aménités dans des versions plus poussées du modèle. Les agents sont des travailleurs célibataires et louent leur logement. Les propriétaires sont absents et louent au plus offrant. Pour l'occupation du sol, les agents sont également en concurrence avec une utilisation agricole du sol, qui fournit au propriétaire une rente agricole R_a , l'un des paramètres du modèle.

Ces agents ont une utilité $U=alnz+blns$, où z est un bien composite (comprenant tous les biens de consommation sauf le logement), s la surface de leur logement, a et b des paramètres de préférence pour le bien composite et la surface de logement tels que $a+b=1$ (afin de simplifier les calculs analytiques). Les agents maximisent leur utilité sous la contrainte de budget $Y=z+tx+ps$, où Y est leur salaire, t leur coût de transport par unité de distance, x la distance au centre où se trouvent les emplois et p le prix surfacique du logement qu'ils occupent.

Le modèle simulé ici est celui dit de ville fermée, où la population N de la ville est fixée par avance. Ce modèle peut être résolu pour plusieurs catégories d'agents différenciés par leur revenu. Dans les simulations, on se contentera d'une ou deux catégories d'agents. Le modèle standard de l'économie urbaine et ses résultats analytiques sont exposés de manière détaillée dans de nombreuses publications, on pourra pour plus d'informations se reporter par exemple à Fujita (1989) ou Fujita et Thisse (2003).

2.2. Mise en œuvre multi-agents

Dans la simulation multi-agents, l'espace est une grille à deux dimensions, dont chaque case peut héberger un ou plusieurs agents, ou servir en tant que parcelle agricole. Un centre d'emplois est placé au milieu de l'espace de simulation.

A l'initialisation, on fixe la population N de la ville (qui peut ou non être divisée en catégories de revenu) et on répartit les agents de manière aléatoire. Les prix sont au départ tous égaux à la rente agricole $p_0 = R_a$.

A chaque étape les agents choisissent la surface optimale à localisation et prix donnés $s = \beta \frac{Y - tx}{p}$, ce qui détermine la quantité de bien composite qu'ils consomment ainsi que leur utilité. On obtient cette expression en dérivant par rapport à la surface l'utilité des agents à localisation et prix donnés :

$$U = \alpha \ln(Y - tx - ps) + \beta \ln(s)$$

$$\frac{\partial U}{\partial s} = \frac{-\alpha p}{Y - tx - ps} + \frac{\beta}{s}$$

$$\frac{\partial U}{\partial s} = 0 \text{ si } \alpha ps = \beta(Y - tx - ps)$$

d'où l'expression de la surface optimale, avec $\alpha + \beta = 1$

2.2.1. Déménagement

Le déménagement se fait sans coût. Le déroulement de l'itération n du programme, qui permet de faire passer les variables de leur valeur à l'étape n à leur valeur à l'étape $n+1$, se fait ainsi : on choisit un agent candidat au déménagement ainsi qu'une case candidate au hasard, le prix de cette case, située à une distance x du centre, étant p_n . La surface optimale que peut choisir l'agent dans la case candidate est :

$$s = b \frac{Y - tx}{P_n}$$

ce qui permet de calculer l'utilité que l'agent obtiendrait s'il déménageait et de la comparer à son utilité actuelle.

Si l'agent candidat a un gain d'utilité $DU > 0$ à déménager dans la case candidate, il y déménage. Pour cela, il propose une enchère

$$p_{n+1} = p_n \left(1 + e^{\frac{s_{occ}}{s_{tot}} \frac{DU}{U}} \right)$$

où e est un facteur qui détermine l'amplitude de cette enchère. L'évolution des prix est d'autant plus rapide qu'il est élevé. s_{occ} est la surface occupée et s_{tot} la surface totale de la case considérée : le facteur $\frac{s_{occ}}{s_{tot}}$ rend l'enchère d'autant plus élevée que la case est occupée, donc attractive. Le premier arrivant dans une case n'enchère donc pas, il se contente de payer le prix p_n . Le prix surfacique est une variable attachée à une case : lorsqu'il augmente grâce à une enchère, il augmente pour tous les agents occupant la case. On actualise donc leur surface de logement $s = b \frac{Y - tx}{P_{n+1}}$ et leur utilité.

Un cas de figure particulier est celui où la case candidate est déjà pleine et ne permet pas l'emménagement de l'individu candidat. On l'aborde dans le paragraphe suivant.

2.2.2. Eviction et décroissances

Si la case candidate est déjà remplie, un ou plusieurs agents choisis au hasard sont évincés, jusqu'à ce que l'emménagement de l'individu candidat soit possible. Ces agents évincés sont ensuite les candidats prioritaires à l'emménagement quelque part ailleurs, et ce jusqu'à ce qu'ils aient tous été réaffectés. Leur utilité diminue pendant leur recherche d'un nouveau logement selon la formule suivante :

$$u_{n+1} = u_n - (u_n - u_{\min})/T_e$$

où u_n est l'utilité avant décroissance, u_{n+1} est l'utilité qui a décréu, u_{\min} est l'utilité minimale dans la ville et T_e est le facteur qui gouverne la rapidité de cette décroissance.

Ainsi les agents évincés trouvent toujours un nouveau logement. Ce mécanisme permet de modéliser un marché avec un minimum de frictions, où les réajustements sont instantanés. Cela permet de rendre compte d'une dynamique de long terme menant à un équilibre.

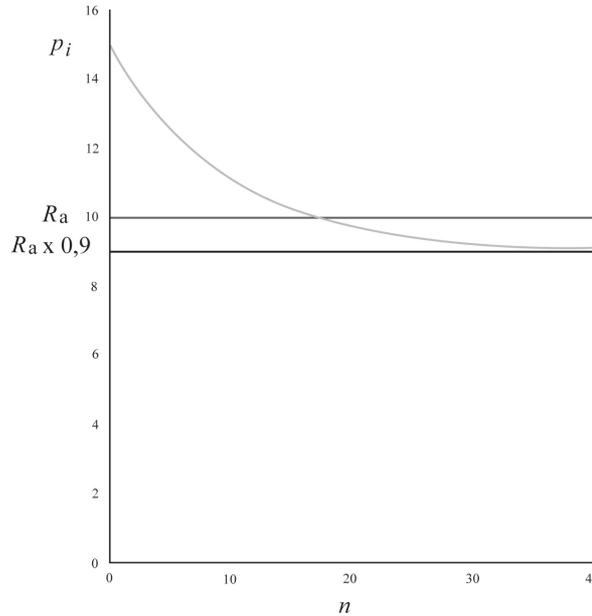
Il y a un autre mécanisme de décroissance dans ce modèle : avec le mécanisme d'enchère utilisé, le prix d'une case où plusieurs candidats emménagent successivement augmente jusqu'à parfois atteindre une valeur qui rend la case très peu attractive. Dans ce cas, les agents présents vont peu à peu quitter cette case pour des cases plus attractives. On choisit donc de faire diminuer exponentiellement le prix des cases qui ne sont pas totalement occupées. Avec deux catégories d'agents, il est difficile de déterminer si une case est totalement occupée ou non : on fait donc décroître le prix d'une case si la surface moyenne s_{moy} du logement des agents qui y habitent est inférieure à la surface libre dans la case s_{libre} . La décroissance utilisée est de la forme suivante :

$$p_{n+1} = p_n - (p_n - R_a^{(0,9)}) \frac{Du \cdot s_{\text{libre}}}{T_p \cdot s_{\text{tot}}}$$

où $Du = (u_{\max} - u_{\min})/u_{\max}$ mesure l'homogénéité de l'utilité dans la ville, T_p est le facteur qui gouverne la rapidité de la décroissance des prix, $s_{\text{libre}} = s_{\text{tot}} - s_{\text{occ}}$ et s_{tot} sont la surface non occupée et la surface totale de la case considérée.

Cette formule est valable jusqu'à ce que le prix décroisse au niveau de la rente agricole, en dessous duquel il ne descend pas. Grâce au facteur $\frac{s_{\text{libre}}}{s_{\text{tot}}}$, les prix décroissent d'autant plus vite que la case est vide, donc peu attractive. Le facteur Du permet de ralentir cette décroissance lorsque l'utilité est très homogène dans la ville, c'est-à-dire quand on est proche de l'équilibre. L'évolution du prix d'une case

Figure 1
**Décroissance du prix d'une case non totalement occupée
à partir du prix initial**



qui n'est pas totalement occupée et où aucun agent n'emménage est représentée sur la Figure 1, à Δu constant, en prenant $\frac{Du^{s_{libre}}}{T_p s_{tot}} = 0,1$.

Les différents paramètres du modèle sont récapitulés dans le Tableau 1. Leur valeur par défaut a été choisie de manière à obtenir une ville qui remplisse divers critères. La population N a été choisie par souci de rapidité des simulations : avec la valeur utilisée, elles durent quelques minutes avec un ordinateur de puissance moyenne. Une autre contrainte concerne la visualisation sur l'espace bidimensionnel de simulation : la taille de la ville, déterminée par les valeurs relatives des différents paramètres, est accordée à celle de l'espace de simulation. Enfin les valeurs relatives des paramètres a , b , Y , t , R_a et s_{tot} permettent de déterminer la pente des courbes de densité et de rentes. Des choix différents pour ces paramètres conduisent également à un bon accord entre les simulations et les résultats analytiques.

Les paramètres internes de la simulation, e , T_e et T_p , sont choisis de manière à obtenir une concurrence sur le marché du logement simulé qui permette d'atteindre l'équilibre en tout point de la ville. Des paramètres supplémentaires g , a_0 et d , sont utilisés pour décrire les aménités ajoutées dans le paragraphe 0.

Tableau 1
Récapitulatif des paramètres du modèle

Paramètres	Description	Valeur par défaut
α, β	Préférences pour le bien composite et le logement	0,9; 0,1
Y	Salaire	300
t	Coût du transport pour une distance unité	5
N	Population	700
R_a	Rente agricole	10
s_{tot}	Surface d'une case	12
ε	Paramètre d'enchère	20
T_e	Paramètre de décroissance de l'utilité des individus éjectés	7000
T_p	Paramètre de décroissance du prix des cases non pleines	15
γ	Préférence pour les aménités	0,5
a_0	Attractivité d'une aménité	4
d	Paramètre de décroissance de l'aménité avec la distance	2

2.3. Exploitation des résultats, robustesse

De manière à pouvoir exploiter les résultats des modèles développés, on extrait différentes variables comme résultats du modèle. Ces variables, comparées à leur valeur dans une situation de référence, pourront nous permettre de caractériser les effets socio-économiques des modifications apportées à la forme monocentrique du modèle standard. Ces variables sont au nombre de trois :

- l'utilité des individus, qui exprime leur bien-être et donne un bilan économique des formes étudiées ;
- les distances parcourues par les agents pour leur trajet domicile-travail, qui reflètent un bilan environnemental¹ ;
- et les inégalités sociales en étudiant la différence d'utilité entre les individus de différentes catégories de revenu.

Il est d'ailleurs intéressant de vérifier que deux simulations successives réalisées avec les mêmes paramètres donnent bien des résultats

1. On ne tient pas compte ici du mode de transport, que l'on suppose motorisé et unique pour le moment, donc reflétant en proportion le kilométrage réalisé les consommations d'énergie et les émissions de polluants.

semblables. Ce n'est en effet pas évident pour un tel modèle, malgré sa simplicité. On a donc lancé de nombreuses simulations successives avec une version du modèle comportant des aménités (section 6), et les résultats sont effectivement concordants entre les différentes simulations, ce qui permet de donner des barres d'erreur sur les grandeurs des résultats. Avec les simulations réalisées, où l'utilité est homogène à 10^{-6} près en fin de simulation, l'incertitude sur les utilités est de 0,05 %. Elle est de 1 % sur la distance totale parcourue, de 0,1 % sur la rente totale, et inférieure à 1 % sur le prix moyen, la surface totale urbanisée et la densité moyenne.

D'autre part, d'autres simulations du même modèle utilisant les mêmes paramètres ont été lancées avec des initialisations différentes, où les agents étaient rangés de diverses manières ordonnées plutôt que d'être distribués aléatoirement dans l'espace. Ces simulations sont parvenues à un état d'équilibre en accord avec les barres d'erreur évoquées précédemment, bien que l'évolution ait été plus longue pour certaines initialisations. Le mécanisme utilisé est donc robuste, non seulement par rapport à l'ajout au modèle de différents ingrédients comme le polycentrisme ou des aménités exogènes, mais également par rapport à d'autres formes d'initialisation.

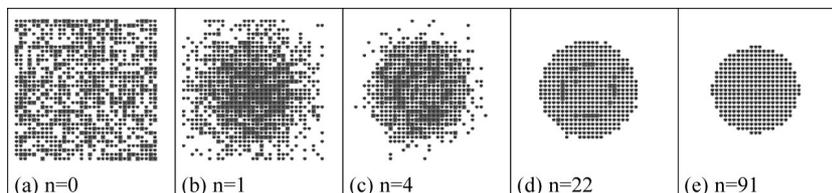
3. COMPARAISON DE LA SIMULATION AUX RÉSULTATS ANALYTIQUES

On atteint par les simulations du modèle multi-agents l'équilibre du modèle d'Alonso, Muth et Mills, comme nous allons le voir. Cet équilibre correspond à une situation où aucun agent ne peut augmenter son utilité en déménageant, et n'a donc intérêt à le faire. Les cases occupées sont les cases les plus proches du centre, on a à la frontière de la ville des prix égaux à la rente agricole, et les prix augmentent lorsque l'on se rapproche du centre. Les surfaces de logement croissent lorsque l'on s'éloigne du centre. A l'intérieur de chaque catégorie, les agents ont une utilité identique quelle que soit leur localisation dans la ville. Par contre s'il y a deux catégories sociales différenciées par leur revenu, l'utilité des « riches » et des « pauvres » n'est pas la même.

3.1. Evolution d'une simulation

Exposons tout d'abord le déroulement d'une simulation. A l'initialisation, les agents sont placés au hasard et les rentes sont égales à la rente agricole. La densité est aléatoire, mais assez faible. Puis les agents déménagent et enchérissent, faisant passer progressivement la

Figure 2

Evolution de la forme de la ville au cours d'une simulation

courbe de rente et la courbe de densité à leurs formes d'équilibre. La Figure 2 expose la manière dont évolue la forme de la ville en même temps. Les cases dont le fond est gris indiquent que des agents « pauvres » et « riches » y cohabitent : à la fin de la simulation, la ville est ségréguée et il n'y a plus de telles cases. On indique le nombre moyen n de déménagements effectués par agent depuis l'initialisation.

Au début de la simulation (Figures 2a et 2b), il y a peu d'évictions (décrites dans le paragraphe 0), les agents se massent tous au centre ville sans beaucoup se concurrencer, car beaucoup de cases ne sont pas encore remplies près du centre. Mais lorsque tous les agents sont regroupés près du centre (à partir de la Figure 2d), il n'y a plus qu'un très faible pourcentage des déménagements qui ne donnent pas lieu à l'éviction d'un agent. En effet, très peu de cases ont assez de surface libre pour permettre à un agent d'y emménager avec une utilité croissante. La grandeur qui caractérise la proximité à l'équilibre est l'homogénéité de l'utilité. Pour la décrire, on utilise le paramètre suivant :

$$Du = (u_{max} - u_{min})/u_{max}$$

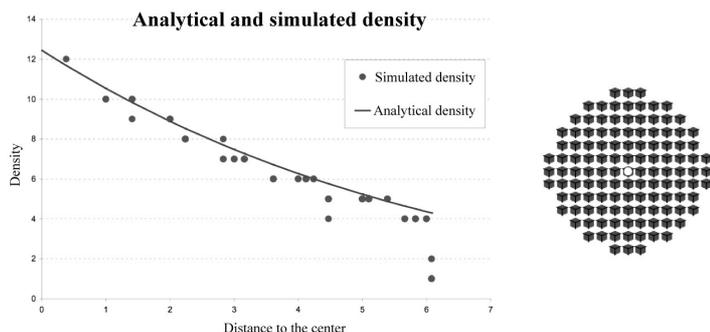
Ce paramètre correspond au maximum de l'homogénéité à l'intérieur de chaque catégorie de revenu (les deux catégories ont en effet des utilités d'équilibre différentes). A l'initialisation, ce paramètre a une valeur élevée car les agents ont été logés de manière aléatoire. Il décroît ensuite au cours de la simulation grâce au mécanisme de concurrence pour le logement, jusqu'à atteindre des valeurs aussi faibles qu'on le désire. Les simulations réalisées dans cette étude ont été arrêtées quand les variations relatives d'utilité à l'intérieur des catégories de revenu ne dépassaient plus 10^{-6} , ce qui les fait diminuer d'environ 5 ordres de grandeur par rapport à l'initialisation.

3.2. Comparaison aux résultats analytiques

Les résultats du programme ne sont pas exactement concordants avec les résultats analytiques à cause des effets de la discrétisation (qui

Figure 3

**Comparaison de la simulation multi-agents avec le résultat analytique
du modèle continu : courbe de densité
(nombre d'habitants par case pour la simulation) et forme de la ville**



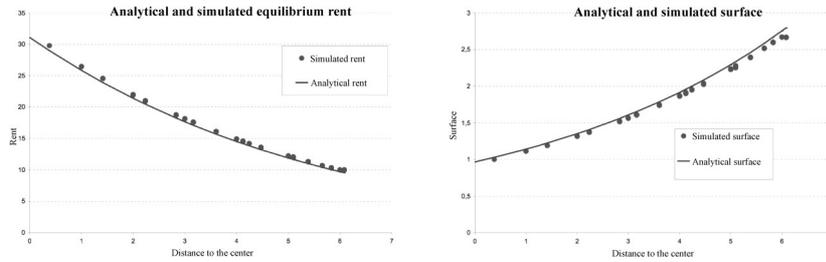
fait par exemple que la frontière de la ville n'est pas exactement partout au même rayon). Ils sont cependant très proches, et ce d'autant plus que la ville est grande. La nature plus précise de l'équilibre obtenu grâce à la simulation est étudiée dans le paragraphe 5. Ce modèle peut donc être comparé aux résultats analytiques lorsque ceux-ci existent : la Figure 3 donne une telle comparaison pour une ville à une seule catégorie d'agents.

On voit que les résultats du modèle multi-agents sont très proches des résultats analytiques, à la discrétisation près. Le caractère discret apparaît très clairement sur la courbe de densité, qui est une fonction en escalier pour la simulation et une fonction continue pour le calcul analytique. La Figure 4 donne la comparaison des courbes de rente et surface en fonction de la distance au centre de la simulation et du modèle analytique. A cause de la discrétisation, les cases ne sont pas complètement remplies dans le modèle multi-agents et la densité est en général plus faible que la densité analytique. La ville est plus étendue, les rentes sont plus élevées, les surfaces plus faibles et l'utilité d'équilibre plus faible.

Il serait en fait intéressant de comparer les résultats de la simulation avec les résultats de modèles discrets de l'économie urbaine, que la simulation devrait reproduire exactement. Cependant, il existe très peu voire pas de résultats analytiques concernant des modèles discrets de villes circulaires, les travaux analytiques ayant surtout porté sur des modèles continus ou sur des modèles discrets de villes linéaires.

Figure 4

Comparaison de la simulation multi-agents avec le résultat analytique du modèle continu : rente et surface en fonction de la distance au centre (nombre d'habitants par case pour la simulation) et forme de la ville



4. CATÉGORIES DE REVENU ET VALEUR DU TEMPS

Dans cette section, on présente la simulation grâce au modèle multi-agents d'une ville où deux catégories de revenu cohabitent. On introduit ensuite des coûts de transport généralisés, distincts pour les deux catégories.

4.1. Résultats à deux catégories de revenu : modèle 1

On donne sur la Figure 5 la forme de la ville avec deux catégories d'agents différenciés par leur revenu, ainsi que la courbe de rente en fonction de la distance au centre. Le centre est représenté par un point vert. On utilise pour les paramètres les valeurs par défaut données

Figure 5

Ville à deux catégories d'agents : « riches » en noir et « pauvres » en gris

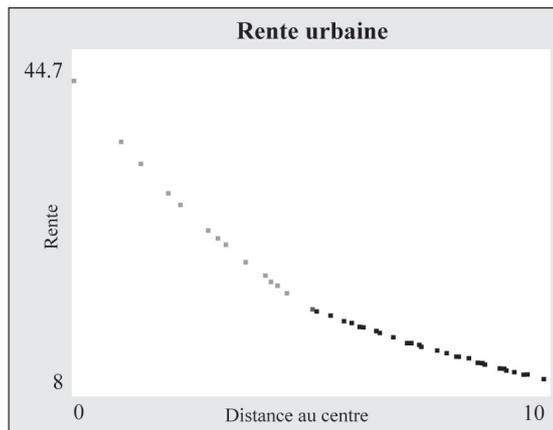
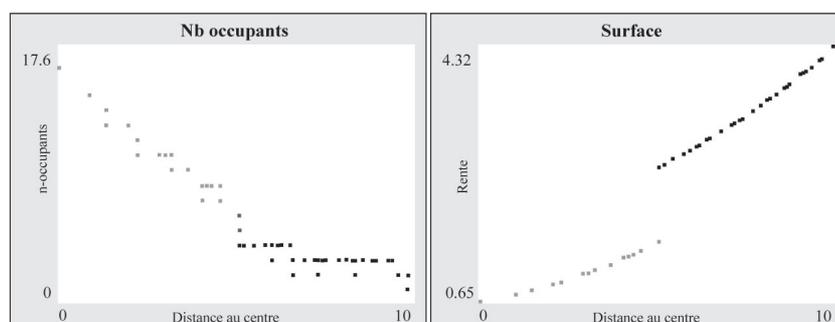


Figure 6

**Densité de population (nombre d'habitants par case)
et surface des logements en fonction de la distance au centre**



dans le Tableau 1. La population est formée de deux catégories contenant 700 individus chacune : des « pauvres » avec un salaire $Y=300$ et des « riches » avec un salaire $Y=300*1,6=480$. Comme le prédit le modèle analytique, les « riches » se logent en périphérie, où ils payent des prix surfaciques moins élevés et bénéficient de logements plus grands, mais ont des coûts de transport plus élevés.

Sur la Figure 6, on donne la densité de population ainsi que la surface des logements en fonction de la distance au centre pour cette situation.

Ces résultats coïncident avec les résultats analytiques, tant pour la forme de la ville et la courbe de densité (à la discrétisation près) que pour les courbes de rentes et de surfaces (voir Fujita, 1989).

4.2. Valeur du temps : modèle 2

L'équilibre du modèle standard de l'économie urbaine que l'on vient de présenter représente bien la configuration que l'on observe dans la plupart des villes nord-américaines, où le revenu moyen est effectivement plus élevé en périphérie qu'au centre. Cependant, beaucoup de villes européennes ou sud-américaines présentent une configuration inverse. Un des facteurs qui permettraient d'expliquer cette différence est l'introduction d'une différence de coût temporel de transport : les ménages « riches » valorisent plus fortement leur temps de transport que les ménages « pauvres ». Dans le modèle standard de l'économie urbaine, on peut donc introduire un coût temporel de transport (par unité de distance) c_t/v , où c_t est la valeur du temps et v la vitesse de transport, choisie constante et égale pour tous dans notre

modèle. Ce coût vient donc s'ajouter au coût monétaire : le coût généralisé de transport s'écrit alors :

$$T(x) = tx + \frac{c_t}{v}x$$

où x est la distance au centre.

La résolution analytique et les simulations donnent le même résultat : on parvient effectivement à inverser la localisation des agents en fonction de leur revenu avec l'introduction d'un coût temporel du transport différent pour les deux classes de revenu. Pour cela, il faut que le rapport des coûts généralisés de transport par unité de distance des deux classes de revenu soit supérieur au rapport des revenus, qui est de 1,6 dans les simulations :

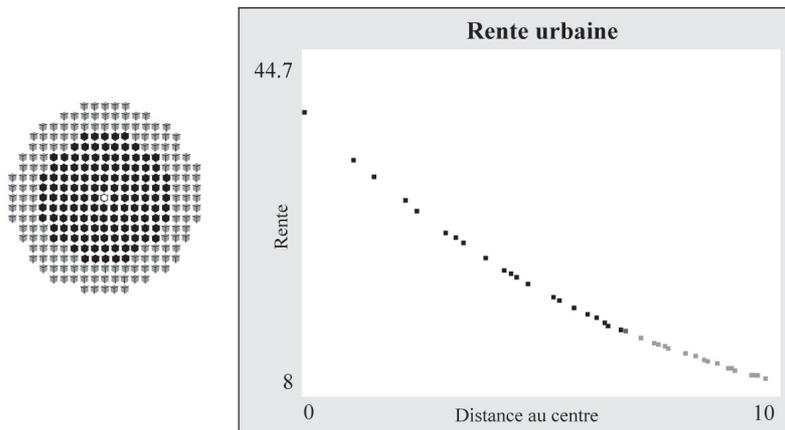
$$T_r / T_p > Y_r / Y_p$$

avec T_r et T_p les coûts de transport des agents « riches » et « pauvres ». Cela signifie que le coût généralisé de transport doit augmenter plus que proportionnellement au revenu.

La Figure 7 présente ainsi la forme de la ville et des rentes d'équilibre qu'on obtient dans cette situation, avec un coût monétaire du transport $t=2$, un coût temporel pour les « pauvres » $c_t^p / v = 2$ et pour les « riches » $c_t^r / v = (c_t^p / v) \times 2,4 = 4,8$. Les coûts généralisés de transport des deux catégories de revenu sont donc dans un rapport de 1,7. Cette condition pour l'inversion des catégories de revenu peut égale-

Figure 7

Forme de la ville et des rentes d'équilibre lorsque l'on introduit un coût temporel de transport bien supérieur pour les agents « riches » à celui des agents « pauvres »



ment être écrite $T_r / Y_r > T_p / Y_p$. Cela signifie que la catégorie de revenu qui se localise près du centre est celle pour laquelle le coût généralisé de transport pour une unité de distance rapporté au revenu est le plus important. Ce résultat est valable pour la fonction d'utilité log-linéaire utilisée ici, mais également pour une fonction d'utilité de type Cobb-Douglas (l'exponentielle de l'utilité log-linéaire).

Le rapport entre les coûts temporels du transport des deux populations utilisé ici paraît excessif par rapport aux résultats empiriques obtenus sur la question : on observe empiriquement que la valeur du temps augmente avec le revenu (cf. de Palma et Fontan, 2001, pour une étude en Ile-de-France), mais pas assez rapidement pour remplir la condition précédente, si on fixe la vitesse et le coût monétaire de transport pour les deux catégories de revenu. Cependant, l'influence de l'augmentation du coût temporel du transport avec le revenu sur la localisation des ménages, est un facteur qui est souvent invoqué pour expliquer la configuration des villes européennes. L'importance de ce facteur fait débat dans la littérature (cf. Goffette-Nagot *et al.*, 2000 ; Brueckner *et al.*, 1999 ; LeRoy et Sonstelie, 1983 ; Wheaton, 1977), et ce débat n'est pas tranché à notre connaissance.

5. POLYCENTRISME ET AMÉNITÉS

Deux ingrédients supplémentaires sont ajoutés dans cette section au modèle multi-agents : des centres d'emplois distincts, et des aménités.

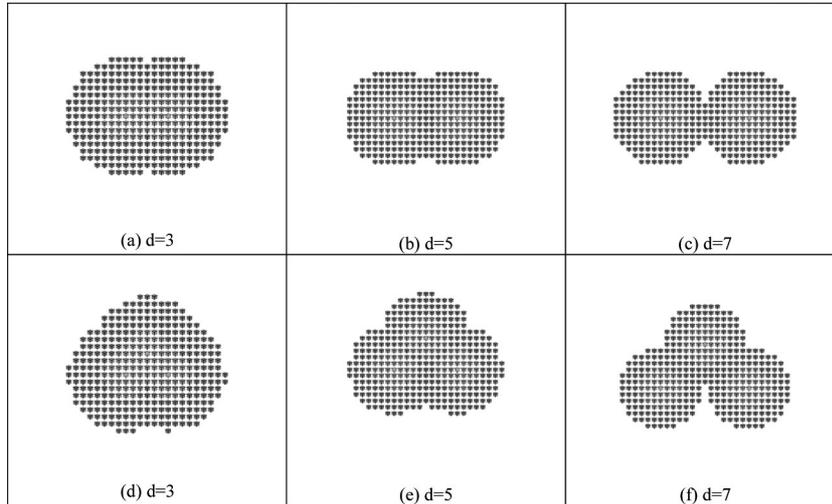
5.1. Plusieurs centres d'emplois : modèle 3

Comme le mécanisme multi-agents permettant de retrouver les résultats du modèle d'Alonso, Muth, Mills est assez robuste, on peut introduire des modifications plus difficiles (ou impossibles) à étudier analytiquement. Par exemple, on peut introduire plusieurs centres d'emplois (ce qui à notre connaissance n'a pas été fait analytiquement pour une ville circulaire). Les agents vont travailler au centre d'emploi le plus proche de leur logement. Ils changent donc en général d'emploi en même temps qu'ils changent de logement, ce qui permet de minimiser les frictions sur les marchés de l'emploi et du logement, pour atteindre rapidement une situation d'équilibre. Les résultats d'un tel modèle sont donnés sur la Figure 8.

Les rentes, surfaces et densités tracées en fonction de la distance au centre d'emploi le plus proche donnent des courbes semblables à celles de la Figure 5 et de la Figure 6. Le Tableau 2 permet de comparer ce modèle polycentrique à la situation de référence à deux populations

Figure 8 (voir le hors-texte en couleurs)

Villes à deux centres d'emplois éloignés d'une distance de $2d$ cases et à trois centres d'emplois en position $(-d;0)$, $(d;0)$ et $(0;d)$, représentés par des points verts, pour différentes valeurs de d



exposée dans le paragraphe précédent. Dans ce tableau, on trouve l'utilité² des « riches » U_r , celle des « pauvres » U_p , leur différence, les distances moyennes parcourues par les « riches » D_{moy}^r et les « pauvres » D_{moy}^p , la distance totale parcourue par les agents D_{tot} , la rente totale payée dans la ville R_{tot} , le prix surfacique moyen p_{moy} , la surface totale habitée S_{tot} et la densité moyenne r_{moy} .

