HAL
open science

MobiSim : un modèle multi-agents et multi-scalaire pour simuler les mobilités urbaines

Jean-Philippe Antoni, Gilles Vuidel

To cite this version:

Jean-Philippe Antoni, Gilles Vuidel. MobiSim : un modèle multi-agents et multi-scalaire pour simuler les mobilités urbaines. Jean-Philippe Antoni. Modéliser la ville. Forme urbaine et politiques de transport, Economica, Méthodes et approches, pp.50-77, 2010. hal-00731551

HAL Id: hal-00731551

https://hal.science/hal-00731551v1

Submitted on 16 Jan 2014

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.

MobiSim
Un modèle multi-agents et multiscalaire pour simuler les mobilités urbaines

Jean-Philippe Antoni et Gilles Vuidel

Laboratoire ThéMA
UMR 6049 CNRS - Université de Franche-Comté
32 rue Mégevand F-25 000 Besançon
jean-philippe.antoni@univ-fcomte.fr

Référence
Antoni J.P., 2010, MobiSim. Un modèle multi-agents et multiscalaire pour simuler les mobilités urbaines. In : Antoni J.P. (ss. dir.), *Modéliser la ville. Forme urbaine et politiques de transport*, Economica, Coll. Méthodes et approches, pp. 50-77.

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 Troitszch, 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'accompagnement [1] : 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 2002 [2], 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 [3], puis de la Direction de l'Innovation et de la Recherche (DRI, MEDDMM) 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

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 2002 à 2007, MobiSim a été développé par l'entreprise française ATN (Application des Techniques Nouvelles) dirigée par Philippe Casanova.

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

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 ThéMA [4] depuis 2008.

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 multiscalaire 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

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`.

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 problématiques 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 URBANSIM [5] et MIRO [6], ou encore le projet européen PROPOLIS [7] 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 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 ECDESUP [8], 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 égale-

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 quOtidiens) 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.

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`.

ment 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.

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 répercutions 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

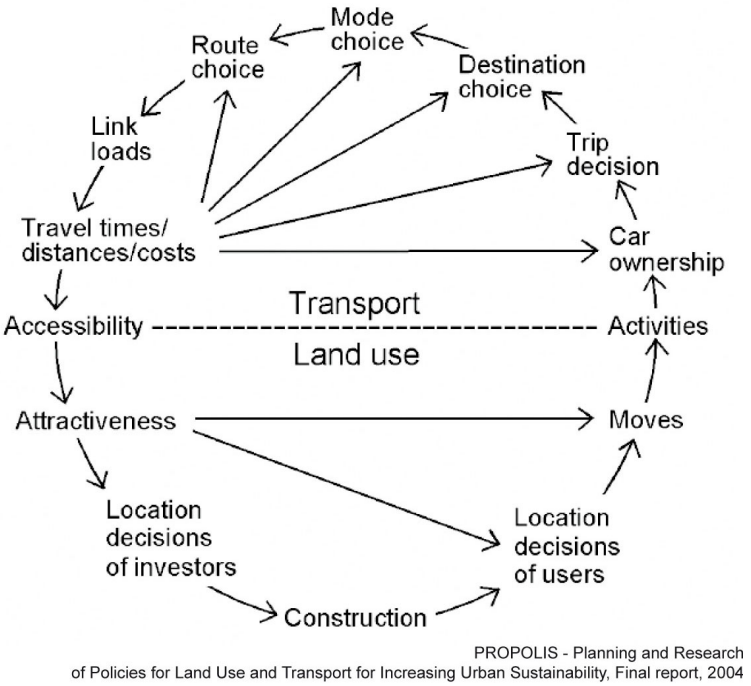

Figure 1 – Interactions Transport-Urbanisation : des logiques temporelles différentes. Source : PROPOLIS (2004).

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 PROPOLIS [9], selon une logique qui correspond à celle que nous décrivons ici (Figure 1)

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 le 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

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 5e PCRD.