On y voit qu'en augmentant de cette manière le nombre de centres d'emplois, par rapport à la situation de référence, on augmente la surface disponible à une distance donnée d'un centre d'emploi dans la ville, et on diminue ainsi la concurrence pour le logement. Les agents ont des surfaces de logement plus grandes, parcourent des distances plus faibles et ont une utilité plus élevée. Par contre, la rente totale payée augmente, ce qui peut paraître peu intuitif mais peut s'expliquer par le fait que les surfaces habitées sont plus importantes. La densité moyenne diminue avec l'accroissement des surfaces. Ces effets sont tous d'autant plus importants que l'on écarte davantage les différents centres.

2. On donne en fait l'exponentielle de cette utilité, correspondant donc à une utilité de Cobb-Douglas, dont les variations sont plus significatives.

Tableau 2
Comparatif des différents modèles exposés

Modèle	U_r	U_p	$U_r - U_p$	D_{moy}^r	D_{moy}^p	D_{tot}	R_{tot}	P_{moy}	S_{tot}	ρ_{moy}
2 populations	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
2 centres (Figure 8) $d=3$	101,6	102,6	99,0	83,1	78,1	81,7	101,3	94,9	106,7	93,8
2 centres $d=5$	102,2	103,1	99,1	78,2	80,3	78,8	101,5	92,9	109,7	91,2
2 centres $d=7$	102,6	103,4	99,3	78,8	81,9	79,7	101,4	88,5	114,5	87,4
3 centres $d=3$	102,1	103,4	98,7	77,4	67,0	74,4	101,8	94,3	108,0	92,7
3 centres $d=5$	103,1	104,4	98,7	70,6	69,2	70,2	102,1	88,8	114,9	87,0
3 centres $d=7$	103,9	105,3	98,7	66,7	71,3	68,0	102,3	83,8	122,1	82,0
100% (Figure 9) $d=2$	100,0	100,5	99,5	87,2	120,5	96,8	100,2	100	99,5	100,6
100% $d=6$	100,8	102,0	99,8	72,0	122,8	86,6	100,9	99,0	102,0	98,1
100% $d=10$	101,4	103,1	98,4	70,1	124,4	85,8	101,0	92,5	109,3	91,5
80% $d=2$	100,4	100,9	99,6	90,8	97,2	92,7	100,5	100	101,1	98,9
80% $d=6$	101,3	102,4	98,9	79,9	91,0	83,2	101,2	96,1	105,2	95,1
80% $d=10$	101,9	103,2	98,8	75,5	95,3	81,3	101,3	91,8	110,3	90,8

Les bilans économique et environnemental de l'introduction de différents centres d'emploi sont donc positifs : les utilités augmentent et les distances parcourues diminuent. Les utilités augmentent avec l'écart entre les centres, mais l'effet sur les distances parcourues est plus complexe (voir le Tableau 2). D'une part, la multiplication des centres d'emplois permet de multiplier les possibilités de se loger à une distance donnée d'un centre d'emplois, ce qui réduit les distances parcourues quand on écarte les centres. C'est ce qu'on observe pour des distances $d=3$ ou 5 à deux centres d'emplois, et pour les trois distances présentées à trois centres d'emplois. D'autre part, en augmentant ainsi l'offre de logement sans changer la population, on réduit la concurrence pour le logement : le prix moyen diminue et la ville s'étale, ce qui tend à ré-augmenter les distances domicile-travail quand on continue à écarter les centres, formant ainsi des villes distinctes. On le voit à deux centres d'emplois distants de $d=7$, et on l'observerait également pour des distances supérieures à 7 à trois centres d'emplois.

Pour le bilan social, le résultat est moins intuitif : les « pauvres » voient, grâce à l'ajout de centres d'emplois, leur utilité augmenter plus que celle des « riches ». A deux centres d'emploi, l'écart entre « riches » et « pauvres » est d'autant plus réduit que les centres sont proches. A trois centres, cet écart ne varie pas avec la distance séparant les centres.

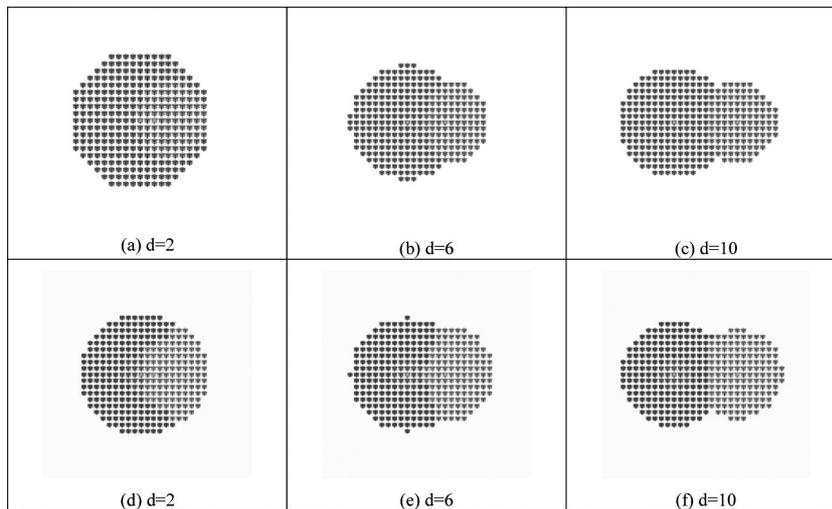
5.2. Contrainte liée aux emplois : modèle 4

Il est possible de contraindre les agents à choisir un centre d'emplois au départ et à le garder tout au long de la simulation. Le calcul de l'équilibre dans cette configuration d'une ville à deux dimensions n'a pas non plus été calculé de manière analytique à notre connaissance (ni dans un modèle discret, ni dans un modèle continu), mais le mécanisme d'enchère utilisé ici permet de trouver cette situation d'équilibre.

On peut par exemple choisir d'affecter tous les « riches » à un centre d'emploi et tous les « pauvres » à un autre centre se situant à une autre localisation. Le résultat d'un tel modèle, que l'on peut interpréter comme la simulation d'une zone industrielle à l'est et d'un centre d'emplois de haut niveau à l'ouest, est donné sur la première ligne de la Figure 9. Ces figures sont réalisées pour des distances d variables entre les deux centres. Il est également possible d'affecter une partie de chaque catégorie de revenu à chaque centre, c'est-à-dire de supposer qu'ils ne sont pas entièrement spécialisés. Par contre, comme les agents ont des contraintes différentes à l'intérieur même d'une catégorie de revenus, leur utilité n'est plus homogène à l'inté-

Figure 9 (voir le hors-texte en couleurs)

Première ligne : villes à deux centres d'emplois où les agents « pauvres » travaillent dans le centre est et les agents « riches » dans le centre ouest
Deuxième ligne : 80% des agents « pauvres » sont contraints de travailler dans le centre est et les 20% restants dans le centre ouest, et inversement pour les agents « riches »



rieur d'une même catégorie. L'utilité est homogène parmi les agents d'une même catégorie de revenu travaillant au même centre d'emploi. C'est ce qui est réalisé dans la deuxième ligne de la Figure 8 : on a deux centres d'emplois qui ne sont donc plus indifférents pour les agents, et deux catégories de revenu soit quatre catégories d'agents différenciées par leurs utilités. On a distingué par des couleurs différentes les agents travaillant dans chacun des deux centres.

L'effet global de l'introduction de centres d'emplois avec contraintes pour les agents est assez semblable à celui des centres non contraints : on augmente les surfaces disponibles à une distance donnée du centre, et on augmente donc l'utilité des agents. Le bilan économique est positif : les utilités des individus augmentent avec l'éloignement des centres.

La surface habitée est également augmentée, et plus encore quand on éloigne les centres. Cependant, la simulation exposée sur la Figure 8a fait exception : la ville est contractée et la densité moyenne augmente par rapport à la situation de référence.

La ségrégation partielle ou totale des « riches » et des « pauvres » dans des centres d'emplois distincts diminue en fait la concurrence pour le logement entre les deux catégories de revenu : les « pauvres » sont moins « forcés » à se rassembler près du centre, et les « riches » sont moins « repoussés » vers la périphérie. Pour les distances parcourues, deux effets apparaissent : cette diminution de la concurrence entre catégories pour le logement (qui fait augmenter les distances parcourues par les « pauvres » et diminuer celles parcourues par les « riches », d'autant plus que les centres sont éloignés) et le supplément d'espace disponible proche des centres, qui fait diminuer toutes les distances parcourues. Le bilan environnemental est positif, les distances parcourues diminuent globalement avec l'écartement des centres (mais les effets sur chaque catégorie sont plus complexes, voir le Tableau 2 plus de détails).

Quant au bilan social, il est également positif globalement. L'écart d'utilité entre « riches » et « pauvres » diminue. Lorsque la ségrégation liée à l'emploi est totale, l'effet de l'écartement des centres n'est pas monotone (voir le Tableau 2). Lorsqu'elle est partielle, les inégalités sociales diminuent avec l'éloignement des centres. Cependant, il faut bien noter qu'à l'intérieur de chaque catégorie sociale, de nouvelles inégalités sont apparues.

5.3. Introduction d'aménités : modèle 5

La présence d'aménités est un autre facteur dont on veut étudier ici l'influence sur la localisation des agents. Elles peuvent être de plu-

siieurs types : des aménités environnementales (cours d'eau, bois ou collines par exemple), des aménités historiques, liées à la formation de la ville (monuments, parcs) ou encore des aménités liées aux lieux de divertissements modernes (restaurants, cinémas, infrastructures sportives et de divertissement). Ces différents types d'aménités peuvent bien entendu coïncider dans leur localisation dans certains cas. On introduit dans l'utilité des agents un terme rendant compte de la présence d'aménités :

$$U=alnz+blns+gln(1+a(r))$$

où $a(r)$ est la fonction aménités et g le facteur traduisant la préférence des agents pour les aménités. $a(r)$ est une fonction décroissante de la distance r à l'aménité, que l'on prend de la forme $a(r) = a_0 \exp(-r/b)$.

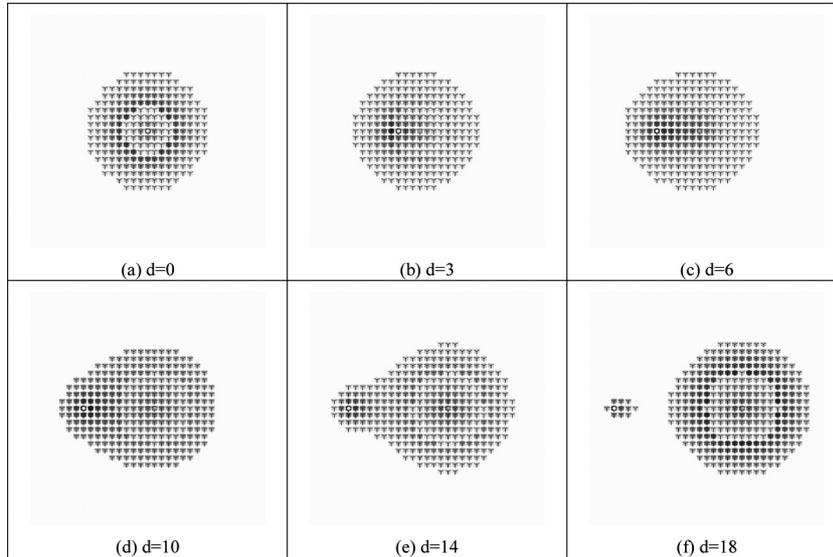
Cette aménité agit selon une distance à vol d'oiseau et est synonyme de qualité de vue (par exemple sur un paysage urbain monumental ou environnemental). Les valeurs des paramètres sont données dans le Tableau 1.

5.3.1. Distance au centre

Les résultats en fonction de la distance d de l'aménité au centre sont donnés sur le Figure 10. Dans cette figure, les couleurs indiquent

Figure 10 (voir le hors-texte en couleurs)

Aménité à l'ouest du centre à une distance d variable



les différents niveaux de prix payés par les agents à l'intérieur de chaque catégorie, le plus sombre étant le plus cher. Les échelles de couleur varient d'une figure à l'autre.

Suivant que l'aménité est plus ou moins distante, son influence sur la forme de la ville et sur le prix du logement est plus ou moins importante. On peut remarquer que pour une aménité située à une distance de 18 dans notre modèle, des agents « riches » emménagent à proximité de celle-ci bien qu'elle ne se trouve pas dans la ville. Une telle configuration correspond à un « développement à sautemouton », et la présence d'une aménité à l'extérieur de la ville (mais pas trop lointaine) peut donc être avancée comme une des causes d'un tel phénomène.

Le Tableau 3 donne des « observables » permettant de caractériser l'équilibre obtenu dans les différentes simulations. Le bilan économique de l'introduction d'aménités est positif : l'utilité des agents augmente, d'autant plus que l'aménité est proche du centre (où son effet est ressenti par tous les agents). Pour le bilan social, une aménité proche du centre réduit les écarts d'utilité entre « riches » et « pauvres », alors qu'une aménité plus lointaine les augmente, car elle profite surtout aux « riches » qui habitent à sa proximité.

La ville est rendue plus compacte et dense si l'aménité est introduite dans la ville ou proche d'elle, elle est étalée dans le cas contraire. Pour le bilan environnemental, les distances parcourues sont en accord avec ce résultat, elles sont diminuées si l'aménité est proche de la ville, augmentées sinon. Les effets sont d'amplitudes différentes sur les deux catégories de population : les aménités proches du centre influencent principalement les « pauvres », et les aménités lointaines surtout les « riches ». Quand une aménité est placée en dehors des limites de la ville, mais très proche de celle-ci, son bilan environnemental est très négatif, alors qu'il l'est beaucoup moins quand l'aménité est placée à l'intérieur de la ville et devient rapidement positif quand l'aménité est plus proche du centre.

Selon ce modèle, un aménageur urbain visant la densification de sa ville et une diminution des distances parcourues devrait donc placer de nouvelles aménités le plus près possible du centre. On peut également remarquer que la densification de la ville causée par une aménité proche du centre augmente les rentes, ce qui peut poser problème si celles-ci ont déjà atteint un niveau trop important, tandis qu'une aménité lointaine les diminue.

Tableau 3
Comparatif des différents modèles avec aménités exposés.
Les observables sont les mêmes que celles du Tableau 2

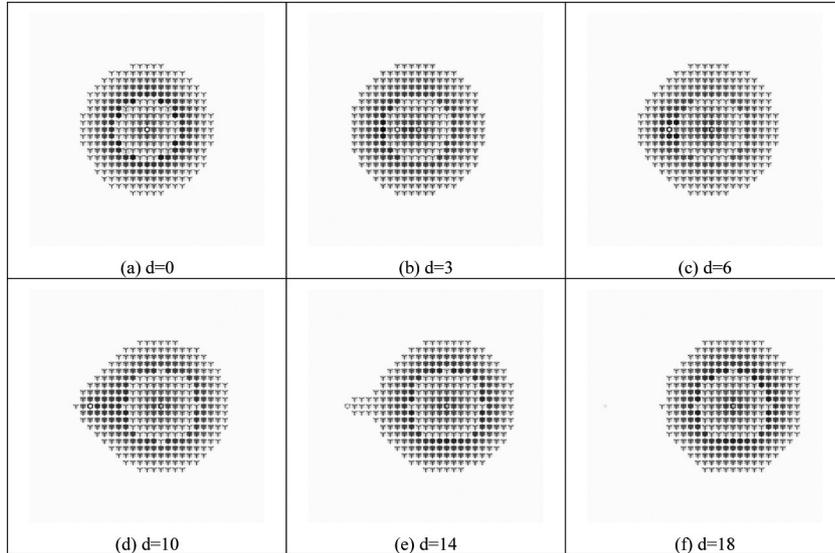
Modèle	U_r	U_p	$U_r - U_p$	D_{moy}^r	D_{moy}^p	D_{tot}	R_{tot}	P_{moy}	S_{tot}	ρ_{moy}
2 populations	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Aménité (Figure 10) d=0	102,1	103,4	98,7	79,4	62,2	74,5	101,8	134,4	75,7	132,1
Aménité d=3	101,9	102,8	99,1	83,9	79,5	82,6	101,2	129,7	78,1	128,2
Aménité d=6	101,7	102,1	99,6	94,2	98,9	95,6	100,3	117,4	85,5	117,1
Aménité d=10	101,3	101,3	100,1	108,9	106,4	108,2	99,4	103,5	96,1	104,1
Aménité d=14	100,9	100,9	100,1	116,7	106,8	113,8	99,0	94,7	104,6	95,7
Aménité d=18	100,2	100,2	100,0	106,7	102,5	105,5	99,6	97,9	101,7	98,3
$a_0=1$ (Figure 11), d=0	100,6	101,1	99,5	94,8	86,1	92,3	100,5	107,0	93,9	106,6
$a_0=1$, d=3	100,5	100,9	99,6	95,8	93,2	95,1	100,3	105,6	95,0	105,3
$a_0=1$, d=6	100,5	100,5	100,0	98,2	98,7	98,3	100,1	103,5	96,7	103,6
$a_0=1$, d=10	100,4	100,4	100,0	102,8	102,7	102,7	99,8	98,6	101,3	98,9
$a_0=1$, d=14	100,2	100,2	100,0	102,5	101,3	102,1	99,8	98,0	101,9	98,3
$a_0=1$, d=18	100,0	100,0	100,0	100,0	99,8	100,0	100,0	99,9	100,1	100,0
b=4 (Figure 12), d=0	106,0	107,3	98,9	78,6	67,8	75,5	101,7	139,7	72,8	137,4
b=4, d=3	105,8	106,7	99,2	83,5	78,7	82,1	101,3	134,5	75,3	132,9
b=4, d=6	105,1	105,5	99,6	95,2	93,1	94,6	100,4	126,2	79,5	125,8
b=4, d=10	104,0	103,9	100,1	114,0	106,6	111,9	99,2	110,4	89,8	111,3
b=4, d=14	102,8	102,7	100,1	126,6	111,0	122,1	98,4	97,3	101,2	98,9
b=4, d=18	101,6	101,5	100,1	127,1	109,2	121,9	98,5	91,6	107,4	93,0
$\gamma_p=0$ (Figure 13), d=0	102,1	99,2	102,9	44,8	208,0	91,9	100,6	132,1	76,1	131,4
$\gamma_p=0$, d=3	102,1	99,6	102,5	64,7	163,8	93,2	100,5	127,6	78,7	127,1
$\gamma_p=0$, d=6	101,9	100,5	101,4	88,1	125,0	98,8	100,1	116,8	85,7	116,7
$\gamma_p=0$, d=10	101,4	100,8	100,6	108,1	107,8	108,0	99,4	103,7	95,8	104,3
$\gamma_p=0$, d=14	100,9	100,8	100,1	116,8	107,1	114,0	99,0	94,6	104,7	95,7
$\gamma_p=0$, d=18	100,2	100,2	100,0	107,4	103,2	106,2	99,6	91,2	102,2	97,9
Aménité circulaire (Figure 15)	131,3	129,7	101,3	134,9	141,1	136,7	97,4	69,1	141,0	70,9
D'un côté	131,4	131,9	99,6	103,9	102,9	103,6	99,7	152,1	65,6	152,6

5.3.2. Aménité moins attractive

La Figure 11 présente les mêmes résultats, mais obtenus avec une valeur de 1 pour le paramètre a_0 (alors qu'il avait une valeur de 4 précédemment), ce qui correspond à une aménité moins attractive. Les couleurs indiquent les différents niveaux de prix payés par les agents à l'intérieur de chaque catégorie, le plus sombre étant le plus cher. Les

Figure 11 (voir le hors-texte en couleurs)

**Aménité à l'ouest du centre à une distance d variable,
avec une valeur de 1 pour le paramètre a_0**



échelles de couleur varient d'une figure à l'autre. Les grandeurs observables sont données dans le Tableau 3.

Les effets de l'introduction d'une telle aménité sont globalement les mêmes que ceux d'une aménité plus attractive, mais amoindris. La forme de la ville et les rentes sont moins déformées par l'introduction de l'aménité, et on peut remarquer qu'avec une telle aménité on n'observe pas de « développement à saute-mouton ».

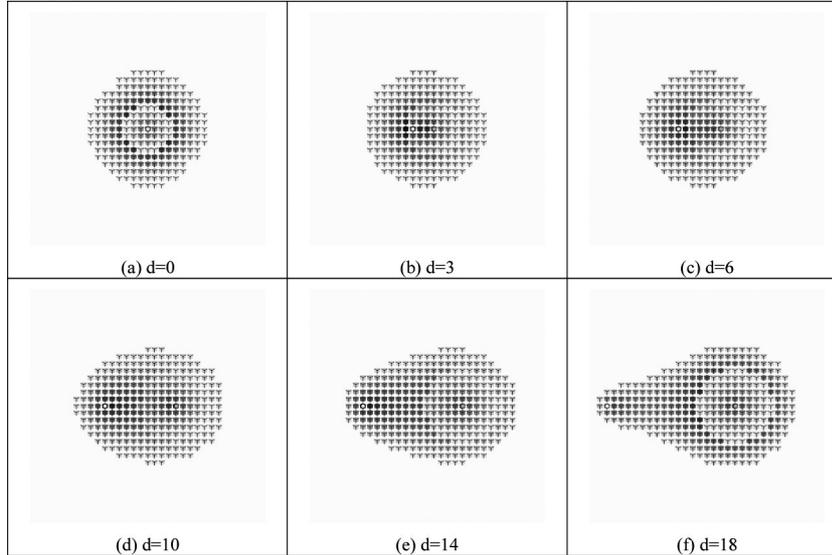
5.3.3. Aménité à la portée plus importante

On réalise la même étude avec cette fois-ci $a_0 = 4$ et $b = 4$ pour observer l'influence de ce dernier paramètre, qui décrit la distance caractéristique en dessous de laquelle l'effet de l'aménité se fait particulièrement sentir. Les résultats sont présentés sur la Figure 12. Les couleurs indiquent les différents niveaux de prix payés par les agents à l'intérieur de chaque catégorie, le plus sombre étant le plus cher. Les échelles de couleur varient d'une figure à l'autre.

Avec l'augmentation du paramètre b étudiée, les effets de l'introduction d'une aménité sont exacerbés mais ne changent pas fondamentalement. Pour une aménité plus éloignée que celles présentées sur la Figure 12, on peut observer un « développement à saute-mouton ». Ce phénomène apparaît donc pour une aménité assez attractive tant au

Figure 12 (voir le hors-texte en couleurs)

**Aménité à l'ouest du centre à une distance d variable,
avec une valeur du facteur b de rayonnement de l'aménité $b = 4$**



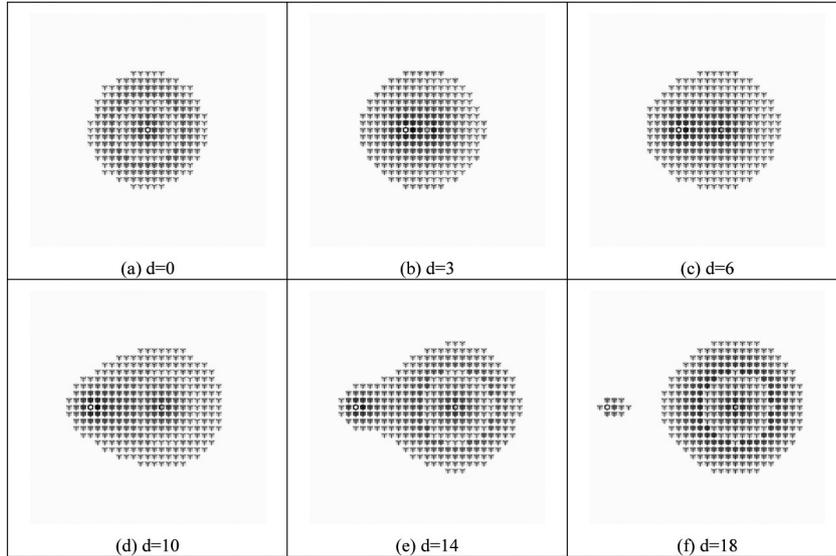
niveau de son intensité que de sa portée et à une distance particulière du centre (ni trop lointaine, ni trop proche). Comme les résultats détaillés précédemment ne changent pas fondamentalement quand on fait varier les paramètres a_0 et b , on peut leur accorder une bonne confiance.

5.3.4. L'absence de préférence des « pauvres » pour les aménités

On étudie également l'influence des préférences individuelles pour les aménités sur la localisation résidentielle des agents. En effet, le modèle avec aménités étudié jusqu'à présent rend bien compte de la forme des villes nord-américaines et de la localisation des ménages suivant leur revenu, mais pas celle des villes européennes comme Paris ou Lyon par exemple, qui présentent une répartition différente des ménages, où les revenus sont plus élevés près du centre (et parfois à l'ouest) qu'en périphérie. On modélise donc cet effet en choisissant pour les « pauvres » une valeur du facteur g de préférence pour les aménités nulle $\gamma_p = 0$, ce qui correspond à une différenciation extrême des classes de revenu quant à leur préférence pour les aménités. Les résultats d'un tel modèle sont donnés sur la Figure 13. Les couleurs indiquent les différents niveaux de prix payés par les agents à l'inté-

Figure 13 (voir le hors-texte en couleurs)

**Aménité à l'ouest du centre à une distance d variable,
avec une valeur du facteur g de préférence pour les aménités nulle
pour les « pauvres » $\gamma_p = 0$**



rieur de chaque catégorie, le plus sombre étant le plus cher. Les échelles de couleur varient d'une figure à l'autre.

On observe effectivement une inversion de la localisation des agents lorsque l'aménité est centrale ou proche du centre. Les agents « riches » se localisent au centre près de l'aménité, puis un peu plus loin du centre les agents « pauvres », et encore plus loin, des agents « riches » qui ne profitent pas beaucoup de l'aménité centrale mais profitent de prix du logement moins élevés et de surfaces de logement plus grandes qu'au centre (malgré des coûts de transport plus importants).

Une telle aménité a un bilan économique positif pour les « riches », d'autant plus qu'elle est proche du centre. Pour les « pauvres », le bilan est négatif quand l'aménité est proche du centre et devient positif quand elle s'en éloigne (la concurrence avec les « riches » est alors moins grande). Le bilan social va dans le sens d'une augmentation des inégalités, mais s'annule quand l'aménité est assez lointaine. Globalement, le bilan environnemental est assez semblable à celui d'une aménité pour laquelle « riches » et « pauvres » ont la même préférence.

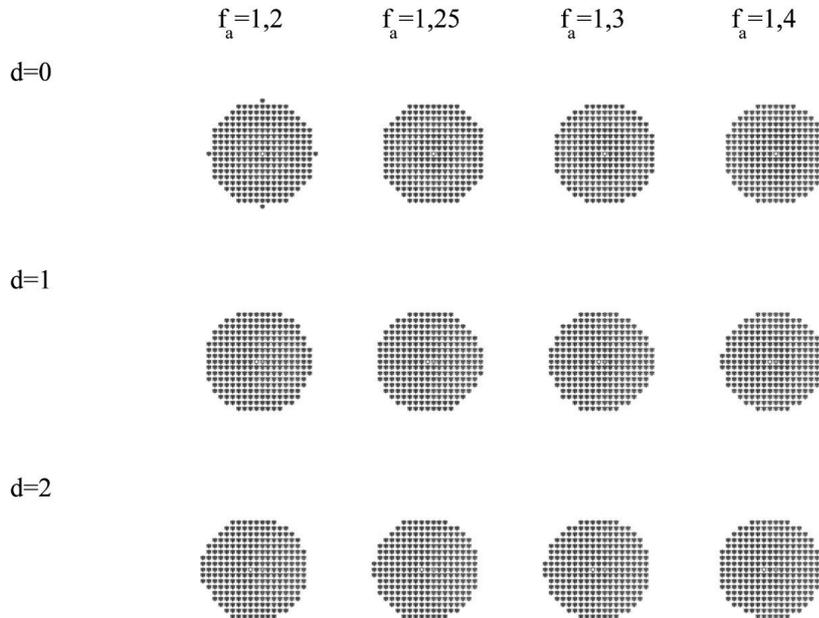
5.3.5. Préférence différenciée pour les aménités

L'introduction d'une aménité centrale à laquelle seule la population « riche » est sensible permet dans notre modèle (et donc dans le modèle standard de l'économie urbaine) d'inverser la localisation des catégories de revenu, en passant d'une configuration de type « nord-américaine » à la configuration « européenne ». L'aménité attire la population riche au centre de la ville, repoussant la population pauvre en périphérie.

Les simulations précédentes supposaient que les agents au revenu inférieur n'ont aucune préférence pour les aménités, ce qui ne paraît pas pouvoir représenter raisonnablement la réalité. Par contre, une simple différence d'appréciation des aménités entre « riches » et « pauvres », c'est-à-dire une augmentation de la préférence pour les aménités avec le revenu, ainsi qu'une forte aménité centrale, peuvent suffire pour obtenir des villes de forme européenne. C'est ce qui est exposé sur la première ligne de la Figure 14, où on fait varier le facteur f_a

Figure 14 (voir le hors-texte en couleurs)

Forme de la ville avec aménité (en jaune) centrale ou à l'ouest proche du centre d'emplois (en vert), pour plusieurs valeurs de la distance entre le centre d'emplois et le centre d'aménités et plusieurs valeurs du facteur de différence de préférence pour les aménités entre « riches » et « pauvres »



traduisant la différence de préférence pour les aménités entre « riches » et « pauvres » : le facteur de préférence pour les aménités des « pauvres » a sa valeur de référence $\gamma_p = 0,1$ et celui des « riches » a la valeur $\gamma_r = \gamma_p \times f_a$. Comme le montre la Figure 14, la forme de la ville est très sensible au facteur f_a ; le facteur a_0 a sa valeur de référence $a_0 = 4$ et le facteur b a pour valeur $b = 4$.

On peut par ailleurs remarquer que cette forme européenne de la ville est également sensible à un autre paramètre que les simulations permettent de faire varier : la distance entre l'aménité et le centre d'emplois. Dès que l'on écarte ces deux centres dans les simulations, on change en effet fortement la forme de la ville, la faisant passer d'une configuration où les différentes catégories de revenu sont disposées en anneaux concentriques à une configuration où la population riche se trouve majoritairement du côté de l'aménité et la population pauvre du côté du centre d'emplois, comme le montre la Figure 14.

La comparaison des 5 Figures (10, 11, 12, 13 et 14) permet de se donner une bonne idée de l'influence sur la forme de la ville des facteurs a_0 et b qui décrivent l'aménité ponctuelle étudiée, et de celle d'une différenciation des préférences pour les aménités entre « riches » et « pauvres ».

5.3.6. Aménités étendues

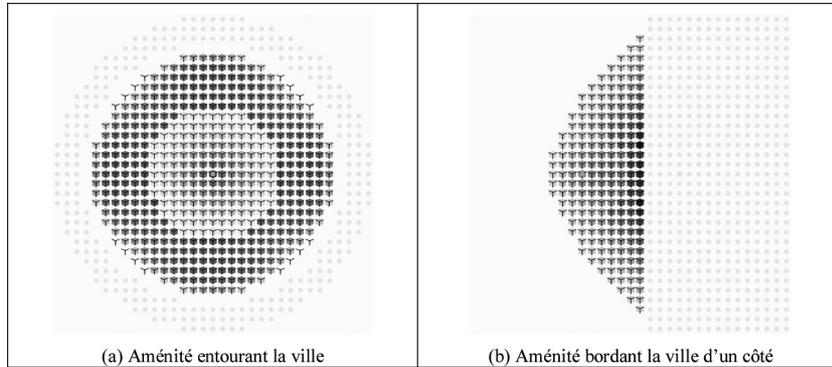
On revient à une préférence identique des agents « riches » et « pauvres » pour les aménités, et on s'intéresse enfin à l'influence d'aménités plus diffuses, où la valeur de la fonction aménités en un point x . est donnée par

$$a(x.) = S_i a(r_i) = S_i a_0 \exp(-r_i/b)$$

où i balaye les aménités et r_i est la distance entre l'aménité i et le point x .

En outre, on interdit ici aux agents d'habiter les cases où se trouvent les aménités. La Figure 15 présente ainsi la forme d'une ville entourée par une aménité environnementale, un massif montagneux par exemple, et celle d'une ville dont un côté est bordé par une aménité environnementale, telle qu'une étendue d'eau, avec $a_0 = 1$ et $b = 4$. Dans cette figure, on a utilisé une valeur de 4 pour le paramètre b et une valeur de 1 pour le paramètre a_0 . Les échelles de couleur varient d'une figure à l'autre. Ces deux types d'aménités ont une grande influence sur la forme de la ville. Le Tableau 3 montre d'ailleurs qu'elles provoquent une importante augmentation de l'utilité des agents.

Figure 15 (voir le hors-texte en couleurs)

Aménités environnementales étendues

L'aménité qui entoure la ville étale celle-ci (augmentation des distances parcourues, de la surface totale urbanisée, diminution de la densité) et profite plus aux « riches » qu'aux « pauvres » de par sa situation périphérique. Elle fait beaucoup baisser le prix surfacique moyen. La forme particulière de la ville (pas tout à fait circulaire), qu'on observe sur la Figure 15, est due à la discrétisation de l'espace de simulation : les aménités sont un peu plus nombreuses dans les directions cardinales de l'espace de simulation, et cela attire la population riche dans ces directions.

Quant à l'aménité qui borde la ville d'un côté, on voit qu'elle attire à elle toute la population riche ainsi qu'une partie de la population pauvre, et qu'elle fait augmenter les prix des logements qui sont proches d'elle. Elle fait augmenter les distances parcourues, mais également la densité (et fait baisser la surface totale urbanisée). Cela peut paraître contradictoire mais est dû au fait qu'elle concentre toute la population d'un côté de la ville. Elle fait également augmenter fortement les rentes.

6. PERSPECTIVES

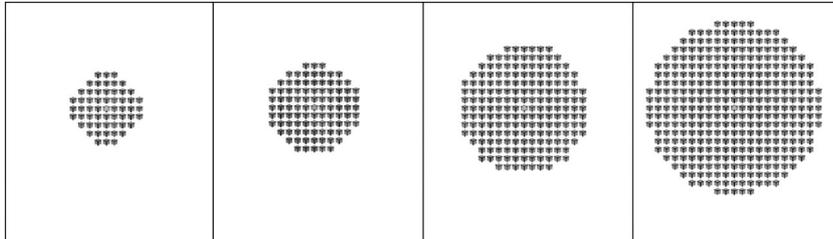
Ce travail offre de nombreuses perspectives d'évolution grâce à la flexibilité des systèmes multi-agents. Nous en présentons quelques-unes ici.

6.1. Evolution historique et aménités endogènes

Cette perspective a déjà été partiellement réalisée, comme le montre la figure 16. Son but est d'étudier l'évolution historique d'une ville

Figure 16 (voir le hors-texte en couleurs)

Evolution historique d'une ville comportant des aménités endogènes liées à la présence des quartiers riches



« semi-ouverte », où la population augmente au cours du temps, avec l'arrivée de nouveaux agents, mais où on garde le mécanisme d'évolution du modèle de ville fermée décrit précédemment. On introduit de plus une aménité endogène liée aux cases où vivent les ménages « riches » : ces endroits deviennent de plus en plus attractifs, alors que les cases où vivent les agents « pauvres » ne présentent pas une telle aménité. Lorsque les agents « riches » sont plus sensibles à ces aménités endogènes que les agents « pauvres », on peut voir émerger une ville de type « européen » comme celle présentée sur la Figure 16. Cette différence de préférence pour les aménités peut bien sûr être reliée à la différence introduite dans la section précédente.

Au début de la simulation, la population de la ville est dix fois moins élevée qu'à la fin, et on n'introduit pas d'aménité endogène, de sorte que la ville a une structure « nord-américaine ». La structure « européenne » émerge au cours du temps, les agents « riches » gagnant progressivement les enchères au centre.

6.2. Calage du modèle

Le calage du modèle multi-agents sur des données empiriques est également une perspective de ce travail. En choisissant des valeurs réalistes des paramètres (revenu, coût de transport, rente agricole, etc.), on veut pouvoir obtenir des résultats (densités, surfaces de logement, taille de la ville, etc.) correspondant à ce qui peut être observé empiriquement. Pour l'instant, le calage du modèle est rendu impossible par l'absence de construction en hauteur. Tous les agents vivent au niveau du sol, et les densités simulées ne peuvent donc pas s'approcher des densités réelles, et en conséquence la taille des villes simulées non plus. Pour permettre le calage du modèle, il faut donc introduire un mécanisme de construction du logement, qui représentera le calcul économique des promoteurs immobiliers en déterminant la surface de

logement disponible dans chaque case (et donc le coefficient d'occupation du sol). De tels modèles ont été introduits de manière analytique par Muth (v. Fujita, 1989).

6.3. Centres d'emplois endogènes

Enfin, l'introduction de firmes qui emploient les agents permettrait de rendre les centres d'emplois endogènes, et donc d'étudier également les facteurs qui influencent la localisation des firmes. Pour cela, un nouveau type d'agents doit être introduit pour représenter les entreprises, qui se concurrencent entre elles et concurrencent les ménages pour l'occupation du sol. Les entreprises cherchent à travers leur choix de localisation à maximiser leur profit, alors que les ménages veulent maximiser leur utilité. De tels modèles analytiques (de villes unidimensionnelles) sont décrits dans Fujita et Thisse (2003).

CONCLUSION

Ce travail montre l'intérêt de la simulation multi-agents dans l'étude des phénomènes collectifs par les sciences humaines et sociales. Avec l'exemple 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 élaborer un mécanisme d'interaction entre agents qui va dans le sens de l'obtention de l'équilibre, ce qui peut être vu comme un enrichissement par rapport au modèle d'équilibre analytique puisqu'on peut 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 n'avaient à notre connaissance pas encore été étudiés analytiquement pour une ville circulaire, à savoir l'influence sur la localisation des agents d'un polycentrisme ou d'aménités introduits de manière exogène. Ces résultats sont peu intuitifs puisque l'introduction de plusieurs centres d'emplois ou d'aménités a des effets multiples, à la fois sur la forme de la ville, les rentes, les surfaces d'habitation, la densité et les distances parcourues. Et ces effets ne sont en général pas les mêmes sur des populations d'agents hétérogènes.

Des éléments d'explication quant aux sources de différences entre formes spatiales de ségrégation à l'intérieur des villes ont été apportés. Notamment deux cas types peuvent provoquer le basculement d'une ville où le centre est « pauvre » à une ville où le centre est « riche » :

celui où les coûts temporels de transport jouent un rôle important, et celui où existe une aménité centrale pour laquelle les « riches » auraient plus de préférence que les « pauvres ». Dans ce dernier cas, on retrouve l'argument de Brueckner *et al.* (1999) qui lie la localisation des ménages à plus hauts revenus à cette préférence pour les aménités centrales. Cependant, la question reste pendante de l'émergence et la caractérisation de ces aménités centrales (sur cet aspect d'endogénéisation des aménités, cf. Tivadar et Jayet, 2006).

En outre, on ne voit pas ce qui justifie *a priori* une différence de préférence pour les aménités entre « riches » et « pauvres », mais cette hypothèse est centrale pour expliquer la ségrégation. Nos simulations montrent que quand tout le monde a la même préférence pour l'aménité et que celle-ci est centrale, la forme standard est inchangée (« pauvres » au centre et « riches » à la périphérie). Ce n'est qu'en introduisant une différence de préférence, même faible, que l'inversion apparaît.

Avec des indicateurs de bilan économique (niveaux d'utilité atteints), environnemental (distances parcourues) et social (inégalités entre « riches » et « pauvres »), il est possible de donner des éléments de diagnostic sur les différentes formes urbaines. Par exemple nos simulations suggèrent que la multiplication des centres d'emplois permet d'augmenter les utilités, de diminuer les distances parcourues et de réduire la différence d'utilité entre « riches » et « pauvres », bien que la ville s'étale.

Concernant les aménités, l'introduction d'une aménité (pour laquelle tout le monde a la même préférence) au centre ou dans la ville, a tendance à compacter cette dernière, donc à réduire les distances parcourues. Plus l'aménité s'éloigne de la ville, plus elle attire des « riches » et plus les distances parcourues s'accroissent, dégradant alors le bilan environnemental. En outre, la combinaison d'une différence de préférence pour l'aménité et d'un écart de celle-ci au centre d'emplois (par exemple vers l'ouest), crée une ségrégation très nette entre « riches » et « pauvres » du type ouest-est. Enfin, nous montrons également qu'une aménité, par exemple environnementale, entourant la ville à une certaine distance va contribuer à étaler celle-ci tout en augmentant les distances parcourues et l'utilité des « riches » qui résident en périphérie. De même, une aménité côtière peut contribuer à augmenter les distances parcourues, les rentes et l'utilité des « riches » qui ont tendance à résider vers la côte.

Le modèle développé permet de manipuler facilement les agents individuellement ou collectivement, de modifier les règles de comportement ou l'environnement, 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 permet d'apporter des éléments de réponse aux questions que peuvent se poser les aménageurs urbains.

Références bibliographiques

- Bruckner J.K., Thisse J.F., Zenou Y., 1999, Why is central Paris rich and downtown Detroit poor ? An amenity-based theory, *European Economic Review*, 43, pp. 91-107.
- Fujita M., 1989, *Urban Economic Theory*, Cambridge University Press.
- Fujita M., Thisse J.F., 2003, *Economie des villes et de la localisation*, De Boeck.
- Goffette-Nagot F., Thomas I., Zenou Y., 2000, Structure urbaine et revenu des ménages. In : Baumont C., Combes P.P., Derycke P.H., Jayet H. (ed.), 2000, *Economie géographique. Les théories à l'épreuve des faits*, Economica, pp. 276-302.
- Leroy S.F., Sonstelie J., 1983, Paradise lost and regained : transportation innovation, income, and residential location, *Journal of Urban Economics*, 13, 1, pp. 67-89.
- Tivadar M., Jayet H., 2006, Endogenous amenities and the spatial structure of cities, *46th Congress of the European Regional Science Association*, Volos, Greece.
- Wheaton W.C., 1977, Income and urban residence : an analysis of consumer demand for location, *American Economic Review*, 67, 4, pp. 620-31.
- Wu J.J., Plantinga A.J., 2003, The influence of public open space on urban spatial structure, *Journal of Environmental Economics and Management*, 46, pp. 288-309.

CHAPITRE 12

S-GHOST : UN MODÈLE D'AUTO-ORGANISATION DE L'ÉTALEMENT URBAIN ET DU RÉSEAU DE TRANSPORT

Geoffrey Caruso (Université du Luxembourg et CORE, Louvain-la-Neuve),

Jean Cavailhès (INRA, Dijon),

Pierre Frankhauser (laboratoire ThéMA, Besançon)

Dominique Peeters (CORE, Louvain-la-Neuve),

Isabelle Thomas (CORE, Louvain-la-Neuve)

Gilles Vuidel (Laboratoire ThéMA, Besançon)

geoffrey.caruso@uni.lu

Ce chapitre présente un modèle de simulation de l'expansion d'une ville vers son *hinterland* ainsi qu'un calibrage de ce modèle. Le concept choisi pour la modélisation représente l'espace à travers une logique proche de celle d'automates cellulaires et introduit un modèle multi-agents pour décrire le comportement des individus. Le modèle s'intéresse à l'auto-organisation de l'espace par trois usages : les résidences, les espaces ouverts et le réseau de transport. Il possède deux caractéristiques majeures : d'une part il est établi sur des fondements microéconomiques, et d'autre part, il fait émerger conjointement le réseau routier et une urbanisation résidentielle de type périurbain. Il donne ainsi lieu à des morphologies urbaines complexes qui peuvent être reliées aux variables décisionnelles des acteurs principaux de l'urbanisation que sont les ménages. Une plateforme informatique a été développée pour les soins du modèle en question, dont l'acronyme S-GHOST signifie « Self-Generating Housing Open Space and Transportation ».

1. EMERGENCE CONJOINTE D'UNE FORME URBAINE ET D'UN RÉSEAU DE TRANSPORT

L'espace périurbain est « stylisé » ici comme une zone mixte constituée d'espaces bâtis et non bâtis et située à la périphérie d'une ville-centre. Les ménages qui s'y installent recherchent des aménités « vertes », coproduits de l'activité des agriculteurs. Les ménages sont par ailleurs liés au centre ville car ils y trouvent leur emploi et y effectuent la majorité de leurs dépenses. Ils endurent donc un coût de transport lié à l'éloignement du centre, mais bénéficient par ailleurs d'un cadre paysager ouvert et naturel. Ce double mécanisme de proximité aux aménités vertes et d'éloignement par rapport à un centre d'emploi est un élément essentiel pour comprendre l'étalement urbain et ses différentes formes plus ou moins discontinues (v. par exemple les modèles de Cavailhès *et al.*, (2004a, 2004b) ou Caruso *et al.* (2007)).

La maîtrise de l'étalement urbain est un enjeu majeur aujourd'hui. D'un point de vue environnemental, la discontinuité des espaces résidentiels conduit notamment à un allongement des trajets et/ou à une fragmentation des espaces naturels. D'un point de vue économique et social, J.K. Brueckner (2000) note que l'étalement urbain s'accompagne de défaillances de marché qui sont liées à la valeur des espaces verts, à la congestion, et aux surcoûts des infrastructures induits par la dispersion des nouvelles habitations. L'étalement urbain apparaît donc ainsi comme excessif, cette sous-optimalité nécessitant alors l'application de politiques publiques. Nombreuses sont aujourd'hui les autorités publiques qui mettent en avant la densification des espaces résidentiels. Il paraît difficile pourtant de convaincre des ménages d'une densification de leur environnement résidentiel, s'ils ont choisi d'éviter la densité (Breheny, 1997 ; Gordon et Richardson, 1997). T. Schwanen *et al.* (2004) soulignent que les ménages tendent à choisir des lieux résidentiels qui minimisent la distance ou le temps d'accès aux différents espaces qu'ils fréquentent (travail, commerces, loisirs) mais voient dans la densification un risque d'obtenir l'effet inverse de celui escompté, c'est-à-dire une relocalisation des ménages vers des zones moins denses.

Plus encore lorsque l'on considère la terminologie anglo-américaine de l'étalement urbain discontinu, soit *grosso modo* le concept d'*urban sprawl*, la dispersion et ses aspects négatifs sont mis en évidence, ainsi que le caractère atomisé et non coordonné des décisions des acteurs (Galster *et al.*, 2001). Si l'on considère l'espace périurbain et ses formes complexes, comme émergeant de la séquence

temporelle d'une multiplicité de décisions individuelles non-coordonnées, l'approche multi-agents apparaît ainsi comme une méthode particulièrement adéquate. Une démarche possible, celle que nous considérons ici, consiste alors à simuler un ensemble d'actions individuelles et à évaluer l'organisation de l'espace qui en résulte selon certains critères, pour ensuite analyser l'évolution de ces critères suite à des changements de paramètres comportementaux ou (plus tard) de politiques publiques.

La démarche multi-agents prend tout son sens lorsque les interactions sont multiples et s'inscrivent à travers le temps et l'espace, rendant difficile, voire impossible une analyse uniquement mathématique des résultats. En géographie et en économie urbaine, les interactions entre agents sont généralement inversement liées à la distance qui sépare ces agents. Pour appréhender la croissance urbaine, il y a d'une part l'effet de forces qui s'exercent selon la distance par rapport à un centre : les forces centripète (emploi au centre et coût de transport y afférant) et centrifuge (rente foncière). Elles forment le cœur de l'économie urbaine standard (Fujita, 1989). D'autre part il y a également des interactions de voisinage ou à plus courte distance. Ces interactions ont été formalisées en économie depuis M.J. Beckmann (1976) et M. Fujita (1982). M. Fujita et J.F. Thisse (2002) présentent une synthèse de ces modèles appliqués aux firmes. M.A. Turner (2005) et G. Caruso *et al.* (2007) montrent qu'ils s'appliquent également aux ménages, en expliquant la formation d'espaces périurbains mixtes par des forces locales de dispersion (goût pour des aménités vertes) et d'agglomération (goût pour des relations sociales de voisinage).

Dans les travaux de G. Caruso *et al.* (2007) un modèle dynamique urbain est développé qui montre comment des structures d'urbanisation plus ou moins fragmentées émergent des préférences des ménages pour la dispersion ou l'agglomération locale. Ce modèle est cependant uniquement cellulaire et ne comprend pas de réseau de transport. Dans les travaux de J. Cavailhès *et al.* (2004a), un modèle d'équilibre est présenté qui utilise une morphologie (fractale) et un réseau de transport exogènes. Le modèle qui est présenté ici veut aller plus loin que les deux précédents en endogénéisant la forme du réseau de transport tout en restant dans un canevas dynamique qui permet de faire émerger des espaces bâtis et non-bâtis par l'effet d'interactions locales. L'intérêt du modèle se porte ainsi à la fois sur l'attractivité des espaces verts et sur la forme du réseau de transport.

Il nous apparaît intéressant de lier les deux aspects. En effet, d'une part deux des défaillances de marché mentionnées par J.K. Brueckner (2000) sont liées au réseau (coût des infrastructures et congestion) la

troisième à la présence d'espaces agricoles. D'autre part les interactions entre forme du réseau et forme de l'urbanisation et de l'accès aux espaces verts sont mal connues. Intuitivement pourtant on perçoit que ces deux aspects sont liés. Citons simplement pour exemple le *Restriction of Ribbon Development Act* édicté en Angleterre en 1935 afin de prévenir la formation de longs rubans d'urbanisation le long des voies de transport majeures sortant des villes. La sous-optimalité de ce type de croissance urbaine est déjà mise en évidence à l'époque et justifie la réglementation. Ainsi J.J. Clarke (1936) caractérise ces développements linéaires en rubans entre autre par (traduction de l'anglais) « des coûts inutiles liés à la provision de services », « l'interférence de la route avec les aménités par le masquage de la vue de la campagne », ou plus loin de conclure qu'il est « très déplaisant que la beauté de la campagne [...] soit ruinée par la méthode désorganisée, disgracieuse, et très dangereuse du développement en rubans ».

Nous nous intéressons donc à la génération conjointe du réseau et de l'urbanisation parce qu'elle peut mener à des morphologies inefficaces au sens où le réseau et les trajets peuvent être de longueur excessive et des espaces verts, source d'aménités, laissés inaccessibles.

Dans ce chapitre, nous présentons le modèle qui est une adaptation des travaux de G. Caruso *et al.* (2010) (point 2). Surtout nous présentons ici un calibrage du modèle pour obtenir des éléments comparables à la situation de trois villes moyennes françaises. Les modèles multi-agents comprennent souvent un grand nombre de paramètres. Certains sont inobservables et l'espace de leur variation est souvent mal connu, d'où la difficulté de les calibrer. Si la littérature est riche de nouveaux modèles multi-agents, la recherche sur les méthodes de calibrage de ces modèles mais aussi les analyses de sensibilité restent rares. L'applicabilité des modèles multi-agents en dépend. Nous proposons ici un calibrage sous la forme d'un choix raisonné de valeurs de paramètres. Nous sommes guidés pour cela par la minimisation d'une fonction d'erreur entre les prédictions du modèle et la réalité (point 3). A partir de ce calibrage, nous effectuons une série de simulations pour en évaluer la robustesse et mesurer la sensibilité des formes émergentes aux paramètres clés du modèle (point 4).

2. S-GHOST : UN MODÈLE SPATIAL ET DYNAMIQUE AUX FONDEMENTS MICRO-ÉCONOMIQUES

Nous exposons tout d'abord les éléments essentiels à la compréhension du fonctionnement global du modèle S-GHOST (point 2.1) et du rôle des différents agents (point 2.2). Nous renvoyons aux travaux de

G. Caruso *et al.* (2007) pour plus de détails sur le comportement des agents, et pour les hypothèses micro-économiques et le lien avec l'économie urbaine standard, ainsi qu'à Caruso *et al.* (2010) qui analyse les changements de morphologie urbaine obtenus au gré des paramètres de préférence. Le point 2.3 expose les critères choisis pour évaluer la morphologie résultante.

2.1. Espace et fonctionnement global du modèle.

Soit une région (carrée) au centre de laquelle se trouve un centre (*Central Business District*, CBD) au croisement de deux routes fédérales perpendiculaires. Le centre et les deux routes sont exogènes. La région est divisée en « cellules » carrées de surface identique Ω^2 . Le CBD occupe une cellule ; chaque route nationale a une largeur d'une cellule et s'étend jusqu'au bord de la région. A l'état initial toutes les autres cellules sont en usage agricole.

Au cours du temps, des cellules agricoles sont converties en habitations ou en routes locales. Chaque cellule peut donc prendre trois états : agricole (vert, non-bâti), résidentiel, ou route. Les deux premiers sont à usage privé (respectivement des agriculteurs et des ménages) et le dernier est un espace public ouvert à tous. Par simplification, nous considérons que tous les autres usages du sol, en particulier les services urbains publics (écoles, etc.) et privés (commerces, etc.) sont intégrés dans l'espace public des routes.

Comme l'espace, le temps est discret : à chaque itération arrive un « paquet » de ménages dont le nombre permet de convertir une cellule agricole en un usage résidentiel. Les ménages arrivent du « reste du monde » si et seulement si cette migration augmente leur utilité (bien-être). Ils choisissent leur localisation résidentielle au sein de la région étudiée de manière individualiste afin de maximiser leur utilité sous la contrainte budgétaire que cette localisation impose (coût de transport et coût foncier). Ils calculent donc, pour chaque cellule de la région, l'enchère foncière qu'ils sont prêts à payer compte tenu des avantages et des coûts. Les agriculteurs ont leur propre enchère foncière (uniforme dans toute la région). Les résidents et les agriculteurs sont en concurrence pour l'espace et les propriétaires affectent les cellules considérées au plus offrant. L'équilibre économique se réalise donc sur le marché foncier.

Nous imposons par ailleurs que chaque cellule résidentielle soit reliée au centre urbain par un réseau routier. A chaque étape, une autorité publique s'assure que le nouveau site résidentiel construit pour accueillir des migrants borde une rue, qui elle-même est reliée au

réseau routier pré-existant. Le cas échéant l'autorité publique construit de nouvelles routes en expropriant des agriculteurs. Pour payer ces expropriations, un impôt est levé (cf. point 2.2.3). Nous appliquons donc ici un comportement « de suiveur » à l'autorité publique qui par la construction de routes, accompagne simplement la demande résidentielle. Sans autre règle urbanistique contraignante, le système est donc auto-organisé suivant la demande résidentielle, laquelle répond à une logique microéconomique individualiste.

La conversion à un usage résidentiel ou routier est irréversible (technologie dite *putty-clay*). Par contre, la surface des lots d'habitation à l'intérieur d'une cellule résidentielle dépend du résultat du programme de maximisation de l'utilité des ménages sous la contrainte budgétaire. Le mécanisme d'ajustement de la rente foncière classique en économie urbaine permet l'égalisation des utilités atteintes dans les différentes cellules résidentielles ; nous parlerons d'« équilibre de court terme ». Cette utilité commune varie au cours du temps, principalement du fait de l'accroissement du coût de transport lorsque la population augmente. Il en résulte que la surface des lots varie également (technologie dite *putty-putty* : on suppose que la taille des lots déjà existants s'ajuste à chaque étape). Dans la réalité, la destruction de quartiers urbains pour les rendre à un usage agricole est exceptionnelle car les coûts de démolition sont prohibitifs (d'où l'hypothèse *putty-clay* pour le premier aspect). Par contre, la surface des logements est relativement flexible si l'on considère les fusions ou divisions d'appartements, les destructions et reconstructions d'immeubles anciens (d'où l'hypothèse *putty-putty* pour le second aspect). En France, le taux d'évolution des nouveaux logements entre 1990 et 1996 est ainsi assez élevé : de 15,4 % dans les villes et de 19 % dans les ceintures périurbaines (selon une exploitation par les auteurs des Enquêtes Logement de l'INSEE).

Du fait d'une utilité tendanciellement décroissante, il existe un moment où malgré les bénéfices qu'un ménage peut tirer de la meilleure localisation dans la ville, les coûts de cette localisation seront trop élevés et l'utilité qu'il en tirera sera moindre que dans le « reste du monde ». A ce moment les migrations s'arrêtent, la ville cesse de grandir, le système a alors atteint un « équilibre de long terme ». C'est la morphologie de cet équilibre que nous observerons et mesurerons dans la suite de ce chapitre. Contrairement à la plupart des modèles d'automates cellulaires urbains, la population finale de la ville est ici endogène.

2.2. Le comportement des agents

2.2.1. Les agriculteurs

Les agriculteurs, tous identiques, sont en concurrence sur le marché foncier avec les ménages qui arrivent du Reste du Monde. Ils produisent, selon des rendements d'échelle constants (il en découle que leur nombre et la taille de leurs exploitations sont indéterminés), un bien agricole vendu en dehors de la région ainsi qu'un coproduit : des espaces ouverts et paysages verts. Ils payent à des propriétaires fonciers absentéistes une rente foncière agricole, R_a , constante dans toute la région et à travers le temps.

2.2.2. Les ménages

Les ménages, tous identiques également, supportent un coût de migrations alternantes domicile-travail vers le CBD où sont localisés les emplois. Nous supposons, pour simplifier, que les marchés des biens et du travail n'ont pas d'impact sur l'équilibre économique, qui se réalise donc sur le seul marché foncier. Les ménages sont en outre sensibles à leur voisinage. Le voisinage leur procure de l'utilité lorsqu'il comporte des espaces ouverts, des paysages verts, tels qu'ils sont produits par les agriculteurs. Pour réduire le nombre de paramètres à calibrer, nous ignorons dans cette version du modèle (contrairement aux travaux de G. Caruso *et al.*, 2007, 2010) que la densité locale procure également des contacts sociaux et des biens publics locaux (services publics administratifs, culturels, récréatifs, etc.). Comme expliqué précédemment, une partie de ces biens publics se trouvent répartis dans l'espace des routes. Ils ne sont donc pas ignorés mais considérés comme ubiquistes.

Formellement, les ménages maximisent une fonction d'utilité, U , de forme Cobb-Douglas, sous une contrainte budgétaire :

$$\max U = \kappa Z^{1-\alpha} H^\alpha E^\delta \quad [1]$$

$$s/c Y - \tau - \theta d = Z + RH \quad [2]$$

où $Z > 0$ est le panier de la ménagère, dont le prix est utilisé comme numéraire (norme tous les autres prix). Il est composé de tous les biens marchands sauf le terrain résidentiel, $H > 0$ est la consommation de bien résidentiel, $E > 0$ est l'externalité verte (interaction agriculteur – ménage), $\kappa = \frac{1}{\alpha^\alpha (1-\alpha)^{(d-\alpha)}}$ est une constante. Les exposants expriment les préférences des ménages, avec $0 < \alpha < 1$ et $\delta \geq 0$, $Y > 0$ est le revenu des ménages, $\tau \geq 0$ est un impôt que nous détaillons plus loin,

$\theta > 0$ le coût unitaire de transport, $d \geq 0$ est la distance jusqu'au CBD par le réseau, et $R \geq R_a$ est la rente foncière résidentielle par unité de surface.

L'externalité verte intervient dans le programme des ménages de la façon suivante. Nous supposons que les ménages apprécient la présence d'aménités vertes, donc des cellules non urbanisées, près de leur résidence (Bolitzer et Netusil, 2000 ; Hobden *et al.*, 2004), jusqu'à une certaine distance au-delà de laquelle ils n'y sont plus sensibles. Il s'agit donc d'une aménité de voisinage, vue depuis chez soi, sans que l'on prenne en compte d'éventuelles aménités plus lointaines qui supposeraient un déplacement pour s'y rendre. Soit $\hat{W} > 0$, le rayon de la fenêtre du voisinage que prennent en compte les ménages pour évaluer la qualité de leur voisinage. Nous définissons la densité résidentielle au voisinage de x , ρ_x , comme le rapport entre le nombre de cellules résidentielles comprises dans le rayon \hat{W} et le nombre total de cellules comprises dans le rayon \hat{W} à l'exclusion de celles affectées au réseau de routes. L'externalité verte est définie comme une fonction exponentielle négative de la densité, soit $E = e^{-\rho}$. En outre le migrant au temps t se base sur la densité observée en $t-1$ pour prendre sa décision. Il est myope et n'anticipe pas les changements futurs de son voisinage.