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 (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 correspondant 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 géographiques [10]) 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 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 (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 :

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.

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.

$$p_{ij} = \begin{cases} 1 \, si \, Z_i \cap B_j = max_k\{Z_k \cap B_j\} & (1) \\ 0 \, sinon & (2) \end{cases}$$

Avec :
Z_i : la surface de la zone i
n_i : le nombre de logements dans la zone i
B_j : la surface du batiment j
h_j : la hauteur du batiment 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 :

$$v_i = \sum_j p_{ij}.h_j.a(B_j) \tag{3}$$

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

$$\rho Z_i = \frac{n_i}{v_i} \tag{4}$$

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

$$\rho B_j = \sum_i p_{ij}.\rho Z_i \tag{5}$$

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 :

$$N_{C_k} = \sum_j a(B_j \cap C_k).h_j.\rho B_j \tag{6}$$

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

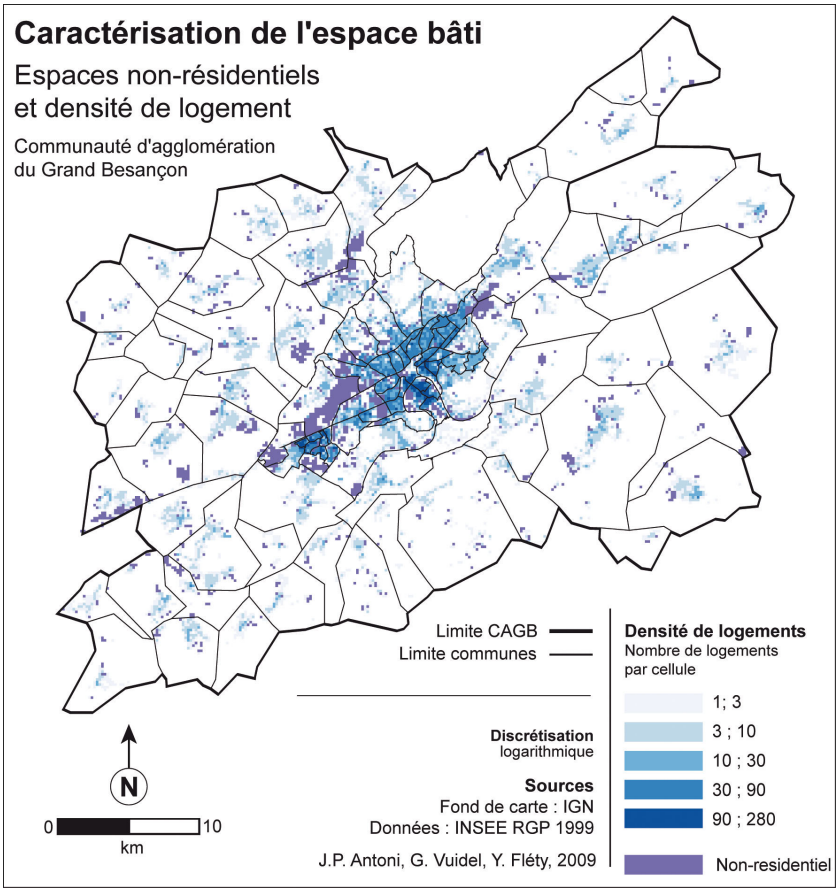

Figure 2 – Ventilation du bâti non-résidentiel et des logements dans l'agglomération de Besançon

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

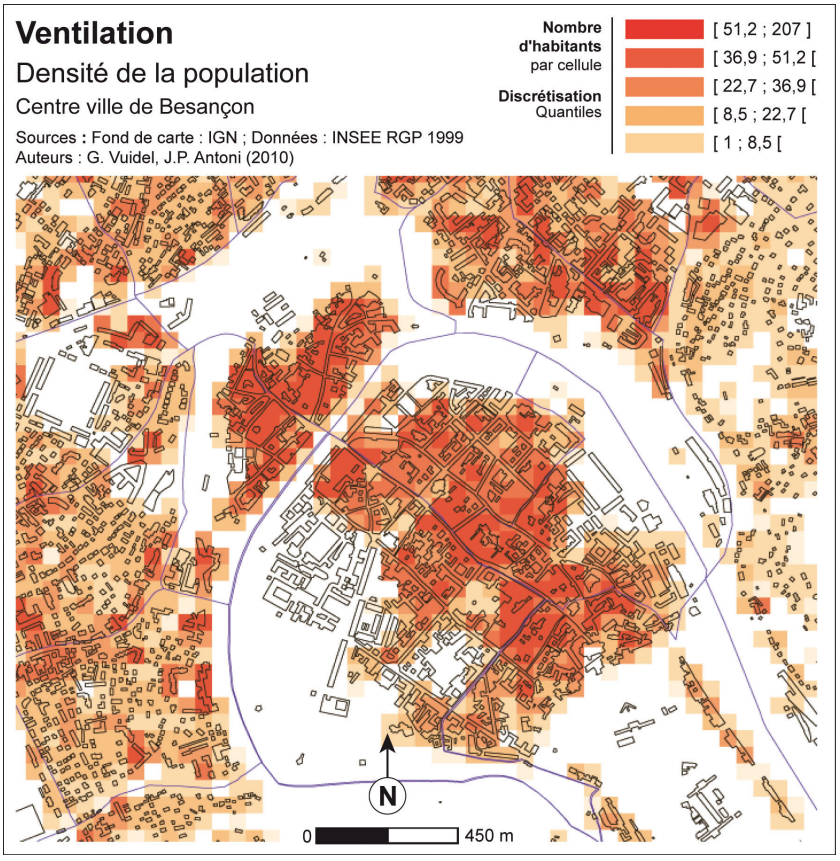

Figure 3 – Ventilation de la population (exemple du centre de Besançon)

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 étudiée [12] ;
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

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.

l'heure actuelle, seuls trois modes de transport sont pris en compte dans MobiSim : VP, TC et MAP considérés de manière miltimodale. 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 trajets [13]. 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 COPERT [14] par exemple.

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 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 :

$$A_{ij} = \frac{E_j}{d_{ij}} \tag{7}$$

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

$$p_{ij} = \frac{A_{ij}}{\sum_k A_{ik}} \tag{8}$$

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.

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 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`.