Le programme décisionnel des ménages conduit à une enchère foncière résidentielle ψ pour chaque cellule de la région, qui est la rente foncière maximale que les ménages sont prêts à payer (Fujita, 1989). Du programme de maximisation de la fonction d'utilité sous la contrainte budgétaire, on obtient pour la période t

$$\psi^t = (Y - \tau^t - \theta d)^{1/\alpha} \bar{U}^{-1/\alpha} e^{-\delta \rho^{\tau-1}} \quad [3]$$

où \bar{U} est l'utilité que les ménages peuvent obtenir dans le « reste du monde ».

Comme chez M.A. Turner (2005) ou chez G. Caruso *et al.* (2007), le paquet d'immigrants est tel qu'une seule cellule agricole est convertie à chaque itération, ce qui leur permet de mettre en concurrence plusieurs propriétaires fonciers qui offrent des localisations procurant la même utilité : le marché foncier est en déséquilibre, avec une concurrence par les prix (« à la Bertrand »). Plus précisément, la rente effectivement payée au propriétaire de la cellule convertie au temps t est égale à la rente agricole d'opportunité R_a plus la différence entre l'utilité de la meilleure et de la seconde cellule agricole (comme par exemple chez M.A. Turner, 2005).

Les ménages peuvent migrer sans coût entre toutes les cellules nouvellement ou anciennement développées, ce qui conduit à une

égalité de leur utilité U^t à celle obtenue par le dernier paquet de ménages arrivés. Cette égalisation est obtenue par un ajustement des rentes foncières résidentielles (voir l'équilibre de court terme de G. Caruso *et al.*, 2007). Nous appelons R_x^t la rente résidentielle en t du site x :

$$R_x^t = (Y - \tau^t - \theta d_x)^{1/\alpha} (U^t)^{-1/\alpha} e^{-\delta p_x^t} \quad [4]$$

Tant que cette concurrence permet aux ménages d'empocher un surplus d'utilité, c'est-à-dire tant que $U^t > \bar{U}$ un incitant à la migration demeure et la ville croît. L'équilibre de long terme est atteint lorsque $U^t = \bar{U}$.

Enfin on note que la taille des lots résidentiels en x au moment t se déduit de l'équation de la rente :

$$H_x^t = \frac{\alpha(Y - \tau^t - \theta d_x)}{R_x^t} \quad [5]$$

2.2.3. L'autorité locale et l'impôt

L'autorité publique construit le réseau de routes locales de façon à connecter les nouvelles cellules résidentielles. Il suit simplement la demande. Il place les routes selon une règle simple : en minimisant le nombre de cellules agricoles à convertir et donc à exproprier. Si plusieurs chemins correspondant à cette règle sont possibles, le choix du chemin est fait au hasard. Comme les ménages, l'autorité locale est myope (n'entrevoit pas le futur), ce qui est une hypothèse réaliste face à un phénomène de croissance urbaine auto-engendrée, qui s'apparente à un phénomène chaotique. En effet, il semble impossible d'anticiper la forme urbaine au-delà de quelques pas de temps.

Outre la localisation des routes, l'autorité est responsable de leur financement.¹ Pour indemniser les propriétaires expropriés elle lève donc un impôt τ auprès de tous les résidents. Nous posons que ces propriétaires sont indemnisés par une rente annuelle égale à la moyenne des rentes foncières des cellules voisines. L'impôt τ , prélevé sur les habitants de la ville, est calculé de manière à financer exactement ces indemnités. Il varie donc dans le temps en fonction de la

1. L'entretien et le coût de construction des routes ne sont pas considérés dans ce modèle, qui reste à un niveau élevé d'abstraction. Dans la mesure où les « routes » intègrent les biens publics locaux (écoles, hôpitaux, etc.), il faudrait intégrer leur coût de construction et de fonctionnement à celui du réseau routier proprement dit, ce qui est impossible.

taille du réseau, des rentes et du nombre de ménages qui la paient. Nous avons :

$$H_x^t = \frac{\alpha(Y - \tau^t - \theta d_x)}{R_x^t} \quad [6]$$

où M^t est le nombre de ménages dans la ville au temps t . k indice les cellules routières et \bar{R}_k^t est la rente foncière moyenne autour de la cellule k au temps t . Le voisinage considéré est identique à celui de l'externalité verte, et donc de rayon \hat{W} . Cette moyenne prend en compte les cellules résidentielles pour lesquelles la rente par unité de surface R_x^t est multipliée par la taille des lots H_x^t et le nombre de logements mais aussi les cellules agricoles, pour lesquelles la rente R_a est multipliée par la surface Ω^2 .

2.3. Mesurer la ville

Afin de comparer les formes urbaines obtenues pour diverses valeurs des paramètres, nous analysons la morphologie de l'équilibre de long terme et l'expansion spatiale de l'habitat. Outre un examen visuel des résultats nous considérons également une série d'agrégats : la population totale (POP), la surface résidentielle en km^2 (SRES), la densité nette moyenne (POP/SRES), la distance maximale (en km) du développement résidentiel (DMAX), la surface des espaces verts (SVERT) présents à l'intérieur du rayon DMAX et sa valeur rapportée à l'espace résidentiel (SVERT/SRES), ainsi que la longueur totale des routes (ROUTE), qui peut être rapportée au nombre d'habitants (ROUTE/POP, en mètres par habitant).

Pour être plus complet dans l'évaluation, il faudrait accompagner ces mesures d'un examen du bien-être global ou du surplus socio-économique de la ville. Il faudrait, pour cela, poser de nouvelles hypothèses théoriques. Dans le cadre que nous venons d'exposer, qui est celui d'une « ville ouverte », au sens de l'économie urbaine, le surplus éventuel d'une politique publique échoit aux propriétaires fonciers, puisque les ménages ont la même utilité exogène \bar{U} à l'équilibre de long terme : ils ne sont pas les bénéficiaires de cette politique. Dans le cadre d'une « ville fermée », dont la population serait donnée et où l'utilité serait endogène, ils obtiendraient une plus ou moins grande utilité selon la politique publique. Sur ces aspects, dont la discussion dépasse l'objet de ce chapitre (Fujita, 1989).

3. LE CALIBRAGE : VERS UNE REPRÉSENTATION ABSTRAITE D'UNE VILLE FRANÇAISE MOYENNE

Les paramètres exogènes du modèle sont Y , R_a , α qui sont observables dans le monde réel (le programme microéconomique montre que α est égal à la part du logement dans le budget des ménages), θ et \hat{W} qui peuvent être obtenus à dire d'experts, Ω^2 , la taille des cellules imposée par le modélisateur, et \bar{U} et δ qui sont inobservables. Les variables endogènes essentielles du modèle sont les caractéristiques des lieux : R_x , H_x et ρ_x ainsi que les variables globales telles que le nombre total de ménages M et les autres agrégats mentionnés ci-dessus.

Plutôt qu'un calibrage *sensu stricto*, nous proposons ici un choix raisonné pour les paramètres exogènes du modèle qui sont observables ou déductibles facilement de données statistiques (point 3.1), et la minimisation d'une fonction d'erreur pour les deux paramètres inobservables du modèle \bar{U} et δ (point 3.2). L'objectif est d'obtenir une simulation de référence (point 3.3) qui offre un certain niveau de réalisme, ce qui permettra ultérieurement de simuler l'effet de politiques publiques. Dans ce chapitre, nous examinons la sensibilité de la simulation de référence à une variation des paramètres \bar{U} et δ afin d'apprécier la qualité de notre calibrage et l'effet de ces deux paramètres clé sur la morphologie émergente (point 4).

3.1. Les paramètres exogènes observables

3.1.1. Les sources

Les principales informations concernant le marché foncier proviennent d'une exploitation des bases de données notariales pour les aires urbaines de trois villes moyennes françaises : Besançon, Brest et Dijon pour lesquelles 6 078 ventes de terrains à bâtir sont utilisées. Ces données foncières sont complétées par des données de l'INSEE pour ce qui concerne le budget des ménages, la population des communes, etc. L'extraction des données relatives à chaque paramètre est explicitée ci-dessous (les données monétaires sont exprimées en €2008, l'indice des prix du PIB étant utilisé comme déflateur).

3.1.2. Les valeurs

Le revenu des ménages, Y , peut être obtenu de deux bases de données. Selon les données du Ministère du Budget français, le revenu annuel par foyer fiscal après imposition s'élève à 22 250 € dans les trois

aires urbaines, c'est-à-dire 26 900 € par ménage (il y a 1,21 foyer fiscal par ménage). Ce chiffre étant lié à l'imposition, il est très probablement sous-estimé. Selon l'Enquête ménage de l'INSEE, le revenu brut annuel d'un ménage qui achète un logement dans des aires urbaines similaires (c'est-à-dire dont la ville centre compte entre 100 000 et 200 000 habitants) s'élève à 31 000 €, ce qui représente approximativement 29 600 € après imposition. Nous retenons une valeur de 29 000 € par an et par ménage.

La rente agricole, R_a , est issue du prix moyen d'un hectare de terre agricole qui s'élève en France à 3 000 €. Soit selon un taux d'actualisation de 5 % une rente annuelle de 0,015 €/m²/an, à laquelle il faut ajouter les coûts de viabilisation de la terre agricole pour la rendre constructible, qui sont des coûts techniques (découpage en parcelles résidentielles, raccordement aux réseaux, etc.) et de transaction (frais commerciaux et marges de l'aménageur et du lotisseur, impôts et taxes, etc.). Ces frais sont bien supérieurs à la rente agricole proprement dite. Nous retenons une valeur de 0,09 €/m²/an, soit un total de 0,105 €/m² pour la rente d'opportunité annuelle.

Le paramètre α représente la part de la consommation de terrain à bâtir dans le budget des ménages. A partir des données foncières des trois aires urbaines considérées, nous obtenons une part médiane de 6,3 %. Cette valeur peut sembler faible eu égard au poids du logement dans le budget des ménages, mais il faut rappeler qu'il ne s'agit que du terrain à bâtir. Le coût de la construction est intégré au terme a -spatial Z de la fonction d'utilité, ce qui est raisonnable car ce coût est peu sensible à la distance (le prix des matériaux de construction et le salaire des travailleurs sont *footloose*).

Le paramètre θ est le coût généralisé d'un km de transport. Il constitue la somme d'un coût monétaire direct, évalué par l'Administration des Finances française à 0,40 € du km et d'un coût d'opportunité du temps de transport, évalué à dire d'experts à 0,15 € par minute. En considérant un aller-retour, une vitesse moyenne calculée à partir d'une enquête Logement de l'INSEE, 1,5 travailleurs par ménage et 200 jours de travail par an, nous obtenons un coût annuel généralisé de 330 €/km. Cette évaluation ne prend pas en compte une éventuelle sous-estimation du coût du temps de transport par les ménages.

Enfin, l'externalité de voisinage est basée sur la densité de cellules agricoles dans un rayon donné. Ainsi que nous l'avons indiqué, dans la mesure où il n'y a pas de coût de déplacement vers l'aménité verte, la taille de cette fenêtre (\hat{W}) doit rendre compte des biens vus par les habitants. Ces biens sont les espaces agricoles et verts qui constituent

l'aménité essentielle du modèle et sont susceptibles d'expliquer l'étalement urbain. A leur propos, Caruso et al. 2007 notent que c'est la très proche proximité qui importe, soit la contiguïté directe (v. Thorsnes, 2002 ; Hobden *et al.*, 2004 ; Mooney et Eisgruber, 2001 ; Earnhart, 2006), quelques centaines de mètres (400 m chez Geoghegan *et al.*, 1997 ; 600 m chez Tyrvaïnen et Miettinen, 2000 ; 500 m chez Bolitzer et Netusil, 2000) ou un ou deux kilomètres au maximum (Geoghegan *et al.*, 1997). En ce qui concerne la France, J. Cavailhès *et al.* (2009) obtiennent, selon les variables paysagères considérées, un rayon de 70 à 280 m autour de chaque maison.

Cependant, il peut être judicieux également de tenir compte de biens fréquentés au voisinage du domicile, qui n'engendrent pas de coût de déplacement mais qui procurent des aménités vertes. Il peut s'agir de jardins ou parcs, de golfs ou de forêts récréatives, etc. La distance pertinente pour ces biens est supérieure à celle de la vue proprement dite. B.L. Mahan *et al.* (2000) obtiennent des prix hédonistes positifs pour des zones humides situées en moyenne entre un demi et trois km des habitations (selon leur type), et L. Tyrvaïnen et A. Miettinen (2000) montrent que les forêts récréatives influencent les valeurs foncières jusqu'à une distance d'un km.

Finalement, sachant que la résolution de nos cellules est choisie à 730 m après un calibrage grossier (cf. point 3.2.2) nous utilisons pour la fenêtre de voisinage $\hat{W} = 3$, soit une distance d'interaction (d'externalité) de 2 190 m.

3.2. Les paramètres exogènes inobservables

3.2.1. La méthode

La méthode consiste ici à trouver les valeurs de \bar{U} et δ de façon à minimiser une fonction d'erreur par rapport à ce que l'on peut observer du profil des rentes et de la taille des lots fonciers avec l'éloignement au centre pour les trois aires urbaines considérées. La formalisation de ce terme d'erreur est inspirée par Anas et Kim (1992). Nous considérons en outre qu'une aire urbaine (aire de migration alternante) de ce type couvre une population de 250 000 personnes habitant des maisons individuelles. En effet, le modèle ne tient pas compte de la population logée dans des immeubles collectifs. Nous considérons que ces derniers occupent une surface punctiforme au CBD. Les données du recensement de population de 1999 permettent de calculer que la population des maisons individuelles des trois aires urbaines considérées est d'environ 250 000 habitants.

Ainsi nous visons à minimiser la moyenne, E , de trois termes d'erreur : E_R (erreur selon le profil des rentes), E_H (selon le profil des lots) et E_p (selon la population totale), formalisés comme suit :

$$E = (E_R + E_H + E_p)/3 \quad [7]$$

$$E_R = \sqrt{\sum_d \frac{n_d^o}{\tilde{n}^o} \frac{(R_d^m - R_d^o)^2}{R_d^{o^2}}} \quad [8]$$

$$E_H = \sqrt{\sum_d \frac{n_d^o}{\tilde{n}^o} \frac{(H_d^m - H_d^o)^2}{H_d^{o^2}}} \quad [9]$$

$$E_p = \sqrt{\frac{(P^m - P^o)^2}{P^{o^2}}} \quad [10]$$

où P^m est la population totale des maisons individuelles de l'aire urbaine modélisée, $P^o = 250\,000$ est la population moyenne vivant dans des maisons individuelles dans les trois aires urbaines retenues, R_d^m et H_d^m représentent respectivement la rente foncière et la taille des lots fonciers à une distance d générées par le modèle, R_d^o et H_d^o sont la rente foncière et la taille des lots observés dans la réalité.

Pour les erreurs E_R et E_H , un coefficient permet de donner un poids selon la fréquence des transactions à chaque distance. Il est égal au nombre de transactions de terrains à bâtir observées à la distance d du centre des trois aires urbaines, n_d^o , rapporté au nombre total de transactions de terrains à bâtir, \tilde{n}^o .

Dans le modèle comme dans la réalité, les rentes et lots fonciers varient pour une distance donnée selon des caractéristiques locales du modèle (volume de l'aménité agricole dans le voisinage) ou de la réalité (hétérogénéité de l'espace géographique, histoire de l'urbanisation). De plus, le nombre de points (sites résidentiels du modèle, nombre de transactions de terrains à bâtir) varie. Il n'est donc pas possible de faire des comparaisons point par point pour calculer les erreurs E_R et E_H . R_d^m , H_d^m . Dans la fonction d'erreur, R_d^o , H_d^o , R_d^m et H_d^m ne sont pas des observations réelles ou simulées mais des résumés statistiques. Ils sont le résultat de régression log-linéaires où les régresseurs sont des polynômes de degré deux en la distance à vol d'oiseau au CBD ainsi que, pour l'équation appliquée au monde réel, une série de variables de contrôle : le logarithme de la surface des lots (pour la

régression des valeurs foncières), la population, le revenu moyen des habitants de la commune, la date de la transaction et des variables binaires indicatrices des aires urbaines. Le taux d'actualisation utilisé pour annualiser le prix du terrain est de 5 %.²

3.2.2. Les valeurs calibrées

Un premier balayage grossier des paramètres de commande du calibrage, \bar{U} et δ , a été effectué par tâtonnement afin d'obtenir des résultats de modélisation acceptables comme représentation du monde réel. Les résultats de ces simulations ont été inspectés sous l'angle des trois éléments de l'erreur E , c'est-à-dire l'adéquation du profil des rentes, du profil des lots fonciers et de la population totale à l'équilibre de long terme. D'autres éléments, tels que l'éloignement maximum des maisons du CBD ou la rente foncière à l'origine, ont aussi été utilisés lors de ce calibrage grossier.

Une attention a également été portée lors de ce calibrage grossier à la taille du système et aux effets de bords. Nous adaptons par tâtonnement la résolution Ω des cellules et leur nombre, de façon à éviter tout effet de bordure tout en conservant une maniabilité informatique suffisante afin d'effectuer des analyses de sensibilité. C'est ainsi que nous utilisons une résolution de 730 m et que notre carré de simulation comprend 101 x 101 cellules (soit 50 de part et d'autre du CBD). Une simulation est effectuée en une à deux minutes.

A partir du calibrage grossier, nous avons pu isoler une fenêtre dans l'espace des valeurs possibles des paramètres au sein de laquelle une bonne correspondance avec les trois aires urbaines retenues pouvait être obtenue. Cet espace de paramètre ($20\,000 \leq \bar{U} \leq 23\,500$ et $0,0 \leq \delta \leq 0,5$) a fait l'objet d'une analyse systématique de l'erreur moyenne E à travers 240 simulations. Les résultats sont détaillés au Tableau 1.

Ce tableau montre la convexité de l'erreur à la fois en fonction du paramètre de préférence δ pour un \bar{U} donné et aussi (même si c'est de façon moins marquée) en fonction du paramètre \bar{U} pour un δ donné. Un minimum local (non en coin) est donc observable sur cette surface. Il est obtenu lorsque $\bar{U} = 21\,500$ et $\delta = 0,30$. Nous choisissons ce minimum comme situation de référence (simulation "benchmark").

2. Les résultats de ces régressions sont disponibles sur demande.

Tableau 1

Erreur quadratique moyenne (E) calculée suivant la population, le profil des rentes et le profil des lots fonciers. Balayage et minimisation selon l'utilité externe (\bar{U}) et la préférence pour les espaces verts (δ)

Erreur quadratique moyenne (E) selon la population et le profil des rentes et des lots fonciers

U δ	20000	20500	21000	21500	22000	22500	23000	23500
0,00	>10	>10	>10	>10	>10	>10	5,2368	2,1580
0,02	>10	>10	>10	>10	>10	9,0224	3,8228	1,5238
0,04	>10	>10	>10	>10	>10	6,6928	2,7676	1,0647
0,06	>10	>10	>10	>10	>10	4,9424	1,9837	0,7314
0,08	>10	>10	>10	>10	8,7440	3,6246	1,4073	0,4945
0,10	>10	>10	>10	>10	4,5943	1,5862	0,5431	0,2128
0,12	>10	>10	>10	7,6441	3,2065	1,1296	0,3633	0,1561
0,14	>10	>10	>10	3,9941	2,0059	0,5694	0,2192	0,1131
0,16	>10	>10	6,0247	2,3823	1,0352	0,3341	0,1132	0,1197
0,18	>10	5,5314	3,5248	0,8343	0,4343	0,1278	0,1238	0,1726
0,20	>10	5,4836	1,9320	0,7457	0,2288	0,1142	0,1248	0,1894
0,22	7,4004	3,0684	0,9386	0,3412	0,1414	0,1176	0,1491	0,2290
0,24	3,6048	1,8998	0,6334	0,2604	0,1148	0,1358	0,1757	0,2446
0,26	2,7626	1,0404	0,3720	0,1428	0,1162	0,1521	0,1969	0,2667
0,28	2,2642	0,8271	0,2974	0,1260	0,1205	0,1552	0,2277	0,2797
0,30	1,4163	0,5778	0,1751	0,1119	0,1523	0,1840	0,2308	0,2850
0,32	0,6786	0,1651	0,1125	0,1388	0,1810	0,2335	0,2749	0,3235
0,34	0,2928	0,1316	0,1239	0,1582	0,2026	0,2494	0,2896	0,3322
0,36	0,1659	0,1124	0,1366	0,1657	0,2159	0,2711	0,3063	0,3300
0,38	0,1633	0,1219	0,1581	0,1955	0,2379	0,2684	0,3084	0,3271
0,40	0,1130	0,1342	0,1695	0,2023	0,2396	0,2823	0,3123	0,3336
0,42	0,1303	0,1414	0,1733	0,2218	0,2377	0,2939	0,3225	0,3522
0,44	0,1172	0,1551	0,1838	0,2319	0,2521	0,2804	0,3194	0,3597
0,46	0,1352	0,1562	0,1841	0,2373	0,2709	0,3087	0,3257	0,3503
0,48	0,1316	0,1583	0,2137	0,2437	0,2611	0,2903	0,3386	0,3564
0,50	0,1488	0,1792	0,2127	0,2402	0,2832	0,3102	0,3332	0,3737

$E < 0,12$	$0,12 \leq E < 0,15$	$0,15 \leq E < 0,20$	$0,20 \leq E < 0,25$	$E \geq 0,25$
------------	----------------------	----------------------	----------------------	---------------

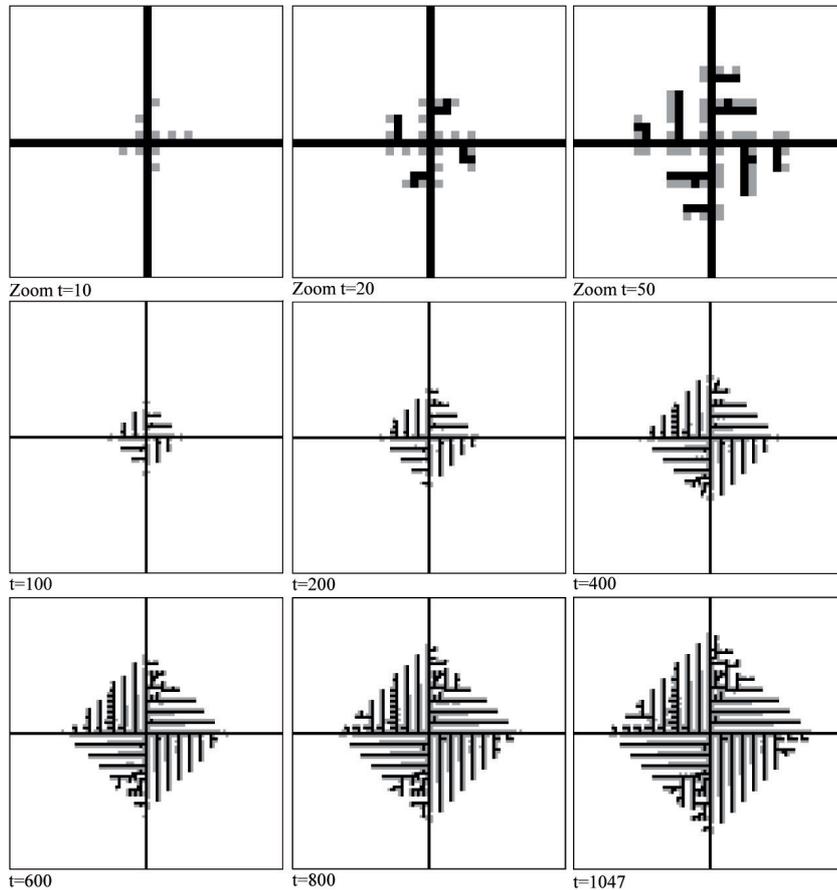
3.3. Morphologie et dynamique périurbaine de référence

La simulation résultant du calibrage des paramètres est présentée dans la Figure 1. L'équilibre final est atteint par l'urbanisation de 1 047 cellules ($t=1047$). Comme le montre le Tableau 2(a), la population totale est quasiment la population cible (252 331) et l'étalement de la ville atteint 27 km.

La Figure 2 montre que le calibrage sur les rentes est globalement satisfaisant vu le niveau d'abstraction du modèle. Bien que la rente à

Figure 1

**Evolution de l'urbanisation et du réseau routier au cours du temps
pour la simulation de référence**



Cellules noires = routes ; grises = résidences ; blanches = agriculture. La dernière image présente l'équilibre de long terme.

l'origine soit sous-estimée et que la rente en bordure du périurbain ait tendance à remonter (mais il y a de moins en moins de points pour estimer la dernière partie de cette courbe), l'ordre de grandeur est respecté ainsi que la pente du profil dans les 15 premiers km.

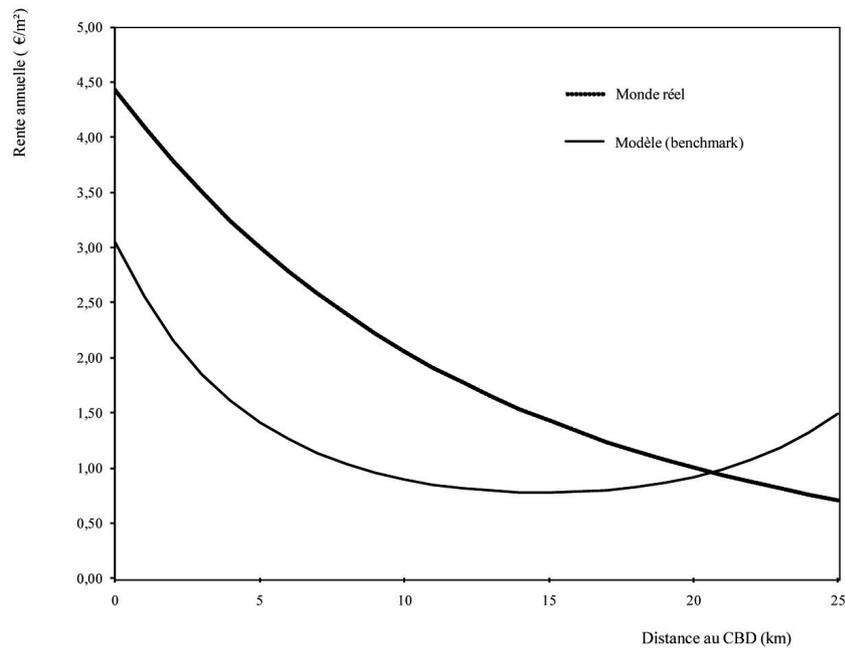
D'un point de vue morphologique, l'espace est périurbain dans le sens d'un espace mixte puisque se succèdent, ici à intervalles réguliers, des espaces résidentiels entrecoupés d'espaces verts. Au centre de la structure se succèdent une route, une cellule bâtie, une cellule verte, une cellule bâtie, une route, etc. Plus loin du centre la densité du bâti est plus faible et la largeur des espaces verts plus grande : une route,

Tableau 2
Caractéristiques agrégées des différentes simulations

	POP (habitants)	SRES (km ²)	POP/SRES (hab./km ²)	DMAX (km)	SVERT (km ²)	SVERT/SRES	ROUTE (km)	ROUTE/POP (m/hab.)
a) Benchmark (figure 1) (U=21500, d=0.30, W=730, q=330, Ra=0.105)	252331	558	452	27.02	1359	2.44	515	2.04
b) Aléas (Monte Carlo)								
Min	238568	549	429	27.02	1349	2.41	484	1,72
Max	283293	579	504	28.48	1383	2.91	525	2,12
Moyenne	261155	560	467	27.41	1369	2,57	500	1,92
Médiane	261915	558	468	27.02	1368	2,48	499	1,89
Ecart-type (%)	10890 4,17	6 1,16	17 3,71	0,63 2,29	8 0,59	0,18 6,83	11 2,24	0,12 6,05
c) Aménité verte (figure 3)								
d=0.08	2197096	171	12884	29.94	2645	15,51	0	0,00
d=0.10	1694546	386	4392	27.75	1898	4,92	185	0,11
d=0.14	1107036	633	1749	27.02	1359	2,15	412	0,37
d=0.20	599617	654	916	27.75	1375	2,10	534	0,89
d=0.40	132735	446	298	26.29	1369	3,07	488	3,68
d=0.60	98652	303	326	25.56	1388	4,59	496	5,02
d=0.80	77250	249	310	25.56	1456	5,84	475	6,15
d=1.00	56920	203	280	25.56	1537	7,57	428	7,52
d) Aménité verte et utilité d'opportunité (figure 4)								
d=0.40 U=20000	277405	661	420	31,40	1943	2,94	676	2,44
d=0.32 U=21000	255408	597	428	29,21	1660	2,78	580	2,27
d=0.24 U=22000	274349	539	509	26,29	1265	2,35	503	1,83
d=0.16 U=23000	280784	458	613	23,37	989	2,16	369	1,32

Figure 2

Comparaison du profil des rentes « observées » et « simulées » (benchmark)
Régressions de la rente sur des polynômes de degré 2 en la distance



une cellule bâtie, deux cellules vertes, une route, etc. D'un point de vue quantitatif, le Tableau 2(a) nous indique que la densité résidentielle nette est de 453 habitants par km^2 de surface résidentielle et qu'au sein du disque correspondant à ce rayon de 27 km il y a en moyenne 2,44 fois plus d'espaces verts que d'espaces résidentiels.

Le réseau est constitué d'une série de routes assez longues qui se développent perpendiculairement aux axes initiaux et qui se raccourcissent avec l'éloignement. Le réseau est plutôt linéaire même si quelques décrochages supplémentaires tendent à faire penser à des structures plus dendritiques. Le long du réseau on observe un développement continu en rubans. Le long des routes il y a en effet, à l'équilibre, très peu de discontinuités du bâti (*leapfrogs*) si ce n'est pour créer des accès routiers. Au total, les routes sont longues de 515 km, soit 2,04 mètres par habitant.