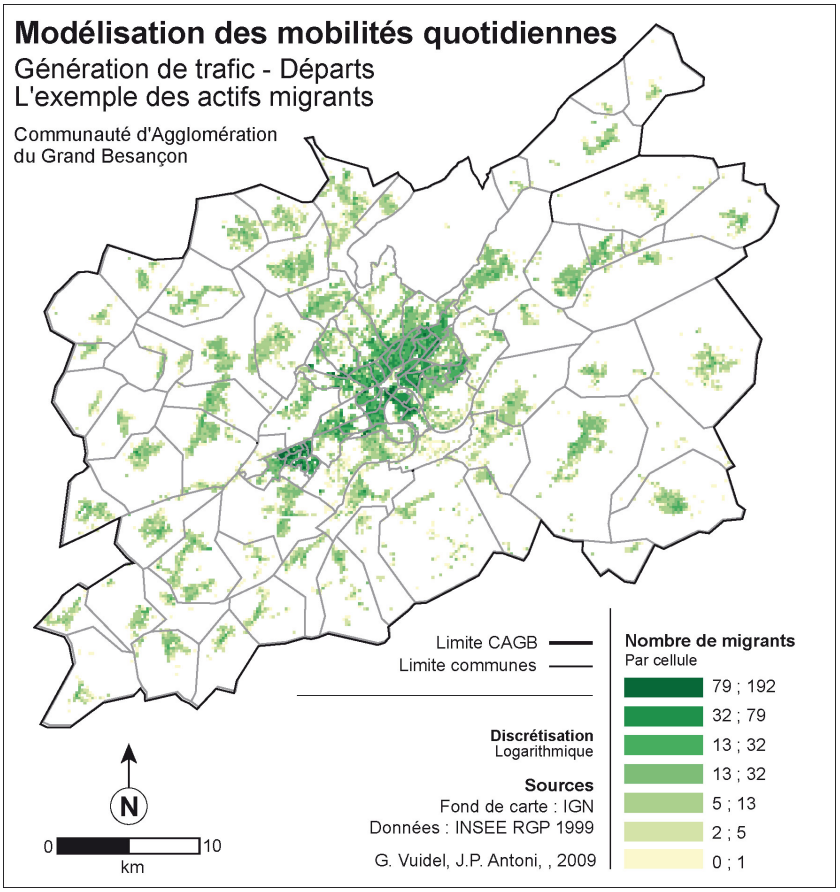

Figure 4 – Génération du trafic : l'exemple des actifs

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 contribuer 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

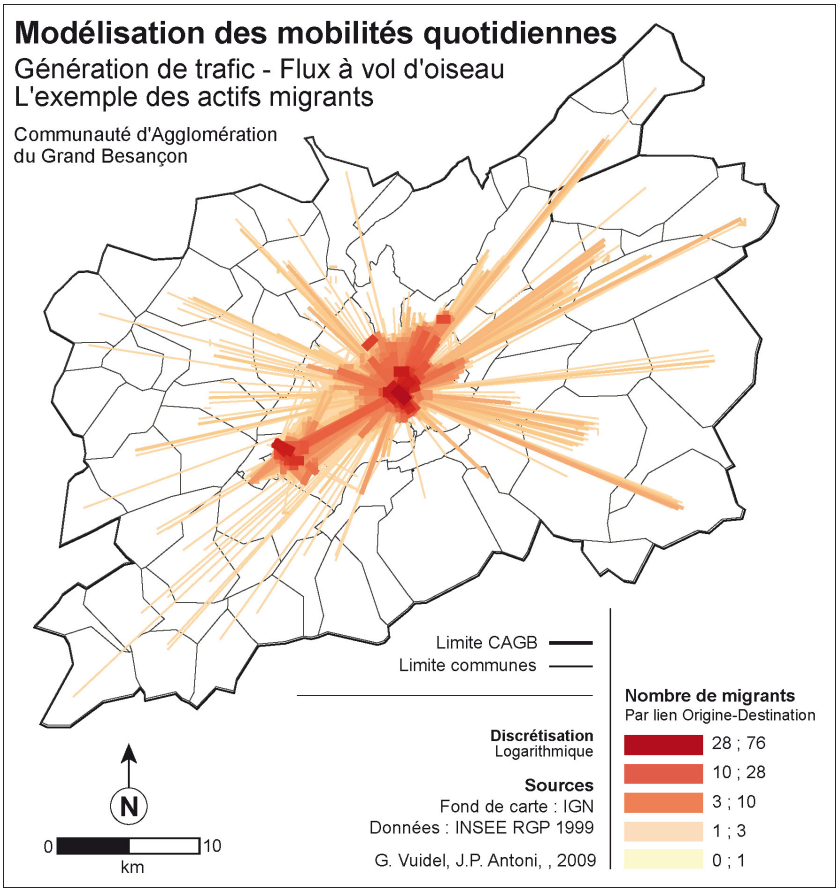

Figure 5 – Distribution du trafic : l'exemple des migrations domicile-travail

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 quotidiennes, 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 ;
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 ;

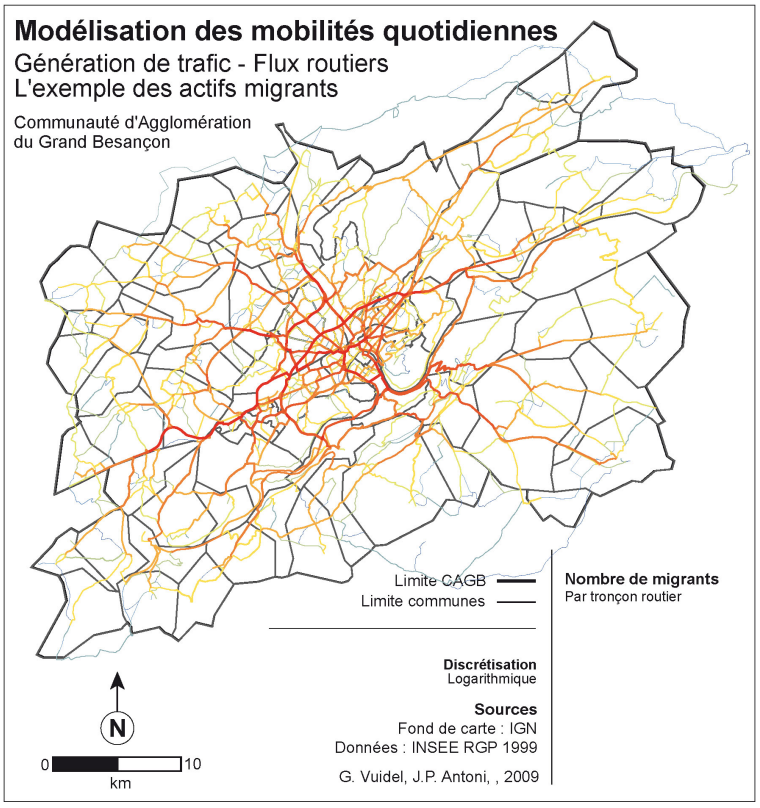

Figure 6 – Affectation du trafic : l'exemple des migrations domicile-travail

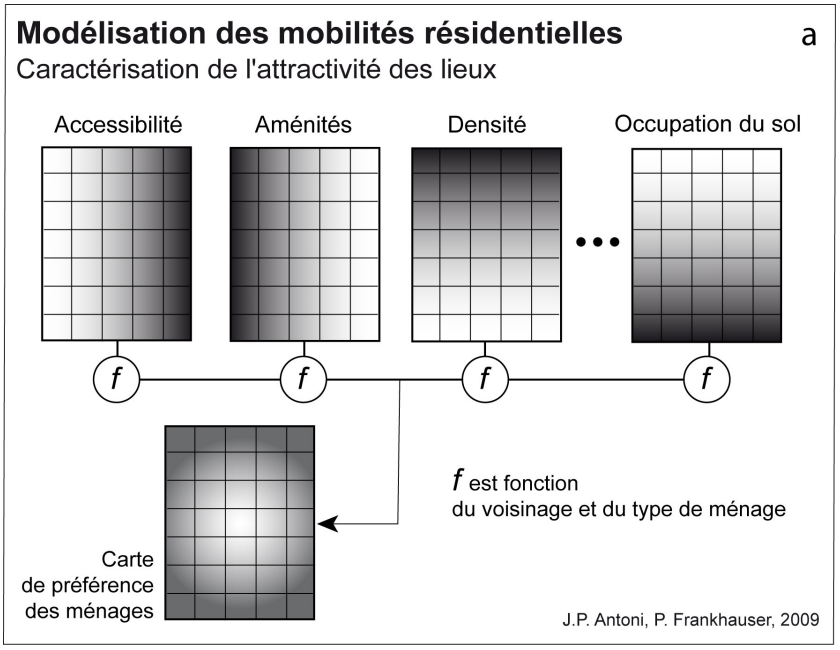

Figure 7 – Mobilités résidentielles : une modélisation en deux temps

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,

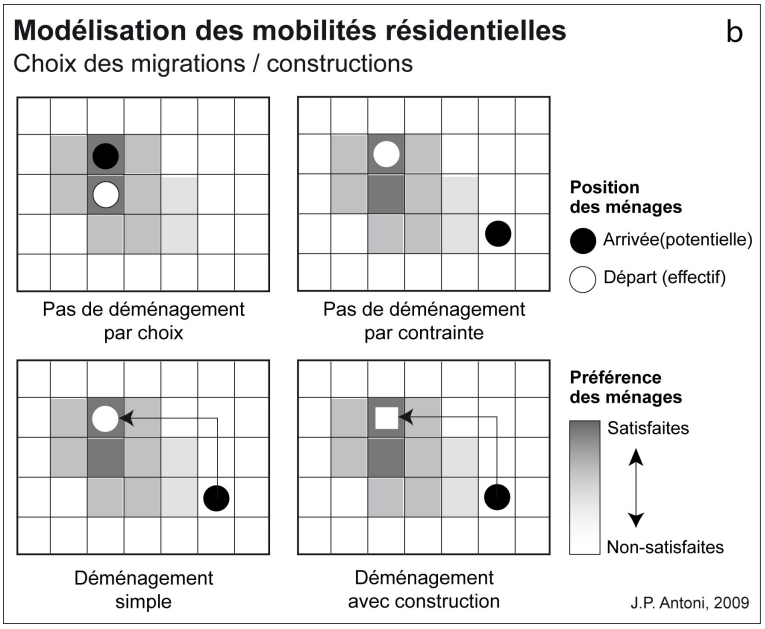

Figure 8 – Mobilités résidentielles : une modélisation en deux temps

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 susceptible 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

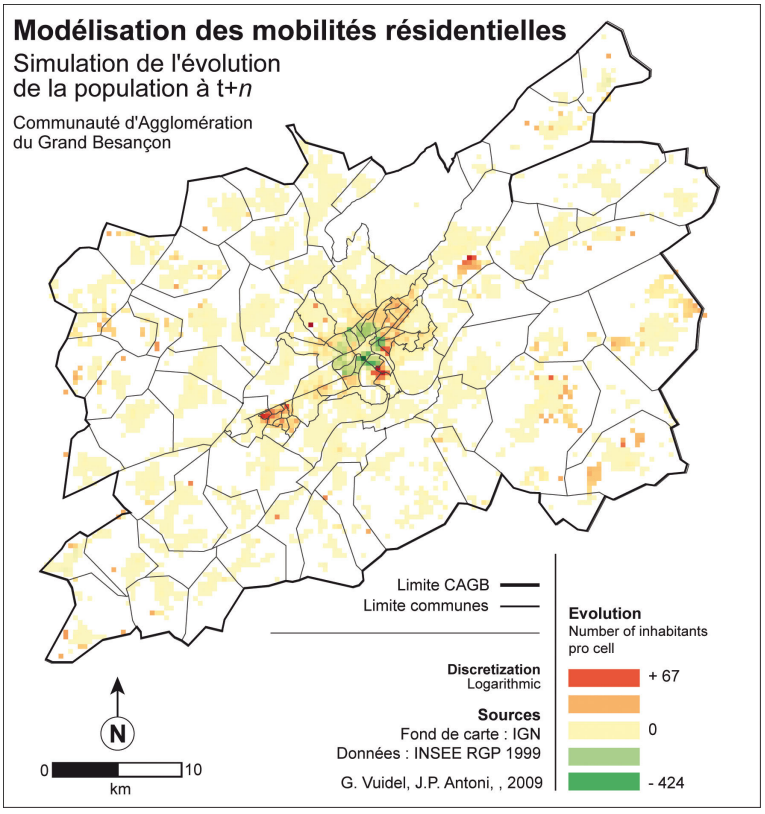

Figure 9 – Simulation des mobilités résidentielles

gentrification) et dans les espaces périphériques riches en aménités « vertes » (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 simples [15]. 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 soumis aux risques), les pollutions et les nuisances sonores associées aux mobilités générées (au niveaux 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 exponentiel [16]. 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.

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 suivant 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.

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.

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.

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., Lavalle 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 neigbourhood 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, pp. 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., Troitszch 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 subcenters, *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, *Land-*

scape 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, *Lanscape 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*, 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

Le modèle MobiSim 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.