L'examen des itérations successives de la Figure 1 montre par contre que des sauts d'espaces verts (*leapfrogs*) sont très courants au cours de la croissance (cf. par exemple $t=10$). Le remplissage des cellules laissées vacantes se fait plus tard en partant du centre. Enfin nous n'observons pas de phases qualitativement différentes lors de la croissance mais un agrandissement régulier de la structure.

4. DE LA ROBUSTESSE ET DE LA SENSIBILITÉ DU MODÈLE

Nous souhaitons dans cette partie juger du niveau de confiance que l'on peut accorder à notre simulation de référence et au calibrage des paramètres. Sachant que notre modèle comprend deux éléments aléatoires visant à résoudre des *ex-aequos*, nous effectuons tout d'abord une analyse de Monte-Carlo en répétant la simulation de référence afin d'apprécier la moyenne et la variabilité des mesures agrégées (point 4.1). Ensuite, nous analysons l'effet de la variation des paramètres inobservables δ et \bar{U} autour des valeurs calibrées. Nous explorons de ce fait le tableau 1 plus en profondeur en analysant la morphologie et les agrégats résultant de différents couples (δ, \bar{U}) . Premièrement (point 4.2) nous examinons le tableau 1 à travers les lignes, c'est-à-dire à utilité donnée $\bar{U} = 21\,500$, pour appréhender le rôle de la préférence des ménages pour l'externalité verte. Ensuite (point 4.3) nous examinons le tableau à travers une variation conjointe de δ et \bar{U} de manière à rester proche de la valeur minimale de l'erreur. Nous suivons ainsi la diagonale grisée du tableau 1.

4.1. Le rôle des aléas de modélisation (*tie-breaks*) : un modèle quasi-déterministe

Le modèle se veut au maximum déterministe afin de bien apprécier le rôle de chacun des facteurs. Deux paramètres aléatoires sont néanmoins utilisés comme *tie-break* lorsque deux ou plusieurs choix sont équivalents. C'est le cas, premièrement, lorsque les migrants font face à deux cellules qui offrent exactement le même niveau d'utilité, et deuxièmement, lorsque l'autorité publique à le choix entre deux chemins de même longueur pour relier une nouvelle cellule urbaine.

Nous vérifions ici que ces aléas n'introduisent pas de variations qualitatives ni quantitatives des résultats en répétant 30 simulations de la situation de référence. Nous évaluons alors la valeur centrale et la variabilité des agrégats résultant du modèle.

Comme le montre le Tableau 2(a), les agrégats sont stables. La population totale moyenne s'élève à près de 261 155 habitants (notre cible étant 250 000 habitants). Un écart-type représente une variation de 4 % de cette population. Pour la longueur des routes par habitant (ROUTE/POP), un écart-type représente à peu près 6 % de variation par rapport à la moyenne. Les agrégats les plus stables sont l'emprise spatiale des cellules résidentielles (un écart-type pour SRES représente 1 % de la moyenne) et des cellules vertes (moins de 1 % pour SVERT). Le rapport des deux est plus sensible mais le mixte des espaces urbains et verts, caractéristique majeure du périurbain, est globalement une caractéristique stable. Nous concluons que les deux paramètres aléatoires n'ont pas d'effet perturbateur majeur sur nos simulations et que le modèle peut être considéré comme quasi déterministe.

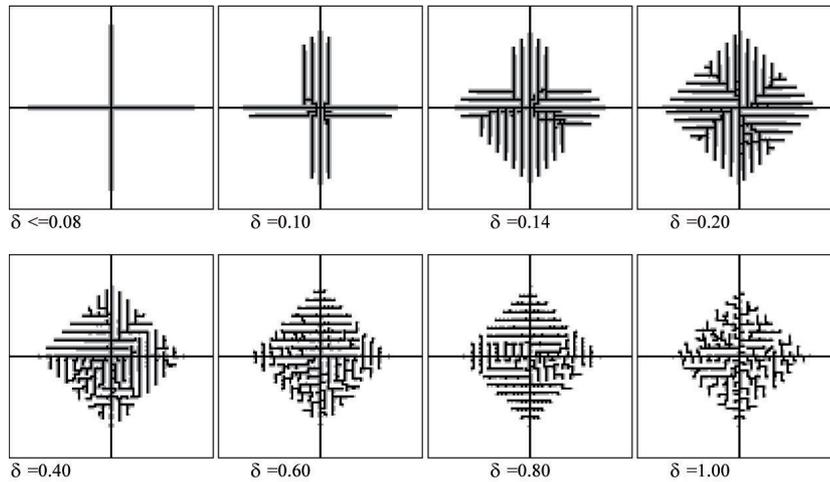
4.2. Le rôle de l'aménité verte : formes linéaires et dispersées

La Figure 3 présente les résultats d'une variation de δ autour de la valeur calibrée mais en tenant constante la valeur de \bar{U} (21500). Cette expérimentation montre ainsi l'effet d'une variation suivant les lignes du tableau 1 (à utilité du Reste du Monde donnée) et permet d'appréhender le rôle de l'externalité verte par rapport aux autres paramètres en jeu. Le Tableau 2(c) rapporte les effets de cette variation sur les agrégats urbains.

Il convient de constater tout d'abord que l'expansion spatiale de la ville se maintient assez bien indépendamment de δ (DMAX varie de 25 à 29 km), alors que la morphologie interne ainsi que la population varient fortement. Les petites différences de distance maximale sont dues essentiellement aux extensions du réseau, l'éloignement le long

Figure 3

Sensibilité de l'équilibre de long terme à un changement de la préférence des ménages pour les espaces verts (δ) autour de la simulation de référence ($\delta = 0.30$)



Cellules noires = routes ; grises = résidences ; blanches = agriculture.

des routes initiales étant plus stable encore. Cette expansion quasiment constante se déduit aisément du fait que lorsque la densité locale est presque nulle, donc à l'extrémité de la ville, l'enchère foncière est proche de celle du modèle standard d'Alonso (1964).

Concernant la population du modèle, elle s'éloigne très fortement de la réalité lorsque δ est faible. Les villes sont extrêmement compactes et s'étendent uniquement le long du réseau initial. On est dans la situation du modèle standard de l'économie urbaine où la fonction d'utilité ne fait pas intervenir d'aménités. La forme en croix, au lieu d'un disque compact est due d'une part, au coût de transport supplémentaire qu'impliquerait un décrochement latéral et, d'autre part, à l'irréversibilité de la construction qui ne permet pas de revenir vers des localisations plus centrales à des étapes ultérieures de la croissance. Cette situation persiste jusqu'au seuil $\delta = 0,08$ (rupture de phase).

Au-delà de ce seuil, l'aire urbaine se remplit de routes perpendiculaires et atteint la forme décrite plus haut pour la simulation de référence. La surface résidentielle (SRES) augmente à peu près jusqu'autour de $\delta = 0,20$. A partir de ce moment l'augmentation du paramètre conduit à la fois à une baisse des surfaces résidentielles et des densités (POP/SRES) tandis que la verdure proche des ménages augmente (SVERT/SRES). La forme devient aussi de plus en plus

dendritique, les *leapfrogs* demeurent dans le long terme et par conséquent le réseau routier par habitant (ROUTE/POP) devient très important. En résumé, l'externalité verte, permet dans un premier temps de « sortir » du modèle d'Alonso (1964) en provoquant des extensions surfaciques de l'habitat, et donc du réseau. Ensuite, une fois le disque correspondant à la distance maximale couvert dans toutes les orientations, l'augmentation de l'externalité apparaît clairement comme vecteur de fragmentation de l'espace et d'augmentation des coûts d'infrastructure par personne.

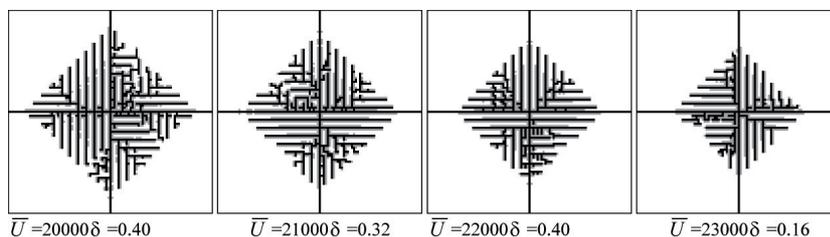
4.3. Le rôle conjoint de l'aménité verte et de l'utilité d'opportunité : minimisation de l'erreur du calibrage

Nous examinons enfin ici des configurations issue d'une variation conjointe de δ et \bar{U} de manière à rester proche de la valeur minimale de l'erreur (E), dans la logique de la méthode de calibrage.

Une lecture par colonne du Tableau 1 révèle tout d'abord que l'erreur quadratique moyenne est minimisée pour des valeurs de plus en plus faibles de ζ lorsque \bar{U} augmente (voir la forme en escalier de la partie grisée du tableau 1). Sachant que, d'une part, lorsque \bar{U} augmente, l'incitation à la migration est moindre et donc en principe la population de la ville diminue, et que d'autre part, nous venons de le voir, lorsque δ diminue, le modèle tend vers le modèle standard de l'économie urbaine sans externalités (le modèle d'Alonso, 1964), on en déduit que le modèle sera d'autant plus proche de la réalité pour des villes petites que leur morphologie sera plus linéaire. L'examen des configurations spatiales résultantes (Figure 4) permet d'affiner ce propos.

Figure 4

Equilibres de long terme obtenus pour des couples (δ, \bar{U}) proches de l'erreur minimale (minima de la colonne pour 4 valeurs de \bar{U} du Tableau 1)



Cellules noires = routes ; grises = résidences ; blanches = agriculture.

La Figure 4 présente les morphologies d'équilibre résultant de quatre couples (δ, \bar{U}) . L'erreur moyenne E y est à peine plus élevée que l'erreur du benchmark. Elle varie de $E = 0,1120$ à $E = 0,1148$, pour une valeur de $E = 0,1119$ dans le cas de la simulation de référence. Ces simulations sont donc des représentations du monde réel presque aussi acceptables que celle de la situation de référence. Visuellement elles présentent le même type de morphologie que la situation de référence. Du point de vue donc des morphologies périurbaines obtenues, la méthode de calibrage nous apparaît donc comme robuste.

La Figure 4 montre cependant aussi une diminution de l'expansion spatiale de l'aire urbaine lorsque \bar{U} est plus élevé et δ plus faible. Les agrégats reportés au Tableau 2(d) confirment cette tendance : la distance maximale de l'aire (DMAX) varie de 31 à 23 km et la surface résidentielle (SRES) passe de 661 à 458 km². La population totale par contre se maintient sans présenter de tendance claire. Dès lors puisque la population se maintient alors que l'espace résidentiel est réduit, les densités nettes moyennes augmentent (POP/SRES). Cette densification apparaît également par la diminution du nombre de routes par habitant (ROUTE/POP).

Puisque le rayon de la ville est réduit mais que les configurations morphologiques restent similaires, les surfaces vertes diminuent fortement avec l'augmentation de \bar{U} et la diminution de δ . Le rapport des surfaces vertes et résidentielles diminue également mais légèrement, la densification au sein des espaces résidentiels s'accompagne ainsi d'une densification de l'organisation spatiale. Cette diminution est cependant assez légère au vu de la variabilité de SVERT/SRES obtenue lors de nos simulations Monte-Carlo.

Au total, cette expérience montre que le calibrage est robuste du point de vue des morphologies. Il l'est moins du point de vue de l'expansion spatiale du fait que les densités ne sont pas prises en compte dans la fonction d'erreur³. Cela montre en outre que diverses simulations équivalentes en terme de fonction d'erreur et très proches du point de vue des aménités vertes, mais différentes du point de vue des densités, peuvent être générées par le modèle. Le modèle permet ainsi de réfléchir à des modes d'occupation du sol variés, peut-être souhaitables, qui vont plus loin que la simple dichotomie entre ville compacte et ville étalée.

3. Il serait difficile d'en tenir compte car, dans le modèle, les densités sont assez lissées quelle que soit la fenêtre de mesure alors que, dans la réalité des villes étudiées, l'habitat groupé en villages et bourgs périurbains fait alterner des zones densément peuplées séparées par de vastes espaces agro-forestiers, ce qui rend le calcul des densités sensible à la taille et à la position des fenêtres de mesure.

CONCLUSION

Dans ce chapitre nous avons exposé un modèle multi-agents, S-GHOST (« Self-Generating Housing Open Space and Transportation »), simulant l'étalement urbain. Ce modèle génère conjointement le réseau routier, les espaces résidentiels et les espaces verts au cours du temps. Des morphologies complexes émergent, résultant du choix de localisation résidentielle selon un comportement individualiste des ménages et de règles simples pour la mise en place du réseau de transport. Le modèle a des fondements micro-économiques ce qui permet d'interpréter les formes urbaines résultantes comme le résultat du programme économique des ménages, en particulier du *trade-off* entre le coût des déplacements et le bénéfice d'aménités vertes dans leur voisinage. Nous avons mis en évidence le rôle de la recherche d'aménités vertes sur la fragmentation de l'espace et sur la longueur du réseau de transport.

S-GHOST simule aussi un marché foncier. Nous avons utilisé cette qualité pour développer une méthode originale de calibrage qui compare notamment les profils des rentes foncières et tailles des lots résidentiels observés et simulés. Nous avons ainsi obtenu des paramètres de variables inobservables sur base de la situation de trois villes moyennes françaises. La stabilité du modèle à des variations aléatoires et la robustesse du calibrage (de la fonction de minimisation de l'erreur) ont été évaluées et sont satisfaisantes. Il n'en reste pas moins que le calibrage des modèles d'agents restent un problème compliqué et encore trop peu considéré dans la littérature. Comparativement, notre modèle contient assez peu de paramètres inobservables et les autres paramètres peuvent souvent être déduits à partir de valeurs monétaires ou physiques. La situation est donc relativement aisée, mais c'est au prix d'un niveau d'abstraction élevé du modèle.

Le calibrage ainsi réalisé résulte en une morphologie d'équilibre que l'on peut considérer comme typique d'un espace périurbain où les maisons se localisent l'une après l'autre, en ruban le long du réseau de transport, et où le réseau lui-même se structure de façon à laisser des espaces verts à l'arrière des parcelles résidentielles. Au cours de la croissance urbaine simulée, des sauts de parcelles vertes (*leapfrogs*) apparaissent, contribuant au mitage de l'espace. Au fil du temps la plupart de ces espaces sont cependant progressivement comblés.

La question de l'optimalité sociale et/ou environnementale des structures d'étalement urbain obtenues après calibrage et du besoin d'y appliquer des politiques publiques pour corriger des défaillances de marché (dus à l'externalité « verte ») constitue une suite logique à

ce chapitre et fera l'objet de recherches futures. La plateforme que nous avons développée permet en effet de mettre en place divers scénarios et d'évaluer les formes urbaines qui en résultent. Ces scénarios peuvent prendre la forme de zonages, visant par exemple à augmenter l'accessibilité ou protéger des espaces verts dans les zones les plus proches du centre ; de structuration du réseau de transport, par exemple par l'instauration d'un réseau polycentrique et/ou de « hubs » à partir desquels le temps de transport serait réduit ; ou plus simplement d'un système de taxes ou de subsides, par exemple affectant le coût unitaire de transport (péage urbain, taxe sur le combustible) ou une prime aux agriculteurs de façon à renforcer la présence des espaces verts. Les possibilités sont nombreuses et la présence dans le modèle de paramètres économiques et d'un lien avec le bien-être constitue des atouts particulièrement intéressants de notre modèle.

Enfin, outre son intérêt comme maquette permettant de simuler des scénarios d'aménagement, S-GHOST reste avant tout une plateforme de simulation visant à décoder des processus de morphogenèse complexes. Ces processus sont complexes du fait notamment des interactions entre réseau, espaces verts et densités résidentielles. Une analyse mathématique des relations causales entre ces niveaux est possible mais elle se heurte rapidement à la complexité de ces interactions. Le recours aux simulations est alors nécessaire. Les deux approches se complètent ainsi, ce qui n'est pas fréquent dans le domaine des sciences complexes où les relations simulées sont souvent des boîtes noires sans fondements théoriques ou analytiques rigoureux. En entreouvrant ces boîtes noires, il est possible de contribuer à la théorie relative aux processus de morphogenèse urbaine, qui est encore pauvre en particulier sur le rôle des interactions locales entre les différents agents et les usages du sol sur le développement bidimensionnel de la ville.

Références bibliographiques

- Alonso W., 1964, *Location and Land use*, Harvard University Press.
- Anas A., Kim I., 1992, Income distribution and the residential density gradient, *Journal of Urban Economics*, 31, 164-180.
- Beckmann M.J., 1976, Spatial Equilibrium in the dispersed City. In : Papageorgiou Y.Y., 1976, *Mathematical Land use Theory*, Lexington Books, pp.117-125.
- Bolitzer B., Netusil, N. R., 2000, The impact of open spaces on property values in Portland, Oregon, *Journal of Environmental Management*, 59, pp.185-193.
- Breheny M.J., 1997, Urban compaction : feasible and acceptable ? *Cities*, 14(4), pp. 209-217.
- Brueckner J.K., 2000, Urban sprawl : diagnosis and remedies, *International Regional Science Review*, 23 (2), pp.160-171.

- Caruso G., Peeters D., Cavaillès J., Rounsevell M., 2007, Spatial configurations in a periurban city. A cellular automata-based microeconomic model, *Regional Science and Urban Economics*, 37 (5), pp. 542-567.
- Caruso G., Vuidel G., Cavaillès J., Frankhauser P., Peeters D., Thomas I., 2010, Morphological similarities between DBM and a microeconomic model of sprawl, *Journal of Geographical Systems*, à paraître.
- Cavaillès J., Brossard T., Foltête J.C., Hilal M., Joly D., Tourneux F.P., Tritz C., Wavresky P., 2009, GIS-based hedonic pricing of landscape, *Environmental and Resource Economics*, 44, 4, pp. 571-590.
- Cavaillès J., Frankhauser P., Peeters D., Thomas I., 2004a, Where Alonso meets Sierpinski : an urban economic Model of a fractal metropolitan Area, *Environment and Planning A*, 36, pp. 1471-1498.
- Cavaillès J., Peeters D., Sekeris E., Thisse J.F., 2004b, The periurban city. Why to live between the City and the Countryside ?, *Regional Science and Urban Economics*, 34(6), pp. 681-703.
- Clarke J.J., 1936, Restriction of Ribbon Development Act, *The Town Planning Review*, 17, 1, pp. 11-32
- Earnhart D., 2006, Using contingent pricing space and its duration analysis to value open space at residential locations, *Land Economics*, 82(1), pp.17-35.
- Fujita M., 1989, *Urban economic theory. Land use and city size*, Cambridge University Press, 366 p.
- Fujita M., Ogawa H., 1982, Multiple equilibria and structural transition of non-monocentric urban configurations, *Regional Science and Urban Economics*, 12, pp. 161-196.
- Fujita M., Thisse J.F., 2002, *Economics of agglomeration*, Cambridge University Press, 466 p.
- Galster G., Hanson R., Ratcliffe M., Wolman H., Coleman S., Freihage J., 2001, Wrestling sprawl to the ground, *Housing Policy Debate*, 12, 4, pp. 681-717
- Geoghegan J. L., Wainger A., Bockstael N. E., 1997, Spatial landscape indices in a hedonic framework : an ecological economics analysis using GIS, *Ecological Economics*, 23, pp. 251-264.
- Gordon P., Richardson H.W., 1997, Are compact cities a desirable planning goal ?, *Journal of the American Planning Association*, 63(1), pp. 95-106.
- Hobden D., Laughton G.E., Morgan K., 2004, Green space borders. A tangible benefit ? Evidence from four neighbourhoods in Surrey, British Columbia, 1980-2001, *Landscape and Urban Planning*, 21, pp. 129-138.
- Mahan B.L., Polasky S., Adams R.M., 2000, Valuing urban wetlands : a property price approach, *Land Economics*, 76(1), pp. 100-113.
- Mooney S., Eisgruber L.M., 2001, The influence of riparian protection measures on residential property values : the case of the Oregon plan for salmon and watersheds, *Journal of Real Estate Finance and Economics*, 22 (2-3), pp. 273-286.
- Schwanen T., Dijst M., Dieleman F.M., 2004, Policies for urban form and their impact on travel : the Netherlands experience, *Urban Studies*, 41, 3, pp. 579-603
- Thorsnes P., 2002, The value of suburban forest preserve : estimates from sales of vacant residential building Lots, *Land Economics*, 78 (3), pp. 426-441.
- Turner M.A., 2005, Landscape preferences and patterns of residential development, *Journal of Urban Economics*, 57, pp. 19-54.
- Tyrvaïnen L., Miettinen A., 2000, Property prices and urban forest amenities, *Journal of Environmental Economics and Management*, 39, pp. 205-23.

Remerciements. Ce modèle a été développé dans le cadre du projet ECDESUP (« L'évaluation, le choix et la décision dans l'usage des espaces urbains et périurbains »), financé par le programme ANR du Ministère Français de la Recherche.

CHAPITRE 13

DYNACITÉ : SIMULATION DES JEUX D'ACTEURS PAR LA DYNAMIQUE DES SYSTÈMES

Valérie Gacogne

Complexio
10B avenue des Gobelins – 75005 Paris
valerie.gacogne@complexio.info

Ce projet de recherche¹ a été financé par l'ADEME² dans le cadre de l'appel à propositions lancé par le PREDIT 3 « Mobilité, territoires et développement durable ». Dans ce chapitre, nous rappelons le contexte dans lequel s'est inscrit ce projet, qui a conduit à la construction d'un modèle de Dynamique des Systèmes baptisé DYNACITÉ. Sa conception, les principes de base de la méthodologie utilisée y sont présentés, ainsi que les premiers enseignements tirés, grâce aux simulations et aux présentations qui en ont été faites auprès de techniciens des collectivités et d'élus. Les choix effectués pour représenter la dynamique périurbaine, en plaçant au centre la notion d'« attraction relative » de la commune par rapport à son environnement, sont également expliqués. A la base de cette technique de modélisation, un travail d'abstraction de la réalité, des choix sur son mode de représentation doivent être réalisés. Ce travail permet ainsi de formaliser le « modèle verbal » et de concevoir le modèle informatique. Des variables de nature qualitative (appelées communément *soft variables* en anglais) peuvent jouer ainsi un rôle essentiel, sans pour autant négliger la dimension quantitative du modèle. Le modèle a été appliqué, à titre expérimental, à une commune périurbaine de l'aire urbaine lyonnaise, située aux limites actuelles de la Communauté urbaine du Grand Lyon. Nous verrons qu'il peut être utilisé par des acteurs

1. Cette contribution s'appuie sur le rapport final du projet rédigé par les partenaires : Complexio (V. Gacogne, responsable scientifique du projet) et Interface Transport (P. Bossin et S. Dhervé). Le rapport téléchargeable à l'adresse suivante : www.complexio.eu

2. Projet financé par l'ADEME – Marché n° 0704C0013 (projet réalisé entre juillet 2007 et septembre 2008).

locaux comme outil d'aide à la décision. Ce type de modèle a aussi vocation à être utilisé dans le cadre de politiques publiques, comme outil de prospective, dans la mesure où il permet d'identifier des leviers d'action et de tester l'efficacité de mesures en simulant des scénarios variés et nouveaux (jamais expérimentés par le passé). Certains résultats et développements possibles ultérieurs sont discutés en conclusion.

1. LA PÉRIURBANISATION : UNE NOUVELLE FORME URBAINE

Depuis les années d'Après-guerre, la forme urbaine s'est profondément transformée. L'exode rural, qui attira en ville de nombreuses populations des campagnes à la recherche de travail et de conditions de vie meilleures, a obligé la ville à trouver des espaces à sa lisière pour implanter de nouvelles zones résidentielles. Les grands ensembles collectifs des années cinquante ont constitué la première étape de cette extension.

Mais, dès la fin des années 1960, le flux démographique s'est inversé avec l'apparition, autour des villes, du phénomène de périurbanisation, consacrant l'installation de populations urbaines dans les zones périphériques et rurales. Ce processus a présenté et présente encore la particularité de se réaliser en discontinuité spatiale avec la ville : les zones pavillonnaires sont disséminées dans un cadre champêtre, ce qui a incité G. Bauer et J.M. Roux (1976) à parler de « rurbanisation » et de « ville éparpillée ». Les auteurs ont mis clairement en évidence un bouleversement dans l'organisation de la forme urbaine, la continuité du bâti ne constituant plus un critère suffisant pour s'assurer être toujours dans la ville. On assiste à un desserrement géographique de la population et des activités mais qui sont toujours reliées par les infrastructures de transport au centre urbain. L'urbain devient ainsi beaucoup plus difficilement saisissable.

1.1. Un phénomène entretenu ?

La périurbanisation a été identifiée comme un « mal » des agglomérations modernes, entraînant un étalement urbain peu favorable à une mobilité collective et dégradant de ce fait le bilan environnemental des déplacements. Dans ce contexte, tous les documents de planification territoriale semblent s'accorder aujourd'hui sur la nécessité de lutter contre ce phénomène. C'est l'esprit de la loi Solidarité et renouvellement urbain (SRU) de 2001 qui souhaite, par divers outils (SCOT, PLU), concilier politique d'urbanisme et politique des transports ; les

SCOT et autres inter-SCOT devant notamment aider à régler ce problème. Pourtant, le nombre de permis de construire³ ne cesse d'augmenter en frange d'agglomération, perpétuant le phénomène de périurbanisation. Comment expliquer les dysfonctionnements du système ?

L'empilement des niveaux territoriaux et institutionnels, les jeux d'acteurs, leurs intérêts divergents seraient autant de facteurs de nature à expliquer l'inefficacité des politiques initiées au niveau national. Dit plus prosaïquement, la demande locale, la volonté des communes d'attirer des populations, en vue par exemple de maintenir des salles de classe, pèseraient davantage que le respect du Facteur 4⁴. Mais, que dire de la réalisation de voiries routières performantes qui favorise, *a fortiori*, en l'absence de lignes fortes de transport en commun, un habitat lointain et diffus ? Ou encore des politiques incitatives de l'Etat qui a mis en place des prêts aidés et orienté ainsi vers les périphéries les nouveaux accédants à la propriété ? Les compétences et le positionnement des institutions, dans une stratification imposante, induiraient des politiques dont la cohérence n'est pas toujours assurée, et des jeux d'acteurs complexes entretiendraient ainsi le phénomène de périurbanisation. Mais qu'en est-il véritablement ?

C'est dans ce contexte, et pour tenter de décrypter tous les paradoxes de ces jeux d'acteurs, qu'une approche systémique et la création d'un modèle de simulation dynamique ont été privilégiées. Pour mieux appréhender le phénomène, un terrain d'application a également été choisi, celui de l'aire urbaine lyonnaise, et au sein de celle-ci, les dynamiques de la population d'une commune périurbaine, Lissieu, ont été simulées sur un horizon de 30 ans, en proposant divers scénarios.

1.2. Périurbanisation de l'aire urbaine lyonnaise

La périurbanisation est un phénomène relativement complexe. Pour mieux l'appréhender, l'aire urbaine lyonnaise a été choisie comme territoire d'étude, et le modèle a été appliqué à une commune périurbaine de l'aire urbaine lyonnaise, Lissieu, située aux limites actuelles de la communauté urbaine du Grand Lyon. Outre le travail d'étude et de recherche réalisé préalablement à la construction du modèle, nous avons tenu, pour ce projet de recherche, à impliquer dès le démarrage des élus et personnes directement concernés par les

3. Voir les fichiers SITADEL

4. En référence aux objectifs français de réduire par quatre les émissions de gaz à effet de serre à l'horizon 2050 (ou plus exactement par 3,6 sur la base des émissions liées aux consommations énergétiques en 2000).

questions de périurbanisation et par ses enjeux ; comme ce fût le cas pour le maire de la commune de Lissieu.

L'aire urbaine lyonnaise est le territoire le plus important en termes de population et d'emplois en France après la région parisienne, mais on y observe un desserrement de la population, qui a essentiellement eu lieu entre 1954 et 2004 (sur la base des données de recensement). On constate ainsi que, de 1954 à 1968, la population a augmenté principalement au centre de l'aire urbaine. Puis, on observe un étalement de la population, qui peut s'apparenter à une « vague », partant du centre de l'aire urbaine et se diffusant progressivement vers l'extérieur, et plus particulièrement vers l'est de Lyon. Parallèlement, on note une diminution relativement forte de la population dans le centre de Lyon entre 1968 et 1982, ce phénomène a perduré les années suivantes mais il s'est atténué. S'il est toutefois moins soutenu aujourd'hui, l'éparpillement de la population semble se diffuser sur un territoire plus vaste telle une « onde », dépassant ainsi le périmètre de l'aire urbaine de Lyon. Cette évolution de la population caractérise bien le phénomène d'étalement urbain qui a pu être constaté dans nombre d'aires urbaines.

Les pouvoirs publics ont tout intérêt à développer l'accessibilité des habitants aux zones d'activités, en améliorant la performance du réseau de transport. En effet, selon un rapport du Conseil d'analyse économique⁵, augmenter la vitesse des déplacements de 10 % augmenterait la productivité et la production de près de 3 %. Mais, cette logique doit rester cohérente avec un aménagement durable. Il faut éviter que les infrastructures de transport et les transports en commun n'engendrent un étalement urbain.

Aujourd'hui, le Grand Lyon réfléchit à cette problématique en étroite collaboration avec les acteurs concernés. Il est très difficile de lutter contre la périurbanisation qui au demeurant n'est pas à rejeter « d'un bloc », bien que certains de ses effets soient négatifs. Cette intercommunalité cherche plutôt à maîtriser l'étalement urbain, tout en développant un réseau ferroviaire qui augmenterait la performance du réseau de transport et, par conséquent, l'accessibilité des habitants au pôle urbain. En mettant en place des lignes fortes de trains express, les responsables veulent contenir l'urbanisation autour des gares. Les territoires hors de ces lignes auront ainsi un développement, *a priori*, limité. La question des parkings à mettre en place au niveau des gares est ainsi posée, car l'effet voulu, à savoir maîtriser l'étalement urbain,

5. Rapport de Michel Didier et Rémy Prud'homme, *Infrastructures de transport, mobilité et croissance*, décembre 2007.

pourrait être nul, voire à l'inverse amplifié, en incitant les habitants à venir en voiture jusqu'aux gares. On peut se demander comment réagissent les maires des communes concernées par cette proposition de développement.

1.3. Caractéristiques de la commune de Lissieu

La commune de Lissieu s'inscrit dans le contexte d'une périurbanisation choisie (au vu du revenu moyen des ménages). Il s'agit d'une petite commune située dans les Monts du Lyonnais, à 17 kilomètres au nord de Lyon, près de l'autoroute A6. Elle a intégré la Communauté de communes Monts-d'Or-Azergues, et se situe actuellement en dehors du Grand Lyon (Communauté urbaine de Lyon). Sa population est constituée de ménages à revenus plutôt aisés, se déplaçant en voiture pour aller travailler, principalement sur le Grand Lyon.

La commune comptait 3 125 habitants en 2004 d'après le recensement de l'INSEE. La population a connu une progression de 0,9 % depuis 1999 (+27 habitants). Les actifs représentent 48 % de la population, plus de 60 % d'entre eux travaillent hors de la commune dans le pôle urbain de Lyon. Ainsi, selon la définition de l'INSEE, Lissieu est une commune périurbaine puisque plus de 40 % des actifs qui y résident, travaillent dans le pôle urbain de Lyon. Aujourd'hui se pose la question pour la commune, d'intégrer ou non, la Communauté urbaine de Lyon ou de se tourner plutôt vers Villefranche-sur-Saône.

En 2004, l'ensemble des logements était constitué par près de 96 % de résidences principales, avec 85 % de ménages propriétaires. L'ensemble des résidences principales, dont le nombre de pièces a sensiblement augmenté entre les deux recensements (entre 1999 et 2004), est composé par près de 90 % de logements individuels⁶. Enfin la taille moyenne des ménages est de 2,9 personnes, et se situe ainsi au-dessus de la moyenne du département (2,4).

Enfin, cette commune périurbaine présente la particularité d'être directement concernée par le projet REAL (Réseau de trains express lyonnais) avec l'ouverture d'une gare prévue en 2010.

6. Lissieu n'est pas concernée, pour l'instant, par le seuil de 20% de logement sociaux imposé par la loi SRU, puisque la population est inférieure à 3 500 habitants.

2. CONCEPTION DU MODÈLE DE DYNAMIQUE DES SYSTÈMES DYNACITÉ

Le modèle de Dynamique des Systèmes DYNACITÉ a été développé à l'aide du logiciel VENSIMâ. Il comporte dans cette version initiale environ 280 variables. Pour ce travail de modélisation, nous nous sommes attachés à développer un modèle qui devait rester « simple » dans son mode de fonctionnement, sans pour autant être « simpliste », car il doit représenter de manière réaliste les comportements des acteurs. Ce travail de modélisation a donc consisté à représenter la réalité selon un mode d'abstraction permettant de répondre aux questions de recherche posées, tout en évitant les écueils d'une certaine complication qui est aussi directement liée à la question récurrente des limites à donner aux modèles.

Dans cette partie, nous allons expliciter le mode de fonctionnement du modèle qui a été conçu sur la base de deux notions centrales : celle de l'« attractivité relative de la commune » et celle de la notion d'« arbitrage » effectué par les différentes catégories d'individus. Ces choix de représentation – et ce mode d'abstraction – de la réalité ont été réalisés à partir d'un travail de synthèse et de réflexion basés sur les acquis de la recherche, en lien avec les questions de la périurbanisation et de la dynamique de l'urbanisation (en référence notamment à l'ouvrage *Urban Dynamics* de J.W. Forrester ; Forrester, 1969). Au préalable, les grands principes de la modélisation en Dynamique des Systèmes, la méthodologie utilisée pour ce modèle, sont présentés succinctement.

2.1. Méthodologie

La modélisation en Dynamique des Systèmes est née il y a 50 ans sous l'impulsion de J. W. Forrester au Massachusetts Institute of Technology (MIT), et bien qu'elle ait connu un certain succès suite aux travaux menés conjointement avec le Club de Rome (v. *World Dynamics*, 1971, puis *The Limits to Growth*, 1972⁷), l'apparition au cours de ces dernières années d'ordinateurs personnels, beaucoup plus puissants, l'a rendue nettement plus accessible⁸.

7. On trouve aujourd'hui l'ouvrage *Beyond the Limits* édité en 1992, et écrit par trois des mêmes auteurs (Meadows *et al.*, 1992). Nous pensons que l'ouvrage *Limits to Growth* a été traduit de manière incorrecte en français (sous le titre *Halte à la croissance ?*), et l'interprétation des résultats détournée.

8. Une communication informelle, en décembre 2009, de l'un des trois grands éditeurs de logiciels de Dynamique des Systèmes actuellement sur le marché avançait le chiffre approximatif de 250 000 utilisateurs dans le monde (la *System Dynamics Society* compte à cette date environ 1 000 membres actifs).

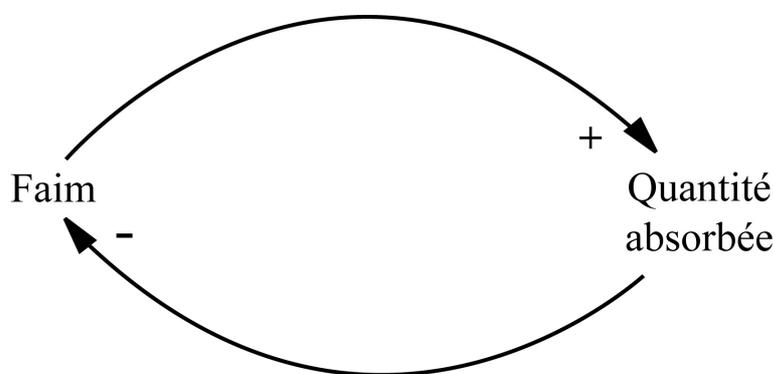
a. Quelques principes de Dynamique des Systèmes :
boucles de rétroaction et délais

Cette partie a pour objet d'introduire la modélisation en Dynamique des Systèmes, en mettant en avant l'origine de cette démarche, à savoir une perception de la réalité sous une forme « systémique » mettant en œuvre des mécanismes de rétroaction. L'un des principes de base consiste en effet à identifier les boucles de rétroaction (appelées aussi *feedback loops*) présentes dans tous les systèmes, quelle que soit leur nature (systèmes sociaux, économiques, écologiques, physiologiques, etc.). Les boucles de rétroaction sont schématisées sous la forme de diagrammes d'influence, encore appelés diagrammes causaux. Elles sont de deux sortes : elles peuvent être négatives, c'est-à-dire stabilisatrices (premier exemple ci-après), ou à l'inverse positives, c'est-à-dire amplificatrices. Dans certains cas, ces dernières seront qualifiées, en économie par exemple, de cercles vertueux ou vicieux (la spirale inflationniste en constitue un excellent exemple).

Dans le premier exemple, illustré dans la Figure 1, le fait de manger permet de combler sa faim, et cette action va conduire à faire disparaître, pour le moins temporairement, la cause qui se trouve à son origine. Il s'agit donc d'une boucle stabilisatrice ou régulatrice.

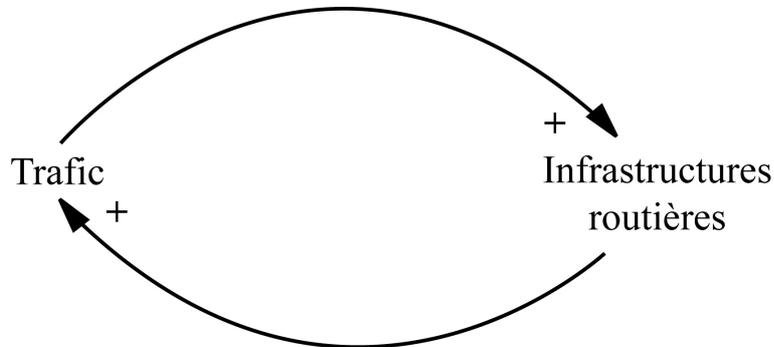
Figure 1

Un exemple de boucle de rétroaction négative (ou stabilisatrice)⁹



9. Le signe positif sur le diagramme indique que lorsque la variable « faim » croît, la quantité absorbée croît aussi. À l'inverse, le signe négatif indique que plus la quantité absorbée augmente, moins la sensation de faim se fait ressentir (en principe !). Si le nombre de signes négatifs est impair il s'agit alors d'une boucle négative, symbolisée ici par une balance.

Figure 2

Un exemple de boucle de rétroaction positive (ou explosive)

Dans le deuxième exemple (Figure 2), il s'agit d'une illustration d'un phénomène bien connu en économie des transports : le trafic induit. De manière un peu simplifiée, si une route est congestionnée aux heures de pointe et qu'une voie supplémentaire est construite, le trafic s'en trouvera fluidifié dans un premier temps (la vitesse augmente). Mais, progressivement, d'autres usagers qui n'empruntaient pas auparavant cette infrastructure vont être incités à l'utiliser, jusqu'à retrouver un niveau de congestion semblable. Il s'agit du trafic induit, c'est une conséquence de la création de nouvelles infrastructures routières, effet qui intervient avec « retard ». Dans le cas présent, le trafic conduit à construire plus d'infrastructures routières qui, à leur tour, génèrent du trafic. Il s'agit donc d'une boucle explosive ou amplificatrice (boucle simplifiée ici à l'extrême). Le délai est symbolisé sur le diagramme par deux petits traits sur la flèche, les retards dans les conséquences de certains événements constituent un autre élément essentiel de la Dynamique des Systèmes.

Ces phénomènes rétroactifs font intervenir des boucles multiples, négatives et positives, des relations dites « non linéaires »¹⁰, et le plus souvent des délais ou des retards qui augmentent la complexité d'évolution du système. Cette complexité est souvent à l'origine d'une mauvaise perception intellectuelle des phénomènes et de leurs conséquences, ou plus exactement d'une perception partielle. Nous avons, en effet, souvent tendance à ne considérer que les conséquences immédiates des événements, ceci étant vrai d'un point de vue temporel, mais aussi d'un point de vue spatial.

10. Il s'agit d'une relation de non proportionnalité entre la cause et l'effet, autre élément important de la Dynamique des Systèmes, mais que nous ne développerons pas ici.

d'influence qui peuvent conduire à des comportements dits explosifs ou amplificateurs ; le signe – indique au contraire que les variables évoluent en sens inverse (plus la « part des surfaces bâties » augmente, plus la « perception du cadre de vie vert » diminue), ce type de relation peut conduire à des comportements de régulation ou stabilisateurs.

Le « cadre de vie vert » de la commune périurbaine de Lissieu est susceptible d'attirer des familles désireuses de devenir propriétaires, et éligibles aux aides de l'Etat. Si la tendance se poursuit et que la demande est satisfaite au fil du temps (des surfaces sont disponibles pour ces constructions nouvelles de logements individuels), la part des surfaces vertes diminue progressivement jusqu'à réduire à terme cet aspect de l'attractivité de la commune. On comprend bien dans ce cas de figure que plusieurs acteurs interviennent, à au moins deux niveaux : l'Etat d'une part en accordant ces aides à l'accession à la propriété, et d'autre part la commune en décidant ou non de mettre à disposition des terrains et en accordant des permis de construire. Là encore, d'autres jeux sont à considérer. Les habitants de la commune sont aussi des électeurs, et peuvent se révéler plus ou moins tolérants quant à l'arrivée de nouveaux habitants, comme c'est aussi le cas en matière de construction de logements sociaux, en particulier selon la catégorie socioprofessionnelle ou le niveau moyen de revenu des habitants ; nous ne développerons pas plus ici ces différents jeux d'acteurs qui ont été simulés dans le modèle mais qui ne sont pas représentés sur ce diagramme simplifié.

Dans le cas de cette boucle (considérée isolément, elle prend naturellement part à un ensemble plus large d'interrelations), nous rencontrerons typiquement un phénomène de régulation ou de boucle causale stabilisatrice, correspondant souvent à des phénomènes de seuils ou de saturation tels qu'ils existent dans la réalité. Une tendance observée ne peut *a priori* pas se prolonger indéfiniment, dès lors que les ressources et le monde dans lequel nous vivons sont par nature finis. Des boucles de régulation « s'activent » lorsque ces seuils ou points de saturation sont atteints, les situations deviennent alors, selon les cas, réversibles ou non. Cette notion de ressources finies, dans l'exemple proposé ici correspond aux espaces verts qui disparaissent peu à peu au profit d'espaces bâtis (les interrelations que cela implique dans la répartition des espaces ne sont pas représentées pour ne pas surcharger le diagramme), et prend un sens particulier avec les préoccupations actuelles de développement durable (ou « soutenable » selon la traduction fidèle du terme anglais).

Le diagramme d'influence offre une « image » des interrelations existantes entre les variables, il représente ainsi de manière simplifiée

ce que sera la structure du modèle, mais il ne détermine pas *a priori* le comportement dynamique qui en résulte. Ce sont les simulations informatiques qui permettent de rendre compte de la dynamique du modèle et d'en expliciter les « rouages ». Pour ce faire, le diagramme de causalité ou d'influence, qui peut être décrit verbalement (on parle ainsi souvent de « modèle verbal »), est utilisé à la base de la conception du modèle de simulation informatique.

b. Du diagramme d'influence à la simulation informatique du modèle

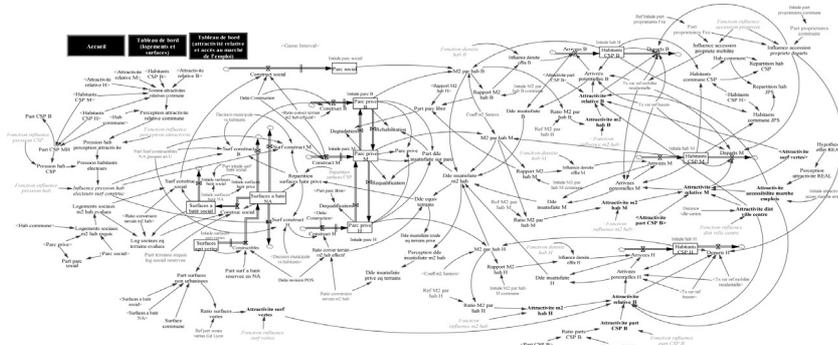
L'étude des systèmes complexes nécessite, pour en appréhender le fonctionnement au cours du temps, de réaliser des simulations informatiques. La modélisation en Dynamique des Systèmes distingue d'une part la structure du système, et d'autre part le comportement dynamique qui en résulte. La structure et les relations entre variables qui le composent sont représentées sous forme de diagrammes d'influence (cf. en illustration la Figure 3 précédente, extraite du diagramme d'influence de base du modèle DYNACITÉ).

La formalisation mathématique du modèle conduit ensuite à distinguer les variables selon trois sortes, et à construire un diagramme dit de stocks et de flux (v. la Figure 6, correspondant à la structure du modèle DYNACITÉ). Les variables de stock ou d'accumulation sont celles qui caractérisent l'état du système à chaque instant (et correspondent à des calculs d'intégrales), ce sont aussi celles qui génèrent l'information sur laquelle décisions et actions sont basées (Sterman, 2000). Les variables de flux (équations différentielles) traduisent les effets des forces qui agissent sur l'état du système, enfin les variables auxiliaires peuvent être des constantes, des paramètres, comporter des relations logiques ou même des fonctions (permettant notamment d'introduire des relations non linéaires¹¹). Les forces en présence modifient l'état du système et peuvent elles-mêmes être modifiées par l'évolution de l'état du système.

En Dynamique des Systèmes, le paramètre essentiel reste le temps. Comment le système va-t-il évoluer au cours du temps ? La simulation informatique va permettre d'analyser cette évolution et aider à en comprendre le fonctionnement, chaque variable pourra être visualisée sous forme de graphique. Des exemples de simulations sont donnés pour le modèle DYNACITÉ dans la partie suivante. Les simulations peuvent ainsi conduire à modifier, parfois radicalement, notre perception de la réalité (ou la représentation que nous nous en faisons). Nous

11. Ce qui va correspondre formellement à représenter des systèmes d'équations différentielles non linéaires d'ordre n .

Figure 4
Structure du modèle DYNACITÉ
 (telle qu'elle apparaît à l'écran avec le logiciel VENSIM®)



Note : certaines parties de la structure du modèle sont reproduites trois fois à l'identique (en trois « couches »), mais avec des valeurs différentes, ceci n'apparaît pas à l'écran ; en particulier pour distinguer chaque catégorie de la population (qui a été déclinée en trois grandes catégories socioprofessionnelles et en : « Actifs juniors », c'est-à-dire sans enfant, Actifs parents et Seniors ; voir les explications ci-après).

soulignerons aussi l'importance essentielle accordée à la démarche du point de vue du mode de raisonnement, qui oblige à réfléchir sur la structure sous-jacente du modèle à l'origine des comportements observés. La construction même du modèle et la réalisation de diagrammes d'influence conduisent souvent à découvrir, à identifier d'autres interrelations dans le système, et à comprendre ainsi certains comportements et les conséquences à plus long terme d'événements.

Comme l'a souligné souvent son fondateur, J. W. Forrester, les modèles de Dynamique des Systèmes n'ont pas pour objet de déterminer des situations optimales, mais de répondre à des questions du type « Que se passerait-il si ... ? ». Ce type de modèle doit ainsi permettre de tester des hypothèses auquel le système n'a jamais été soumis, c'est-à-dire de mettre en œuvre des scénarios qui n'auraient jamais été observés par le passé. La modélisation en Dynamique des Systèmes peut être ainsi utilisée comme une sorte de laboratoire permettant d'expérimenter des scénarios divers, et éventuellement complexes, en agissant sur un certain nombre de variables et/ou paramètres. Le modèle de simulation est en ce sens un outil pédagogique d'aide à la gouvernance des systèmes (Gacogne, 2006).

Les modèles de Dynamique des Systèmes ont parfois été considérés comme des outils de prévision, à tort. Leur vocation première consiste à analyser et à rendre intelligibles des situations complexes ; les boucles de rétroaction, les délais, les relations non linéaires sont autant d'éléments qui peuvent conduire à des évolutions complexes. L'outil

de simulation est là pour aider à en comprendre le fonctionnement, à tester des scénarios pour des futurs possibles (prospective notamment), des mesures pouvant aider à enrayer des mécaniques pernicieuses, etc. Il peut être considéré comme un outil d'aide à la décision, notamment dans le cadre de politiques publiques, résolument interdisciplinaire.

2.2. Deux notions centrales à la base de la conception du modèle : l'attractivité relative de la commune et les arbitrages effectués par les individus

Dans le travail d'analyse préalable à la construction du modèle, la commune, qui est l'échelon territorial le plus fin en France, est apparue comme l'échelon décisionnel clé du processus de périurbanisation. La commune est certes le dernier échelon territorial mais elle dispose d'un réel pouvoir pour canaliser la périurbanisation, notamment avec l'élaboration du PLU et dans l'élaboration de politiques d'aménagement concrètes. Le maire dispose en effet de compétences décisives, mais de moyens financiers variables suivant les caractéristiques de sa commune (population, emplois, etc.). Ceux-ci doivent lui permettre, *a priori*, de mener une politique cohérente pour le développement économique de la commune, tout en respectant les logiques de développement durable imposées par l'Etat, en particulier, la maîtrise de la périurbanisation. C'est la raison pour laquelle le modèle a été développé en plaçant la commune au centre ; il s'agit donc là d'une hypothèse forte à la base de ce travail.

Cette première version a pu être utilisée, testée, avec des données réelles (celles de la commune de Lissieu et de l'aire urbaine lyonnaise), et par le biais de tableaux de bord simples, permettant de modifier des paramètres choisis et de réaliser des scénarios¹². Pour l'utilisateur expérimenté, et souhaitant aller plus loin, d'autres paramètres peuvent être néanmoins modifiés à partir de l'interface du modèle.

Le modèle construit va ainsi simuler l'évolution d'une commune à un horizon de 30 ans, avec ses caractéristiques propres, dans un environnement qui peut être relativement large et qui comprendra l'ensemble des communes concernées par le même bassin d'emplois (qui peut compter un ou plusieurs pôles d'emplois). Le modèle pourrait, par ailleurs, être développé de manière relativement simple en simulant simultanément plusieurs communes au sein de l'aire urbaine

12. Pour ce faire, un guide a été réalisé à l'usage des utilisateurs, il est intégré au rapport final du projet et permet une véritable prise en main, pas à pas, de cette version initiale du modèle.

(celles-ci étant toutes en interaction, et constituant par le biais de variables agrégées l'environnement). Ces aspects n'ont pas encore été développés dans la version initiale du modèle.

La commune va exercer du point de vue de ses habitants présents et potentiels un pouvoir d'attraction plus ou moins fort, voire même, à l'opposé, de répulsion. Cette attractivité va encourager les arrivées comme les départs de la commune, et va générer ainsi une dynamique de population. Cette attractivité est néanmoins multiple de par ses composantes, et par le fait que ces différentes composantes exercent une influence distincte selon les différentes classes de population. Chacune de ces classes de population, distinguées selon trois grandes catégories socioprofessionnelles et selon leur position dans le cycle de vie, n'ont pas les mêmes aspirations notamment en matière de logement, d'accessibilité au(x) pôle(s) d'emplois, à la ville centre (ici Lyon), et de la même manière elles n'ont à l'évidence pas non plus les mêmes besoins, ni les mêmes contraintes (en particulier du point de vue du niveau des revenus).

La commune est ainsi toujours considérée dans son environnement, son attractivité ne pouvant être mesurée que par rapport à son environnement, avec lequel elle est en constante interaction (justifiant l'intérêt d'une approche systémique). De plus, les caractéristiques de son attractivité évoluent dans le temps, tout comme les caractéristiques de son environnement (il s'agit de l'aspect dynamique essentiel de l'approche).

a. Les composantes de l'attractivité relative de la commune

Ce travail nous a amenés à distinguer les composantes suivantes de l'attractivité de la commune :

- la qualité du logement et la surface habitable (parcs social et privé, nombre de m² habitables par habitant) ;
- l'accessibilité au marché de l'emploi (développée plus loin) ;
- le cadre de vie « vert » (part des surfaces vertes sur la superficie totale de la commune) ;
- la perception de la commune du point de vue de la répartition des habitants par Catégorie socioprofessionnelle (CSP). Il s'agit plus exactement d'un certain caractère de répulsion qui peut s'exercer sur les catégories aisées, dès lors que la proportion des habitants aux revenus les plus modestes augmente dans la commune) ;
- la distance à la ville-centre.

Cette liste n'a aucun caractère hiérarchique, car à titre d'exemples les actifs seront fortement concernés par l'accessibilité aux emplois, à l'inverse des retraités ; les personnes sans enfant préféreront être au

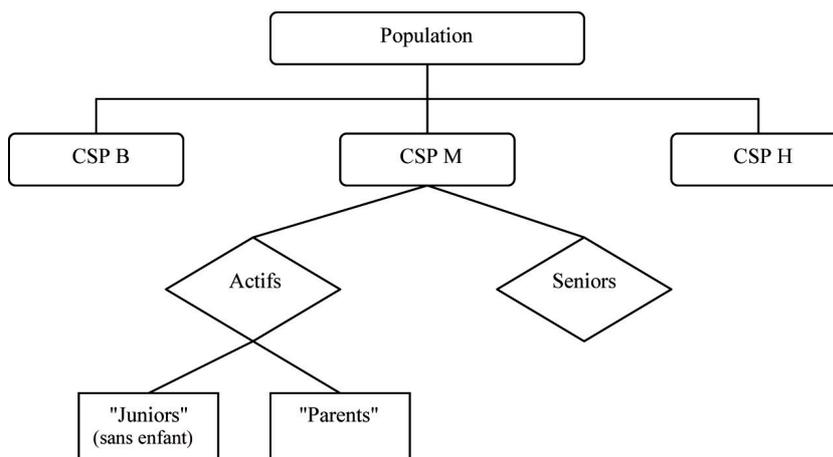
plus près de la ville-centre (Lyon), tandis que les familles privilégiées ont le nombre de m², quitte à en être plus éloignées. Ces quelques éléments donnés à titre d'illustration, et qui relèvent presque du bon sens quant à l'importance pouvant être accordée aux différentes composantes de l'attractivité de la commune, nous ont conduits à répartir la population en six grandes catégories présentées dans la section suivante. Il s'agit de l'autre élément central de la construction du modèle, à savoir les arbitrages qu'ont à effectuer les différentes catégories de population.

b. Les déclinaisons des composantes de l'attractivité par CSP et position dans le cycle de vie

Cette attractivité relative de la commune se décline en fonction de la CSP des individus et de leur position dans le cycle de vie. Trois grandes CSP ont ainsi été définies :

- « B » représentant des individus aux revenus pouvant être qualifiés comme faibles (ou « Bas »), il peut s'agir de personnes de condition modeste voire pauvres ;
- « M » pour des revenus correspondant à une classe moyenne ;
- et enfin « H » pour des personnes percevant des revenus élevés (ou « Hauts » revenus).

Figure 5
Catégories d'individus (déclinées à l'identique pour chaque CSP)
dans le modèle DYNACITÉ



La position des individus dans le cycle de vie nous a conduits à les distinguer selon trois grandes catégories :

- la première a été dénommée « Actifs juniors », il faut comprendre qu'il s'agit en fait d'actifs n'ayant pas d'enfant ;
- la seconde correspond par voie de conséquence aux « Actifs parents » (on comptera en moyenne un enfant par parent selon la moyenne nationale française) ;
- et enfin la troisième catégorie, appelée « Seniors », englobe l'ensemble des personnes retraitées.

c. Valeur de l'attractivité « relative » de la commune

Enfin, cette attractivité de la commune est bien « relative » dans la mesure où chacun de ces critères ne peut être évalué par les individus que relativement à ce qui est offert par les autres communes (évaluation de chacun des critères de l'attractivité de la commune par rapport à ce qu'offre son environnement, et au poids que chacune des catégories va lui attribuer). Il est admis dans le modèle que l'attractivité de la commune, ou l'une de ces composantes, prend la valeur 1 lorsque celle-ci est égale à la moyenne (ni plus attractive, ni moins attractive que l'ensemble de la région concernée par le même bassin d'emplois).

Cette notion de relativité est essentielle dans la construction du modèle, car les différentes composantes de l'attractivité relative varieront au fil du temps, tant pour la commune, que pour le bassin qui fait office de référence. Cette perception de l'attractivité d'un espace relativement à son environnement avait déjà été utilisée par J. W. Forrester dans *Urban Dynamics* ; une approche de type Dynamique des Systèmes convient parfaitement à ce mode d'abstraction de la réalité. En d'autres termes, lorsque l'attractivité relative de la commune est égale à 1, celle-ci n'influencera aucun des deux taux de variation de référence qui sont à l'origine des dynamiques de la population au sein de la commune (soit les « entrées » et « sorties » de population dans la commune), il s'agit du taux de mobilité résidentielle et du taux de variation de la population dans le bassin (incluant l'évolution démographique et les migrations à l'horizon 2030). Lorsque l'attractivité relative de la commune est égale à 1, les départs comme les arrivées sont le fait d'une mobilité résidentielle « normale » (conforme à la moyenne), et le taux de variation de la population de la commune sera strictement égal au taux de variation de référence du bassin.

Lorsque l'attractivité relative croît, en devenant par exemple égale à 1.1 ; cela signifie que les taux de variation sont eux-mêmes multipliés par cette valeur, soit 10% de plus en moyenne d'arrivées potentielles sur la commune (ou de demandes d'arrivée) par rapport à la moyenne.

Figure 6

**Paramètres utilisés dans le modèle DYNACITÉ
appliqué à une commune de l'aire urbaine lyonnaise
(taux de mobilité résidentielle et taux de variation du bassin)**

Cycle de vie	Mobilité résidentielle de référence en France (chiffres établis d'après les enquêtes logement sur les ménages dits permanents)	Taux de variation de référence dans le bassin – aire urbaine lyonnaise (Taux résultant des migrations et de l'évolution démographique de la population dans le bassin d'emplois – projection horizon 2030) ¹
Juniors (actifs sans enfant)	0.32	0.004
Parents (actifs avec enfant)	0.11	0.004
Seniors (retraités)	0.026	0.0194

Calculs : Complexio ; Sources : Enquêtes logement, modèle OMPHALE INSEE, projections Lyon 2020.

Si l'attractivité relative est ainsi égale à 2, cela signifie que les demandes d'arrivée sont, proportionnellement à la population de la commune, équivalente à deux fois la demande moyenne sur l'ensemble du bassin de vie. A l'inverse, elle affectera à la baisse les départs par rapport au taux moyen. En revanche, si l'attractivité relative de la commune prend une valeur inférieure à 1, par exemple 0.8, cela signifie que les taux de variation de référence de la population seront multipliés par 0.8 et les demandes d'arrivée sur la commune inférieures de 20 % à la moyenne du bassin.

L'attractivité relative est en fait le produit des composantes de l'attractivité citées plus haut ; prenons à titre d'exemple les deux composantes citées ci-dessus : la composante « m² habitables par habitant » et « l'éloignement à la ville-centre ». Schématiquement, si une commune présente pour des parents une attractivité « m² habitables par habitant » supérieure à la moyenne (donc supérieure à 1), autrement dit plus de m² habitables que la moyenne pour le même budget, avec *a contrario* un éloignement accru à la ville-centre, un arbitrage est effectué par ces familles entre ces deux types de composantes. Le produit des deux, s'il est supérieur à 1, indiquera clairement qu'elles préfèrent disposer d'un nombre de m² habitables supérieur à la moyenne, avantage qui n'est pas compensé par le désagrément de l'éloignement à la ville-centre. On peut supposer que ces deux composantes de l'attractivité prendront des valeurs inverses s'agissant par exemple d'un actif sans enfant, et que de fait le résultat de l'arbitrage ne sera pas le même.

Cette attractivité relative n'est pas la même selon les catégories d'individus, car les priorités et les contraintes sont différentes selon les catégories socioprofessionnelles et la position des individus dans le cycle de vie. En d'autres termes les individus effectuent des arbitrages, et ces arbitrages n'étant pas les mêmes selon les catégories, les composantes de l'attractivité relative (par exemple m^2 habitables par habitant, éloignement à la ville-centre) ne prendront pas les mêmes valeurs¹³.

d. Le cas de l'attractivité relative au marché de l'emploi
(proposition de méthodologie)

Nous aborderons ici le cas de l'accessibilité aux emplois, qui n'a pu être développée complètement dans le modèle, toutes les données nécessaires n'ayant pu être collectées dans le temps imparti. Concernant celle-ci, l'attractivité de la commune devrait être égale à 1 lorsque le pourcentage cumulé d'emplois auquel la commune a accès est équivalent à celui de l'ensemble des communes, dans le budget-temps de transport domicile-travail moyen constaté pour ce bassin d'emplois (en distinguant aussi les trajets en transport en commun et en voiture). Il est important de noter que cette attractivité relative, qui correspond aux emplois effectivement accessibles à partir de la commune en un budget-temps de transport domicile-travail donné, est variable :

- tant du point de vue de la commune, à savoir si des investissements dans les réseaux de transport collectif ou dans les voiries routières lui permettent d'accroître les vitesses, et donc le pourcentage d'emplois du bassin atteints dans le même temps de transport, ou au contraire si elle diminue du fait d'une congestion routière croissante ou par choix (réduction de la consommation de carburant des ménages, il peut s'agir d'un scénario prospectif sur les comportements futurs, et d'une réduction volontaire des vitesses) ;

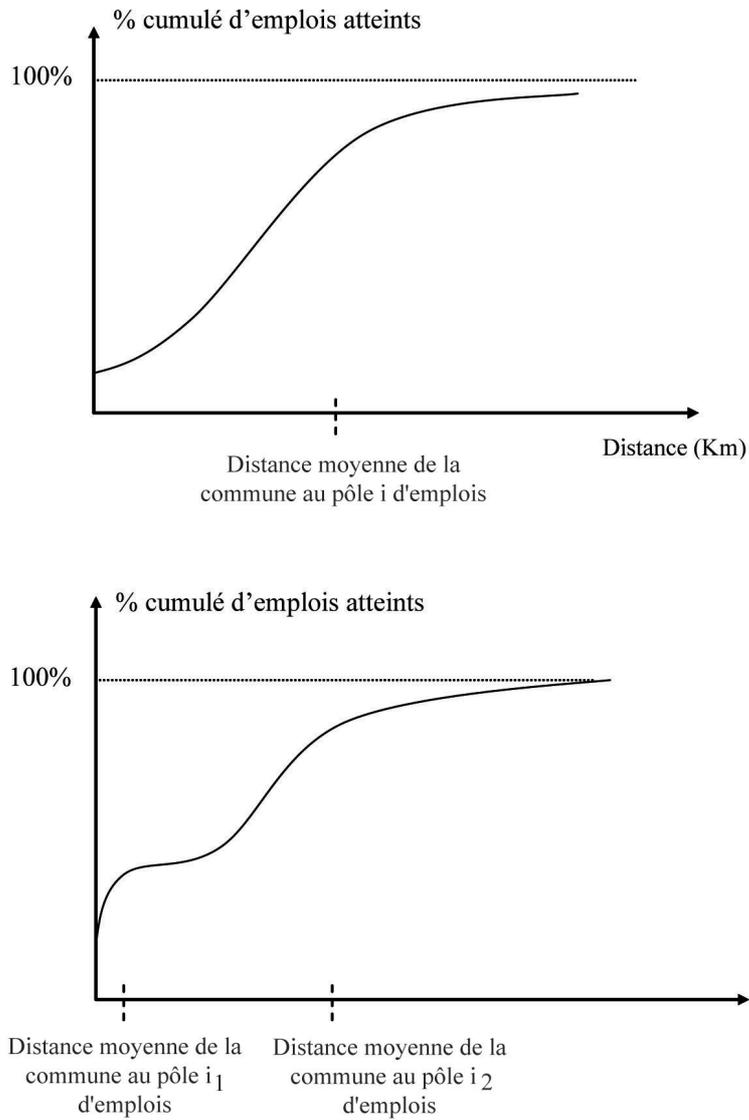
- que du point de vue de son environnement dans la mesure où les différents ratios auxquels elle est elle-même comparée par les individus peuvent varier au fil du temps.

Le premier graphique de la Figure 7 représente le pourcentage d'emplois cumulés du bassin d'emplois en fonction de la distance du pôle à la commune, dans le cas où il n'existerait qu'un seul pôle d'emplois. Le second graphique correspond à un bassin comptant deux pôles d'emplois principaux (il peut y en avoir un nombre n dans le modèle, la difficulté relevant plus du travail de collecte des données ;

13. Elles ont été introduites le plus souvent sous la forme de relations non linéaires dans le modèle.

Figure 7

Schématisation de la méthodologie permettant de mesurer l'accessibilité aux emplois à partir d'une commune en fonction de la distance (1^{re} étape)



une méthode plus systématique réalisée à partir de cartes d'accessibilité devrait être envisagée).

Dans un second temps, la taille de ce marché d'emplois théorique, auquel il est possible d'accéder à partir de la commune, doit être exprimée en minutes (et non pas en fonction de la distance à parcou-

rir). Dans cette deuxième phase, interviennent deux variables essentielles dans le modèle, la vitesse (routière et vitesse commerciale des transports collectifs si la commune y a ou y aura accès dans le futur, ce qui est le cas pour la commune de Lissieu), et le budget-temps de transport. La vitesse et le budget-temps de transport permettent de définir la taille effective, et non plus seulement théorique, du marché d'emplois atteints à partir de la commune, c'est-à-dire le pourcentage d'emplois cumulés atteints en fonction du temps de transport (voir à ce sujet Lee, 1997).

Dans sa version actuelle, nous nous en sommes tenus à des valeurs de référence établies spécifiquement pour la commune de Lissieu, et l'utilisateur du modèle peut effectuer des hypothèses de croissance de l'attractivité relative de la commune avec le projet REAL (Réseaux de trains express lyonnais), et l'ouverture d'une gare en 2010.

3. EXEMPLES DE SCÉNARIOS ET D'ENSEIGNEMENTS TIRÉS DES SIMULATIONS

Dans cette version initiale, ce sont les données réelles d'une commune qui ont été appliquées au modèle, ainsi que les données de l'aire urbaine lyonnaise puisque ce sont celles-ci qui caractérisent l'environnement de la commune, référentiel de son attractivité. Ces variables peuvent être modifiées en partie par l'intermédiaire des tableaux de bord (ou peuvent l'être toutes directement à partir de l'interface du modèle pour un utilisateur averti). Cependant, l'utilité des tableaux de bord consiste à pouvoir modifier un nombre limité de paramètres choisis, et à permettre à l'utilisateur de tester plusieurs types de scénarios, le plus simplement possible. Pour comprendre et interpréter les résultats des simulations, il est préférable d'une part de ne pas « tout » modifier en même temps. D'autre part les enseignements à tirer de ces diverses simulations, qui peuvent être effectuées par l'intermédiaire des tableaux de bord, ne sont pas aussi restrictifs ni aussi simples qu'il n'y paraît.

3.1. Éléments d'analyse des dynamiques de population d'une commune périurbaine et rôle des acteurs

Afin d'analyser les dynamiques de population de la commune et le rôle des différents acteurs sur celles-ci nous avons proposé de tester le modèle, étape par étape, en faisant varier des paramètres et en modifiant certaines variables à partir de deux tableaux de bord. L'intérêt étant pour l'utilisateur de modifier ensuite l'ensemble des paramètres

afin de réaliser les scénarios de son choix. Nous en proposons ici un aperçu, avec des éléments d'analyse pouvant être tirés des simulations.

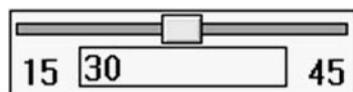
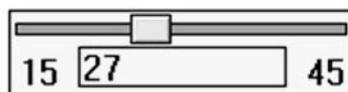
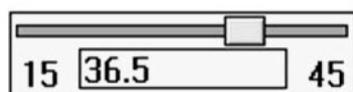
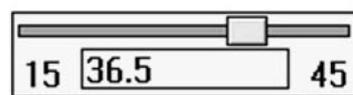
Par « dynamiques de population », il faut comprendre les mouvements d'entrées et de sorties des habitants de la commune, ces mouvements ont des effets en valeur absolue, c'est-à-dire sur le nombre total d'habitants de la commune, mais aussi sur sa composition, selon les six catégories d'habitants retenues dans le modèle. Pour ce faire, nous avons utilisé la fonction *Automatically simulate on change* du logiciel. Cette fonction spécifique permet en effet de faire varier des paramètres du modèle par l'intermédiaire de curseurs, et de visualiser instantanément les résultats de la simulation ; l'objectif étant d'analyser ainsi le comportement dynamique du modèle. L'utilisation, qui a été privilégiée dans cette présentation, est destinée à des non spécialistes de la modélisation. Des curseurs ont été introduits à cet effet pour faire varier simplement des variables choisies à partir de tableaux de bord (mais n'exclut en aucun cas d'autres utilisations plus extensives du modèle). Les modifications apportées par l'intermédiaire des curseurs peuvent paraître parfois plus ou moins réalistes lorsque les valeurs deviennent extrêmes, mais elles permettent d'explorer le comportement du modèle, et d'en comprendre les mécanismes.

3.1.1. Exemple 1 : utilisation des curseurs « M^2 habitables par habitant » à partir du tableau de bord « Parcs logements et surfaces »

Les trois curseurs de gauche ci-dessous correspondent aux données réelles de Lissieu, et indiquent que les m^2 offerts par habitant à la date initiale sont nettement supérieurs à la moyenne, en particulier pour la CSP « M » (36,5 contre 32). Ces valeurs peuvent en effet être comparées à celles des curseurs de droite, qui sont les valeurs du département du Rhône, utilisées à titre de référence pour mesurer l'attractivité relative de la commune en ce domaine. Ces curseurs permettent à la fois de tester des situations initiales différentes pour la commune (ou d'autres communes), et éventuellement de modifier l'environnement de celle-ci.

En faisant glisser les curseurs continûment, l'utilisateur observera instantanément les évolutions qui en résultent sur les graphiques de l'interface (voir à titre d'exemple la Figure 11). Si, par exemple, l'utilisateur augmente le nombre de m^2 habitables pour la CSP « M », il constatera une augmentation encore plus forte de cette catégorie et de celle des « Parents » en particulier. Il constatera, par la même occasion, une hausse de la CSP « B » due à la construction de logements sociaux,

Figure 8

Curseurs « M² habitables par habitant »Initiale M² par hab B communeRef M² par hab BInitiale M² par hab M communeRef M² par hab MInitiale M² par hab H communeRef M² par hab H

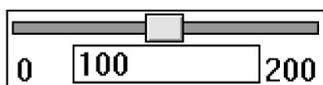
Traitements des données : Complexio ; Sources : INSEE.

conformément au quota de 20% de logements sociaux imposés par la loi SRU, car la commune aura alors dépassé le seuil des 3 500 habitants.

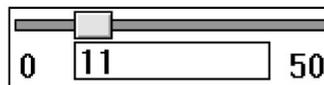
En revanche, si l'utilisateur augmente le nombre de m² disponibles pour la catégorie « H » qui, en l'état initial (certes réel), n'est pas particulièrement attractif pour cette catégorie la plus aisée, l'évolution de la répartition de la population s'en trouvera complètement modifiée. En effet, dès qu'il y a compétition entre les CSP, les ressources sont allouées en priorité aux catégories dont les revenus sont les plus élevés, par le jeu sous-jacent des prix de marché. Il est vrai que la CSP « M » est particulièrement bien représentée dans cette commune, mais il s'agit là d'un élément caractéristique de la commune périurbaine dominée par le logement individuel.

Enfin, si l'utilisateur augmente pareillement le nombre initial de m² habitables par habitant pour les CSP « M » et « H », en le fixant par exemple à 39, il observera également une hausse importante de la CSP « B » du fait de la croissance de la part des logements sociaux. Celle-ci atteint alors 16% du parc à la fin de la simulation. Bien que respectant les directives de la loi SRU, cette évolution de la population peut paraître improbable, en raison de la pression que sont susceptibles d'exercer les habitants eux-mêmes (catégories « M » et « H ») pour freiner la construction d'un parc social.

Figure 9

Curseur « Terrains affectés au logement social »

Part terrains requis log social reservee
(100% correspond à la part de terrains
qui devraient être légalement affectés au
logement social)



Part initiale surf bâtir social
(% terrains NA affectés à la
construction de log sociaux)

3.1.2. Exemple 2 : l'acteur habitant-électeur freine la construction de logements sociaux

Les deux curseurs suivants permettent de réguler la part des terrains réservés au logement social. Lorsque le premier curseur garde sa valeur initiale fixée à 100 %¹⁴, cela signifie que la totalité des terrains à réserver pour répondre aux 20 % de logements sociaux obligatoires est bien respectée. Si la part est inférieure, cela signifie que la commune ne pourra pas respecter l'obligation des 20 % de la loi SRU, à l'inverse elle peut être supérieure dans certaines communes (certaines ayant effectivement plus de 20 % de logements sociaux).

En raison des délais importants existant à la fois dans les décisions et dans la construction des logements eux-mêmes, même en ayant choisi de respecter l'obligation des 20 % de logements sociaux, la part effective ne pourra atteindre ce taux qu'au bout de plusieurs années en particulier si la commune part de quasiment zéro (ces délais peuvent par ailleurs être modifiés/adaptés dans le modèle). Enfin, compte tenu de certaines déclarations du gouvernement, de tenir compte dans cette part de l'« accession sociale à la propriété » (projet de loi sur l'accès au logement qui modifierait donc la loi SRU, en 2008), l'utilisateur peut souhaiter réaliser des scénarios alternatifs dans lesquels la commune ne chercherait pas et n'aurait pas intérêt à atteindre ce seuil des 20 % (puisqu'elle n'aurait plus les mêmes obligations).

Le deuxième curseur correspond uniquement au pourcentage « initial » de terrains NA¹⁵ (naturels ou agricoles) que l'on décide d'affecter au logement social, il peut éventuellement être fixé à zéro. Il est utile

14. Le pourcentage de ce curseur correspond à un taux annuel fixe, car nous ne réalisons pas ici de simulations de type *game* qui permettraient de modifier ce taux tout au long de la simulation (cette utilisation est possible avec le modèle, mais l'usage est différent et ne permettrait pas d'explorer le comportement dynamique du modèle comme nous le faisons ici).

15. Pour devenir effectivement constructibles, ces terrains à urbaniser « réservés » en NA doivent être libérés en zone U (urbanisée), conformément au règlement des PLU.

Figure 10

 Curseurs « Accession propriété »

de jouer simultanément sur ces deux curseurs dans les simulations selon les résultats escomptés. L'utilisateur verra que lorsque l'attractivité relative de la commune est forte et que des terrains sont ouverts à la construction privée, ces deux curseurs, qui correspondent à une certaine acceptation ou non des logements sociaux par les habitants, ont des influences excessivement importantes sur l'évolution de la répartition des habitants par catégorie (et non pas seulement du point de vue de la CSP « B »).

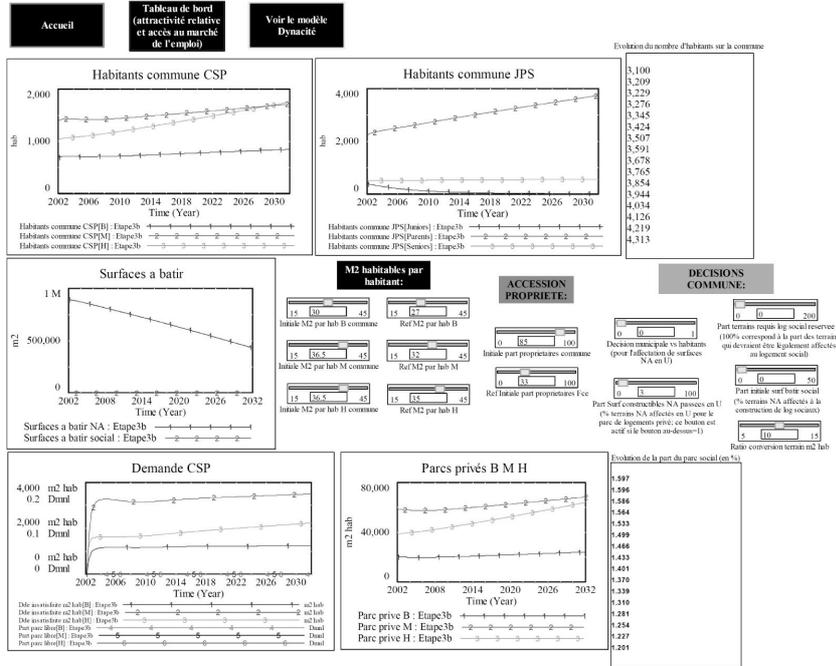
3.1.3. Exemple 3 : l'Etat influence l'accession à la propriété

Dans l'accession aidée à la propriété, l'Etat peut jouer un rôle important, de nombreuses mesures en ce sens ont déjà été mises en place par le passé. Le projet de loi sur l'accès au logement (2008) propose notamment le principe de l'« accession populaire à la propriété » avec une maison à 15 euros par jour, qui devrait probablement favoriser la construction dans les zones périurbaines. Or, les chiffres de l'INSEE montrent incontestablement que l'accession à la propriété réduit considérablement la mobilité résidentielle des ménages¹⁶, et ne peut de fait pas conduire à une bonne adéquation entre l'habitat des actifs et les emplois. La part en France était estimée à 57 % des ménages en 2004 (d'après l'Enquête-Logement), et à 80 % dans le périurbain. A Lissieu, en 2004, cette part s'élevait à 85 %, cette valeur est donc nettement supérieure à la moyenne du périurbain, et plus encore à la moyenne française.

Si l'utilisateur joue alternativement sur l'un et l'autre de ces deux curseurs, il s'apercevra qu'ils agissent en sens inverse sur la population de la commune. En d'autres termes, lorsque la part des propriétaires augmente dans la commune (en %, premier curseur), le nombre d'habitants augmente également de plus en plus au fil de la simulation, tandis que lorsque c'est la part des propriétaires en France qui est

16. Avec une différence d'environ 8 points entre les locataires et les propriétaires d'après les dernières enquêtes logement sur le taux de mobilité des ménages dits permanents (source INSEE).

Figure 11
Exemple de résultats graphiques



modifiée à la hausse (deuxième curseur), la population de la commune croît toujours, mais plus modérément au cours de la simulation. Comment expliquer cela ?

Sur la Figure 11, les résultats de l'une de ces simulations sont présentés, la part des propriétaires en France a été ramenée à 33 % au lieu des 57 % (chiffre réel de 2004). Dans ce scénario, les deux curseurs du logement social sont à zéro. Les résultats indiquent une augmentation de la population qui reste, malgré tout, nettement supérieure à celle de la simulation initiale (non présentée ici, scénario au « fil de l'eau »), avec 4 313 habitants au lieu de 3 495.

La part de la CSP « H » a par ailleurs fortement augmenté par rapport au scénario de référence. Elle est le signe d'une compétition entre CSP due à une demande largement supérieure à l'offre de logements (et qui naturellement se fait au profit de la catégorie la plus aisée). La demande potentielle est forte, des terrains sont donc libérés progressivement, alors même que cette fonction est en principe régulée de manière endogène dans le modèle, sous l'effet de la pression des habitants-électeurs.

En fait, lorsque le taux de propriétaires augmente globalement dans la population française, le taux de mobilité résidentielle diminue « mécaniquement » ; autrement dit les ménages changent moins fréquemment de logement. Donc en diminuant le taux initial de propriétaires en France, on dynamise en fait la mobilité résidentielle des individus. Cette notion de mobilité résidentielle est essentielle, elle correspond à tous les changements importants de vie, d'ordre familial ou professionnel, et varie fortement en fonction de l'âge¹⁷, et selon le contexte économique. Elle est donc également fortement influencée par l'accession à la propriété. C'est cette mobilité résidentielle qui va provoquer la dynamique principale d'entrées et de sorties des habitants de la commune, quelle que soit son attractivité. L'attractivité relative aura pour effet de modérer, ou au contraire d'accroître, la proportion de ces entrées et sorties potentielles.

C'est pourquoi un environnement économique favorable, qui stimule la mobilité résidentielle, peut créer des tensions sur le marché de l'immobilier. Tout se passe comme si le « repositionnement » des individus s'accélérait vers les espaces les plus attractifs, délaissant à l'inverse ceux qui ont perdu de leur attractivité, cette demande crée alors une pression sur l'offre concernée. Les modèles dynamiques sont particulièrement bien appropriés pour simuler ce type de phénomène.

A l'inverse, lorsque les propriétaires sont nombreux sur une commune, cela entraîne une forme d'immobilisme des habitants qui ralentit les départs, et ainsi la dynamique de population (et ralentit aussi, comme l'a exprimé le maire de Lissieu, le taux de rotation des logements, ce qui est encore plus vrai lorsqu'ils sont occupés par les moins mobiles, c'est-à-dire les seniors).

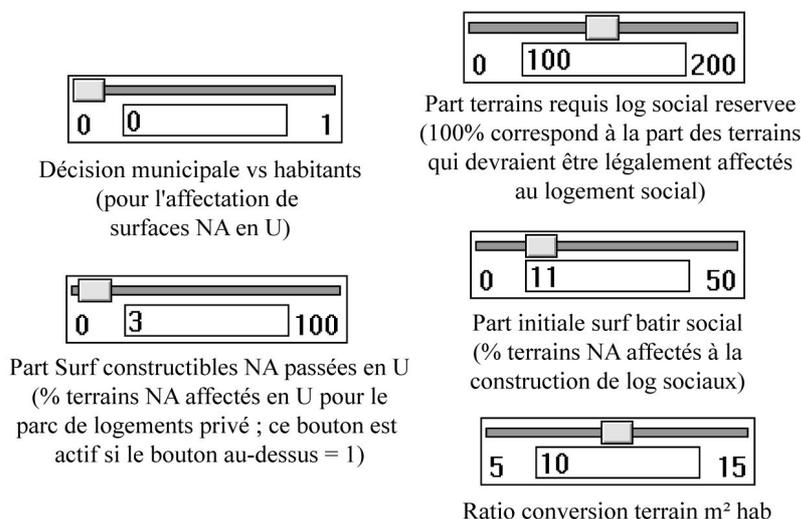
3.1.4. *Exemple 4 : la commune régule la construction et la mise à disposition des terrains*

Dans les simulations précédentes, les surfaces à urbaniser NA sont libérées en zone U en fonction de la demande potentielle et du frein exercé par les habitants eux-mêmes. Ici nous proposons de « rompre ce lien » et de laisser le maire et le conseil municipal choisir de subir, ou non, cette pression qu'ils peuvent ressentir de la part des habitants. Pour ce faire, il faut donner la valeur 1 au premier curseur ci-après dénommé « Décision municipale vs habitants » (il ne peut prendre que les valeurs 0 ou 1 ; 0 étant la valeur par défaut).

17. Voir les taux introduits dans le modèle avec la Figure 8 précédente.

Figure 12

Courseurs « Décisions commune »



Le curseur situé au-dessous de ce dernier « Part Surf constructibles NA passées en U » devient alors actif. Il s'agit d'un premier niveau de décision municipal essentiel dans les évolutions du système. La commune peut également agir à deux autres niveaux, l'un concerne les logements sociaux (cette question a déjà été abordée précédemment), et l'autre renvoie à des notions de densité, il s'agit du curseur intitulé « Ratio conversion terrain m² hab » (ce ratio est de 10 actuellement pour la commune de Lissieu, qui ne compte quasiment que des maisons individuelles, soit environ 10 m² de surface au sol sont nécessaires pour la construction de 1 m² habitable)¹⁸.

En reprenant les simulations proposées précédemment, et en agissant sur ces curseurs, l'utilisateur constatera qu'ils peuvent modifier parfois radicalement le profil des courbes. Les incidences de ce type de décisions sont particulièrement importantes dans le cadre de scénarios proposant une augmentation brutale de l'attractivité relative de la commune, grâce par exemple à une accessibilité au marché de l'emploi améliorée (correspondant pour Lissieu à l'ouverture d'une gare dès 2010 dans le cadre du projet REAL).

18. Ce ratio renvoie aux définitions de la Surface hors œuvre nette (SHON) et du Coefficient d'occupation du sol (COS) figurant dans les PLU.

3.2. Interprétation des résultats sur le phénomène de périurbanisation

Pour ce projet, nous avons donc proposé d'analyser le phénomène de périurbanisation et son interdépendance avec le système des transports, en recourant à une méthodologie basée sur la modélisation et simulation des systèmes complexes. Le modèle mental sous-jacent, qui décrit les liens de causalité entre les variables explicatives, a conduit à construire le modèle de Dynamique des Systèmes DYNACITÉ.

L'attractivité relative (par rapport à son environnement) de la commune, placée au centre du modèle, agit comme un accélérateur ou un frein sur les dynamiques de la population de la commune. Partant des deux composantes essentielles de l'attractivité relative de la commune périurbaine : l'accessibilité au marché de l'emploi et la surface habitable moyenne disponible par habitant, nous avons proposé l'interprétation suivante du phénomène de périurbanisation.

Au commencement de la périurbanisation ? Des communes éloignées de la ville-centre, devenues attractives grâce à l'augmentation des vitesses (infrastructures routières et accès à l'automobile). Ces communes, situées aujourd'hui dans des zones dites périurbaines, ont particulièrement attiré des familles de la classe moyenne (comme en attestent l'analyse des statistiques), profitant ainsi de logements plus spacieux que dans les villes-centres, et dans une certaine mesure d'un cadre de vie « vert ».

Un phénomène entretenu ? Ces anciens-nouveaux habitants, soucieux de préserver ainsi un espace de vie amélioré, agiraient-ils aujourd'hui comme des habitants-électeurs frileux d'accueillir de nouveaux habitants, et plus encore des logements sociaux ? La commune périurbaine de plus en plus attractive, suscitant une demande potentielle forte d'habitants nouveaux, mais demande non satisfaite, les rejeterait alors dans sa propre périphérie favorisant une sorte d'éparpillement de la population selon la thèse de M. Wiel (2005).

Quels leviers ? Les communes les plus attractives situées à proximité des réseaux de transport (par exemple d'une gare) doivent décider de libérer des terrains constructibles et de densifier l'habitat (qui est trop souvent perçu négativement), sans céder à une pression trop forte des habitants-électeurs, ou bien peut-être un pouvoir institutionnel supérieur doit disposer de ce « droit du sol ». Améliorer les dessertes d'un réseau express ferroviaire, par exemple, sans pour autant ouvrir à l'urbanisation les communes les plus proches des gares laisse courir le risque d'entretenir le phénomène de périurbanisation.

CONCLUSION ET DISCUSSION

Le modèle aide à faire évoluer certaines de nos représentations du phénomène de périurbanisation. Ainsi, paradoxalement, une commune périphérique, consciente de son rôle quant à la dynamique territoriale et soucieuse de lutter contre l'étalement urbain, pourrait, en restreignant l'attribution de permis de construire, inciter des ménages à se localiser encore plus loin de la ville-centre, et donc à participer à l'étalement urbain.

Parmi l'ensemble des enjeux auxquels font face les élus, les principaux reposent sur le décalage existant entre les espaces vécus, pratiques, fonctionnels, et les espaces institutionnels. Ce décalage prend souvent l'aspect d'une véritable crise de légitimité. Il faut insister sur le fait que les territoires de la représentation politique coïncident très mal, deux siècles après leur création, avec les espaces de vie, de mobilité et d'activité des populations. Par ailleurs, la nature même des différents pouvoirs (communaux, départementaux, régionaux, nationaux et européens) et leurs imbrications, rend très difficile leur perception par les citoyens. Ceux-ci s'en tiennent pour l'essentiel au niveau local. Les politiques menées par les institutions publiques à tous les niveaux ont participé au développement de l'éparpillement de l'habitat.

Si les SCOT doivent produire de la cohérence entre et avec les PLU, ils n'ont pas pour autant la maîtrise de l'outil réglementaire qui reste le permis de construire. De même que certains réclament le transfert du pouvoir de police aux intercommunalités, le débat peut être ouvert quant au transfert des outils d'urbanisme. Le modèle démontre bien que les territoires administratifs coïncident très mal avec les logiques fonctionnelles de vie, de mobilité et d'activité des populations.

Nous avons proposé une interprétation du phénomène de périurbanisation à l'appui des résultats des simulations et des leviers d'action possibles, considérant que ce modèle doit être utilisé dans cette version initiale comme un outil pédagogique d'aide à la décision, et en souhaitant qu'il suscitera débats et réflexions.

Cette première version du modèle, appliqué à une commune située dans l'aire urbaine lyonnaise, fournit un aperçu de l'usage possible de ce type de modélisation, présenté ici sous la forme d'un outil d'aide à la décision participatif. Elle pourrait être développée sous plusieurs aspects, du point de vue même de la structure du modèle (avec notamment des éléments importants concernant l'accessibilité au marché de l'emploi mais qui nécessitaient un temps de travail supplémentaire), en l'appliquant à d'autres cas réels pour vérifier son « comportement

dynamique » et effectuer les ajustements nécessaires, enfin du point de vue de l'interface utilisateur afin de transformer le modèle en un outil véritablement convivial.

Dans une version extensive, le modèle pourrait également simuler non pas l'évolution d'une seule commune en interaction avec son environnement, mais de tout un ensemble de communes en interaction les unes avec les autres (et constituant ainsi par le biais de variables agrégées l'environnement). Ces pistes ont été plébiscitées par les techniciens et élus de collectivités auxquels nous avons présenté le modèle.

Références bibliographiques

- Bauer G., Roux J.M., 1976, *La rurbanisation ou la ville éparpillée*, Seuil, 191 p.
- Complexio, Interface Transport, 2008, *Périurbanisation et villes durables. Simulation des jeux d'acteurs par une modélisation en dynamique des systèmes. Le modèle Dynacité*, Rapport de recherche, ADEME, PREDIT, 123 p.
- Didier M., Prud'homme R., 2007, *Infrastructures de transport, mobilité et croissance*, Rapport pour le Conseil d'Analyse Economique, La Documentation française, 242 p.
- Forrester J.W., 1989, The beginning of system dynamics, *Banquet Talk at the International meeting of the System Dynamics Society*, Stuttgart, Germany, 16 p.
- Forrester J.W., 1973, *World dynamics*, Wright-Allen Press, 144 p.
- Forrester J.W., 1969, *Urban dynamics*, MIT Press, 285 p.
- Gacogne V., 2006, Les modèles de dynamique de systèmes : des outils pédagogiques pour une aides à la gouvernance des systèmes ?, *Journées AFSCET « Pédagogie de la gouvernance et gouvernance de la pédagogie »*, Pau, France.
- Lee C.W., 1997, *L'impact de l'efficacité du transport urbain sur la productivité de la ville*. Thèse de doctorat, ENPC, 205 p.
- Léon O., Godefroy P., 2006, Projections régionales de population à l'horizon 2030, *Insee Première*, 1111.
- Meadows D.H., Randers J., 1992, *Beyond the limits*, Earthscan, 300 p.
- Meadows D.H., 1972, *The limits to growth. A report for the Club of Rome's project on the predicament for mankind*, Universe Books, 205 p.
- Paulré B., 1998, La dynamique des systèmes, quarante ans après. In : Thiel D. (ed.), 1998, *La dynamique des systèmes*, Hermès, pp.16-24.
- Wiel M., 2005, *Ville et mobilité : un couple infernal ?*, Ed. de l'Aube, 91 p.
- Wiel M., 1999, *La transition urbaine ou le passage de la ville pédestre à la ville motorisée*, Mardaga, 149 p.
- Sterman J.D., 2000, *Business dynamics. Systems thinking and modeling for a complex world*, McGraw-Hill, 982 p.

N.B. Tous les documents de prospective de la Communauté urbaine du Grand Lyon et les résultats de l'enquête Ménage Déplacements 2006 sont téléchargeables à partir des sites www.grandlyon.com et www.sytral.fr

┌

┌

└

└

CONCLUSION

DES MODÈLES POUR ÉCLAIRER L'ACTION

Statiques ou dynamiques, agrégés ou centrés sur les individus, appliqués ou plus théoriques, d'origine économique ou issus des sciences spatiales, les douze modèles présentés dans cet ouvrage offrent tous une illustration des recherches françaises actuelles pour anticiper ou évaluer les politiques de transport et les formes de la ville. Comme de nombreux auteurs le rappellent, ils s'inscrivent pour une grande part dans le cadre du Programme de recherche et d'innovation dans les transports terrestres (PREDIT)¹, dont l'un des objectifs consiste à « confronter les évolutions de la mobilité aux enjeux et aux exigences du développement durable, c'est-à-dire définir les conditions d'une 'mobilité soutenable', ce qui comprend la question de la qualité de la vie en ville pour tous (espace publics, accessibilité au transport et aux services, etc.) ». Dans ce contexte, chaque modèle tente de visualiser un futur souhaitable, et d'identifier les leviers qui permettraient d'y parvenir.

1. DE LA MODÉLISATION À LA PROSPECTIVE

Mais quand il s'agit d'intégrer la prise en compte du futur à un projet d'urbanisation ou à une politique de transports en devenir, tous rappellent également cette phrase, drôle mais juste, que certains attribuent à N. Bohr², d'autres à W. Allen³ : « la prédiction est difficile, surtout celle du futur ». Dans le contexte de l'évolution des territoires, J. de Courson (1999) distingue en effet trois manières de faire face à cette difficulté : (i) La projection qui consiste simplement à prolonger mécaniquement des évolutions passées dans le futur, toutes choses égales par ailleurs, parfois sans grand souci de réalisme ; (ii) La prévision qui s'appuie généra-

1. Le PREDIT est porté par les Ministères chargés de la Recherche, de l'Ecologie et de l'Economie, l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME), l'Agence de l'innovation OSEO, rejoints par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR) en 2005.

2. Dans l'ouvrage de B. Sapoval (1997), par exemple.

3. Dans l'ouvrage de J. de Courson (1999) par exemple, où elle apparaît sous une forme un peu différente de celle de N. Bohr : « La prévision est un art difficile, surtout quand il s'agit de l'avenir ».

lement sur une projection, mais tente de tenir compte d'autres évolutions afin de déterminer une fourchette de possibilités variées, associées à un degré de confiance plus ou moins connu ; (iii) La prospective, enfin, qui décrit les futurs possibles et les cheminements nécessaires pour y parvenir dans un cadre ouvert, dynamique et souvent très volontariste, traduisant l'engagement de ceux qui modélisent, de ceux qui utilisent les modèles et de ceux qui exploitent leurs résultats.

La prospective a été introduite en France par G. Berger en 1957, qui partait alors d'une volonté de mieux maîtriser le destin collectif de la Nation : « L'avenir n'est pas seulement ce qui peut arriver ou ce qui a le plus de chances de se produire. Il est aussi, dans une proportion qui ne cesse de croître, ce que nous aurons voulu qu'il soit ». Dès lors, la prospective s'entend comme l'étude des futurs possibles, et se définit par un néologisme qui réunit la prospection (l'exploration de domaines nouveaux) et la perspective (qui induit les notions de point de vue et de futur). Avec B. de Jouvenel (1972) notamment, ses concepts et ses méthodes s'affinent et contribuent à dessiner une démarche plus élaborée, presque une discipline à part entière. Limitée d'abord au domaine économique et au court terme, la prospective touche aujourd'hui de nombreux domaines, et s'intéresse très largement au long terme. Parallèlement, les démarches improvisées et peu systématiques des débuts ont désormais fait place à une dimension de plus en plus scientifique, au sein de laquelle la formalisation mathématique et la modélisation sont de plus en plus présentes. Appuyée sur la prospective, mais également outil de cette dernière, la modélisation veut comprendre les systèmes qu'elle étudie à partir d'hypothèses mesurées, et présenter les futurs qui pourraient se réaliser comme une conséquence possible de ces hypothèses.

Au sein des sciences sociales, en particulier celles qui s'intéressent à l'évolution des territoires, la modélisation apparaît de ce fait toujours exploratoire : une méthode intellectuelle fragile et fortement contrainte par des possibilités techniques en croissance exponentielle. Parfois décriée, toujours ouverte à la contestation, elle souffre avant tout de ne pouvoir être effectuée qu'à l'intérieur du système qu'elle étudie, sans bénéficier du recul qu'offrent les microscopes et les télescopes aux chercheurs de sciences de la vie et de la terre. A la fois acteurs et spectateurs de leur propre démarche, les auteurs de cet ouvrage travaillent avec un « microscope » (De Rosnay, 1975), et tentent de comprendre un monde dans lequel ils sont plongés, plaçant obligatoirement leurs modèles dans un cadre subjectif, qui leur confère néanmoins de nombreux atouts. Imagination et raison s'associent alors pour créer des scénarios, tendanciels ou contrastés, qui

participent de la prospective et de la modélisation en elles-mêmes, offrant une série de résultats possibles, dont l'interprétation thématique ouvre des pistes nombreuses pour la recherche, mais également pour l'aménagement et la mise en place de politiques adéquates, mesurées et réfléchies.

2. LES DONNÉES : UN ENJEU CRUCIAL

Comme pour les modèles statistiques, les modèles de simulation nécessitent des entrées (*inputs*) à partir desquelles les résultats des simulations (*outputs*) peuvent être calculés. Dans la plupart des cas, ces entrées sont des attributs numériques qui font correspondre le modèle aux caractéristiques économiques, sociales et spatiales spécifiques à chaque système-ville. Il apparaît dès lors évident que la qualité des résultats de sortie, leur précision, leur granulométrie, est fortement dépendante des informations qui y sont entrées, ce qui pose la question des données sous la forme d'un enjeu crucial. De nombreux auteurs soulèvent ce problème qui les invite, avec humilité, à cadrer précisément les biais qui contraignent leurs résultats. L'acquisition de données en bonne adéquation avec le modèle apparaît en effet souvent délicate et complexe ; elle constitue l'un des écueils les plus flagrants de la modélisation en sciences humaines : de nombreuses informations indispensables ne sont souvent que très difficilement disponibles, parfois abordables uniquement par l'intermédiaire d'enquêtes spécifiques, et donc nécessairement très chères.

On peut d'abord considérer les données élémentaires, celles qui permettent de construire l'état initial du système-ville étudié. Elles intègrent généralement l'espace administratif et ses découpages, la population et ses caractéristiques sociodémographiques, des informations relativement simples sur le réseau de routes, éventuellement sur les transports en commun, les commerces, les services, les activités, etc. Dans le cas de l'espace français, elles sont généralement disponibles sur tout le territoire auprès de deux fournisseurs « officiels », l'Institut géographique national (IGN) et l'Institut national pour la statistique et les études économiques (INSEE), qui les commercialisent en autant de bases de données spécifiques. En s'appuyant sur la technologie des Systèmes d'informations géographiques (SIG), ces données géolocalisées peuvent être croisées et constituer un socle de départ de qualité pour la modélisation.

Toutefois, ces données de base ne suffisent que rarement pour modéliser des interactions complexes, notamment en matière de transport et d'urbanisation. Il est souvent nécessaire de les doubler d'une

autre série d'informations, qui ne concerne plus l'état initial du système étudié, mais décrit les comportements et les pratiques des individus et des acteurs qui y prennent place. Ici, les Enquêtes ménage déplacement (EMD), quand elles existent, sont une aide précieuse. De par leur nature, elles ne sont toutefois pas accessibles dans un format standard au sein de produits commercialisés, mais découlent de procédures d'acquisition plus complexes et plus spécifiques. Dans le même esprit, de nombreux jeux de données sont souvent nécessaires. Ils peuvent concerner, par exemple, les préférences des ménages en termes de localisation résidentielle : une enquête demandant aux chefs de ménages de placer par ordre décroissant d'importance les différents éléments et les aménités qu'ils souhaitent trouver à proximité de son logement peut apparaître comme une source d'information importante. Le coût de ces données est proportionnel à leur rareté, à leur précision et à leur durée d'acquisition. Pratiquement, il conditionne la reproductibilité des résultats et le nombre d'aires urbaines sur lesquelles ces derniers peuvent être obtenus : un verrou qu'il faudra ouvrir si l'on veut pouvoir continuer à faire évoluer les modèles d'aujourd'hui, et en proposer de nouveaux demain...

Disponibles partout dans un format standardisé ou issues de relevés *ad hoc* fondés sur un protocole spécifique, les données et le problème de leur acquisition opposent alors les partisans de l'universalisme à ceux du nominalisme. De nombreux travaux montrent en effet que la population active d'une commune est généralement plus ou moins égale à 40% de sa population totale, chiffre que l'on peut aisément reproduire ailleurs sans grand risque d'erreur. Pour autant, il n'est pas évident que ce « transfert » d'informations relevées ou obtenues à un endroit soit valable partout et dans n'importe quel contexte : les pratiques de mobilité ou les choix résidentiels connus grâce à une enquête réalisée en région parisienne, par exemple, peuvent-ils être utilisés pour une simulation à Lyon, à Dijon ou à Besançon ? La réponse à cette question dépend évidemment des données précises, dont il faudrait étudier la qualité d'invariabilité d'une ville à l'autre. Des invariants existent et leur identification constitue dès lors un enjeu important pour le calibrage des modèles et les simulations, qui permettrait de limiter l'acquisition lourde de données par enquêtes, et de généraliser un certain nombre de constats quant aux pratiques de mobilité et aux préférences résidentielles.

Enfin, si les données apparaissent souvent comme un problème, il faut également les considérer comme une contrainte pour la modélisation, d'autant plus prégnante que les modèles actuels s'affinent et tendent désormais à se concentrer sur les individus et leur comporte-

ment. Avec la question des données, c'est aussi celle de l'échelle de la modélisation qui se pose. Car si c'est souvent l'individu (avec son comportement et ses caractéristiques socio-économiques spécifiques) qui intéresse la modélisation comme entrée de base pour simuler des processus sociaux et spatiaux plus généraux, celui-ci reste un illustre inconnu dans les bases des données françaises. A l'inverse de certains de ses voisins européens, qui peuvent suivre leur population individu par individu, la France, par l'intermédiaire de la Commission nationale de l'informatique et des libertés (CNIL), place un enjeu déontologique dans l'agrégation des recensements démographiques. L'objectif se conçoit : « protéger les libertés et la vie privée dans un monde numérique ». Mais il ajoute une difficulté supplémentaire à la modélisation fine des comportements désagrégés d'individus considérés comme des agents, et oblige parfois à développer des méthodes spécifiques pour construire une population synthétique, qui correspond globalement à celle du système étudié, mais dont aucun élément ne peut être identifié individuellement.

3. VALIDATION DES MODÈLES

In fine, l'ensemble des chapitres de cet ouvrage invite à se poser une dernière question : celle de savoir ce qu'il reste à faire des résultats produits, et dans quelle mesure il est possible de les considérer comme valables, ou corrects, et donc de les utiliser concrètement, comme autant d'indices pour l'aide à la décision. L'analyse critique des résultats, la vérification de la validité des modèles théoriques utilisés, la confrontation des résultats prédits à la réalité telle qu'elle est observée, apparaissent comme alors comme autant de « réflexes » qui devraient nécessairement accompagner les simulations. Comme toutes les autres, cette étape de validation des modèles, quels qu'ils soient, est souvent très délicate. Elle différencie à nouveau les sciences « dures » des sciences humaines et sociales, où la réalité est souvent plus difficile à observer et à mesurer correctement : comment connaître, par exemple, la proportion de telle population venue habiter dans tel quartier pour se rapprocher de telle ou telle aménité ou bénéficier d'une meilleure accessibilité ? Sur cette question, les modèles présentés dans cet ouvrage sont loin d'être aveugles : ils tentent d'ouvrir de nouvelles voies pour plus de certitudes dans les prises de décisions publiques pour l'aménagement et le développement durable des territoires urbains.

Invariablement, le problème de la validation des modèles pose à nouveau la question des données. Comment valider un modèle si ce n'est en mesurant les écarts entre les résultats qu'il produit et la réalité

observée ? Des écarts « minimales » ou « acceptables » démontrent sa pertinence ou son efficacité, au moins en partie. Cela étant, toutes les données utiles à la validation ne sont pas nécessairement inscrites dans un intervalle diachronique adéquat. Les données de comptage routier, par exemple, indiquent le nombre de véhicules qui passent chaque jour sur certains tronçons de route. Elles peuvent dès lors servir à valider les résultats d'un modèle de transport, dont l'objectif est justement d'évaluer le trafic sur les réseaux, mais contraignent à raisonner à une échelle hebdomadaire ou mensuelle, alors que les simulations sont effectuées pour un jour donné. De manière plus générale, la validation peut alors être mise en œuvre par l'intermédiaire d'un exercice de postdiction. Dans ce sens, la postdiction est au passé ce que la prédiction est au futur : à partir d'une situation antérieure connue, on tente de reproduire une situation actuelle, connue elle aussi. Mais dans ce cas, il est encore nécessaire de disposer d'informations précises à un temps t et à un temps $t+1$. Dans ce contexte, toutes les données antérieures à une situation donnée ne doivent pas être considérées comme dépassées, mais peuvent au contraire constituer un corpus utile à la validation. Leur mise à jour est fondamentale mais elle ne doit pas effacer les images du passé.

4. ECLAIRER LES ACTIONS POLITIQUES

Enfin, la modélisation ne peut se concevoir indépendamment de la sphère politique, dont elle doit tirer la pertinence des scénarios qu'elle simule. Cette « mise en scénario » peut par exemple passer par une modification de l'état initial du système : que se passe-t-il si l'on ajoute une rocade d'autoroute pour contourner la ville ? Les données élémentaires peuvent être modifiées pour prendre en compte ce nouveau contexte. Mais cette modification demande à ce que de nouvelles informations soient connues avec précision : où passera cette rocade, quel seront son débit et sa vitesse, comment sera-t-elle connectée au reste du réseau ? De même, si l'on souhaite simuler l'impact d'un péage urbain, il est nécessaire de connaître les modalités exactes de sa mise en place : s'agira-t-il d'un péage en entrée et en sortie ? Sera-t-il permanent ou uniquement les jours de semaine ? Uniquement aux heures de pointe ? etc.

L'ensemble de ces informations implique la description précise des projets futurs, qui n'est pas dénuée d'incertitudes, ni de dimension politique. En effet, si la modélisation concerne avant tout les modélisateurs, la mise en place des scénarios à simuler est souvent préparée par les édiles dans un contexte plus ou moins controversé, et dans le cadre

d'un programme politique affiché ou non. Ainsi, on peut penser qu'un entretien régulier avec les décideurs et les gestionnaires peut conduire à la constitution d'une base de scénarios réellement convaincante. Chacun devra ensuite être implémenté dans le programme de simulation, ce qui peut nécessiter un exercice de « traduction » parfois difficile. Au sein de cet ouvrage, plusieurs auteurs insistent de ce fait sur les aspects pédagogiques des modèles qu'ils développent, et qu'ils identifient comme une clé pour un meilleur dialogue avec la sphère des décideurs, qui peuvent désormais s'approprier la modélisation pour mieux envisager les aménagements qu'ils proposent et en visualiser les conséquences *ex ante*.

A l'heure où nous achevons ce livre, J. de Courson (2010) publie une tribune provocante sur cette question. Il y explique que, selon lui, l'urgence de certaines situations actuelles, couplée avec la myopie de certains experts et spécialistes, a trop largement discrédité la prospective qui n'est souvent plus utilisée que comme un affichage, une production d'images médiatiques qui confinent au rêve et que l'on n'utilise plus que comme un « outil de pédagogie politique ». Il cite alors J. Cocteau, repris entre temps par F. Ascher (2001) : « Ces événements nous dépassent. Feignons d'en être les organisateurs ». L'expression est lapidaire. Est-elle encore juste ? Les questionnements auxquels cet ouvrage tente de faire face, les méthodes rigoureuses qu'il apporte à la simulation de processus complexes, les résultats prometteurs qui s'y esquissent, les domaines nouveaux qui y sont explorés, tant d'un point de vue pratique que théorique, montrent que la recherche ouvre de voies et des chemins qui se croisent et permettent de mieux considérer la question de l'urbanisation et des politiques de transports qui s'y associent, ouvrant des solutions permettant d'envisager la mise en place d'un développement durable des territoires et des systèmes urbains plus concrètement.

Références bibliographiques

- Ascher F., 2001, *La société hypermoderne. Ces événements nous dépassent, feignons d'en être les organisateurs*, Ed. de l'Aube.
- De Courson J., 1999, *La prospective des territoires. Concepts, méthodes résultats*, CERTU, Coll. Débats, 22, 70 p.
- De Courson J., 2010, Prospective et politique. Ou ce que les hommes politiques m'ont appris sur la prospective, *Futuribles*, 361, pp. 57-65.
- De Jouvenel B., 1964, *L'art de la conjecture*, Ed. du Rocher.
- De Rosnay J., 1975, *Le microscope. Vers une vision globale*, Seuil.
- Sapoval B., 1997, *Universalités et fractales*, Flammarion.

┌

┌

└

└

POSTFACE

Gérard Brun

Direction de la recherche et de l'innovation du Ministère chargé
du Développement durable (MEEDDM)

L'ouvrage que l'on vient de lire témoigne clairement de la diversité des recherches menées en France dans le domaine de la modélisation urbaine, où l'on associe le transport et l'utilisation de l'espace, en s'efforçant de rendre compte des multiples interactions tissant ce phénomène infiniment complexe qu'est la ville, le système urbain devrait-on dire.

Ce courant de recherche a été particulièrement encouragé par le Ministère chargé du Développement durable (MEEDDM) et l'ADEME, dans le cadre du Programme national de recherche dans les transports terrestres (PREDIT), depuis une dizaine d'années, avec des prolongements dans le programme « Ville durable » de l'Agence nationale de la recherche (ANR). Fait remarquable, il a mobilisé des chercheurs venant d'horizons divers, pratiquant ainsi une pluridisciplinarité réelle. On a notamment assisté à une convergence des économistes et des géographes qui s'est révélée très productive.

L'objectif ultime était, et reste, de fournir aux responsables urbains des outils d'aide à la décision fiables et éclairants, afin de nourrir une prospective locale débouchant sur une politique. Cela ne nécessite pas la production de chiffres d'une précision maniaque, en l'occurrence bien inutile, mais la mise en évidence d'ordres de grandeur et surtout de relations dont on n'a pas toujours conscience, avec leurs effets émergents inattendus. En un mot, on pourrait qualifier ces modèles d'outils pédagogiques. Mais si des applications partielles notables ont déjà été tentées avec succès ou sont en cours, ces outils ne sont pas encore arrivés globalement au stade de l'utilisation quotidienne, loin s'en faut parfois : il s'agit encore largement d'un *work in progress*. Nous sommes bien dans le domaine de la recherche.

On a pu comprendre en effet au fil de la lecture du livre que des difficultés subsistent, au premier chef le problème des données, jamais assez détaillées, jamais assez pertinentes, les méthodes usitées en matière de statistiques et la périodicité de ces statistiques laissant souvent les modélisateurs sur leur faim. Mais, inversement, ceux-ci

auront contribué à faire évoluer les enquêtes, de même qu'ils ont tout à la fois utilisé et contribué à remettre en question et à faire évoluer les connaissances sur la mobilité, à commencer par celles concernant l'étalement urbain, les budgets-temps, l'accessibilité, etc.

Un autre problème est apparu, qui se combine évidemment avec le premier, celui de la généralisation à n'importe quelle agglomération de résultats obtenus en se fondant sur un cas particulier. L'exemple bien connu du modèle URBANSIM, finalement trop américain pour être transposé tel quel à l'Europe, montre qu'il s'agit d'une constante du travail de modélisation. Il est probable qu'il faudra toujours trouver un équilibre entre l'universel et le singulier, entre l'application directe et l'adaptation.

Une question connexe est celle de la complétude du modèle. Il ne faudrait jamais oublier qu'un modèle est, par définition, une représentation réduite de la réalité. On est vite amené, en effet, de proche en proche, à intégrer un nombre croissant de variables, multipliant ainsi vertigineusement le nombre d'interrelations, jusqu'à tendre vers une construction monstrueuse et impossible à manipuler, une chimère à la Borges : le modèle à l'échelle 1... Or, l'un des défis posés par les financeurs était de parvenir au contraire à des outils aisément et rapidement maniables, rompant ainsi avec les modèles du passé, trop souvent réservés à quelques spécialistes, voire à leurs concepteurs seuls.

On aura remarqué que, *grosso modo*, deux grandes tendances se dessinaient : l'une consiste en la modernisation de la modélisation traditionnelle à quatre étapes, pour en faire le plus souvent une modélisation « dynamique », l'autre a recours à des outils élaborés dans le sillage ou le voisinage des théories de la complexité : dynamique des systèmes, automates cellulaires, systèmes multi-agents, fractales, sur fond de systèmes d'information géographique, toutes ces techniques étant rendues plus maniables par les progrès de la micro-informatique. Tout en encourageant l'acclimatation de nouvelles méthodes (c'était l'un des objectifs des séminaires « Méthodes et approches » qui ont donné naissance à la présente collection d'ouvrages), le PREDIT s'est efforcé de faire sa part aux deux tendances, dès lors qu'un effort créateur se manifestait, d'autant que le propos des divers modèles n'est pas strictement le même. « Il y a plusieurs demeures dans la maison du père », a-t-on dit, et les commanditaires en ont tenu compte.

La morale de cette histoire paraît alors facile à tirer : dans ce domaine, comme dans bien d'autres, la recherche, même très proche de l'application, a besoin de temps, de liberté et de continuité dans le financement. Un programme public fédérateur tel que le PREDIT

pouvait satisfaire à ces conditions, même si les budgets ont sans doute été trop fractionnés, voire trop modestes. Le PREDIT 4 (2008-2012) poursuit ces efforts, en veillant aux infléchissements dictés par les évolutions de la science, comme par les progrès des travaux de modélisation eux-mêmes, et en maintenant les conditions posées dans le passé, en particulier l'objectif d'une utilisation pratique par les responsables des transports et de la planification urbaine.

Ce livre est donc un jalon beaucoup plus qu'une fin. Il va permettre une évaluation de la tâche accomplie et il annonce de nouveaux développements, peut-être de nouveaux partenariats. En effet, si la France est maintenant bien placée dans ce domaine, elle n'est pas seule et trouverait avantage à s'allier à d'autres dans une entreprise dont il ne faut pas sous-estimer la difficulté, à la mesure de son utilité.

┌

┌

└

└

GLOSSAIRE

ADEME : Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie.

ANR : Agence nationale de la recherche.

CERTU : Centre d'études sur les réseaux, les transports, l'urbanisme et les constructions publiques. Le CERTU est un service du Ministère de l'écologie, de l'énergie, du développement durable et de la mer (MEEDDM).

BD ORTHO® : Base de données de l'IGN. C'est un assemblage de photographies aériennes numériques ortho-rectifiées (corrigées pour être superposables à une carte) et géo-référencées (renseignées de manière à inclure des coordonnées géographiques).

BD TOPO® : Base de données de l'IGN. De précision métrique, elle contient une description des éléments du territoire, de ses infrastructures et de son occupation du sol. Elle s'organise en différents thèmes : réseaux de transport, hydrographie, bâtiments, végétation, etc.

DADS : Déclaration automatisée des données sociales. Déclaration que tout établissement employant du personnel doit établir annuellement.

DAVISUM : Logiciel d'analyse et de prévision de trafic développé par l'entreprise allemande PTV.

DGI : Direction générale des impôts. Dans un but fiscal, la DGI gère la numérisation et la mise à jour des informations cadastrales, et produit un plan du cadastre sur l'ensemble du territoire national.

DUP : Déclaration d'utilité publique. Procédure administrative permettant de réaliser une opération d'aménagement (infrastructure de transport, école, lotissement, etc.) et qui donne lieu à une enquête d'utilité publique.

EMD : Enquête ménages déplacements. Les EMD s'appuient sur une méthodologie « standard » mise au point par le CERTU, et permettent d'obtenir des données sur les mobilités, objectives et comparables dans le temps et dans l'espace.

EGT : Enquête globale des transports. Réalisée depuis 1976 par le Syndicat des transports d'Ile de-France (STIF), cette enquête interroge régulièrement un échantillon de ménages franciliens sur leurs activités de mobilité de la veille.

FACTEUR 4 : L'expression « Facteur 4 » désigne l'engagement écologique qui consiste à diviser par quatre les émissions de gaz à effet de serre à l'horizon 2050.

GEOROUTE® : Base de données de l'IGN, contenant des informations sur le réseau de routes.

GNU : Projet informatique de système d'exploitation composé exclusivement de « paquets » respectant la philosophie du logiciel libre.

GPV : Grand projet de ville. Programme d'amélioration des conditions de vie et de revalorisation de l'image d'un quartier.

IRIS : Ilots regroupés pour l'information statistique. Sur la base d'un découpage géographique défini par l'INSEE, chaque IRIS correspond à une unité de base pour le recensement et la diffusion des données sociodémographiques issues des RGP.

MEEDDM : Ministère de l'écologie, de l'énergie, du développement durable et de la mer.

NACE : Nomenclature des activités dans la Communauté européenne. C'est l'équivalent de la NAF à l'échelon européen.

NAF : Nomenclature d'activités française. Mise au point par l'INSEE, elle répertorie et classe l'ensemble des activités économiques françaises.

NAVTEQ : Société qui fournit des cartes numériques et d'autres contenus dynamiques associés aux réseaux de routes, pour la navigation et les services de localisation (dont la navigation GPS automobile et individuelle).

NES : Nomenclature économique de synthèse. Adoptée par l'INSEE, la NES est une nomenclature incluant les activités économiques et les produits, afin de produire des statistiques économiques agrégées (dans tous les domaines), et de refléter le comportement d'agents confrontés à leur marché.

PDU : Plan de déplacements urbains. Imposés par la loi sur l'air à toutes les agglomérations de plus de 100 000 habitants, les PDU constituent un outil pour développer les transports en commun et les modes doux.

PLU : Plan local d'urbanisme. C'est le principal document règlementaire d'urbanisme et de planification, rédigé à l'échelle communale ou intercommunale. Il remplace le Plan d'occupation des sols (POS) depuis la loi SRU de 2000.

PREDIT : Programme de recherche, d'expérimentation et d'innovation dans les transports terrestres. Organisés en vagues (PREDIT 1, 2, 3, et 4), ils sont initiés et conduits par les ministères chargés de la recherche, des transports, de l'environnement et de l'industrie, et par l'ADEME, OSEO et l'ANR.

PRQA : Plan régional de la qualité de l'air en Ile-de-France.

REE : Répertoire des entreprises et de leurs établissements. V. SIRENE.

RGP : Recensement général de la population. Etabli par l'INSEE, le RGP contient de nombreuses données statistiques sur les caractéristiques et la localisation des personnes et des logements.

SCOT : Schéma de cohérence territoriale. C'est un document d'urbanisme qui fixe, à l'échelle de plusieurs communes, les orientations fondamentales de l'organisation du territoire et de l'évolution des espaces urbains, afin de préserver un équilibre entre zones urbanisées, industrielles, touristiques, agricoles et naturelles.

SIG : Système d'information géographique. Les SIG sont des logiciels permettant d'organiser et de présenter des données alphanumériques spatialement référencées, ainsi que de produire des cartes.

SIRENE : Système d'identification du répertoire des entreprises et de leurs établissements. En France, les annuaires d'entreprises sont fondés sur le répertoire national d'identification des entreprises et des établissements connu sous le nom de SIRENE et géré par l'INSEE.

SITADEL : Système d'information et de traitement automatisé des données élémentaires sur les logements et les locaux. C'est un fichier de statistiques sur la construction neuve, mis au point par la Direction régionale de l'équipement (DRE).

URBANSIM : Logiciel « open source » (v. GNU) de modélisation et de simulation intégrée de l'urbanisation et des politiques de transport, développé aux Etats-Unis à l'Université de Washington.

VISUM : v. DAVISUM