

Modéliser différentes dynamiques à différentes échelles pour simuler la complexité des mobilités urbaines

L'exemple de MobiSim

Jean-Philippe Antoni, Pierre Frankhauser

Laboratoire ThéMA, CNRS, Université de Franche-Comté
32 rue Mégevand 25000 Besançon (France) - <http://thema.univ-fcomte.fr>

Le projet Mobisim (simulation des mobilités), actuellement en cours de développement, vise à modéliser différentes dynamiques à différentes échelles pour simuler la complexité des mobilités urbaines. 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, qui prend concrètement la forme d'un programme informatique, se base sur plusieurs modèles, permettant de coupler une approche centrée sur les choix et les comportements individuels en matière de mobilité résidentielle et quotidienne, 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. Il présente en quelque sorte une position de recherche. 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 multiscalair des processus modélisés (partie 2), puis sur le couplage de modèles mis en oeuvre pour y parvenir (partie 3)

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 et les automates cellulaires, 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 oeuvre de politiques dont les conséquences ne sont pas *a priori* identifiables au départ.

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. Ils permettent en effet la « mise en mouvement » des processus de décision complexes, associés à des acteurs de la ville (édiles, techniciens, habitants, usagers) très différents, dans une situation d'incertitude importante. A travers 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, presque en temps réel, 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, la projet MobiSim est associé à cette démarche prospective d'aide à la décision.

Le projet Mobisim a été initié et développé, de 2002 à 2007, par l'entreprise française ATN (Application des Techniques Nouvelles) dirigée par Philippe Casanova. D'abord influencé par les apports remarquables de la dynamique des systèmes, le programme s'est rapidement enrichi des nouvelles possibilités offertes par les Systèmes multi-agents, notamment par l'approche individu-centrée qu'elle permet de mieux simuler. C'est sur cette base que le programme est aujourd'hui encore développé par le laboratoire ThéMA² à Besançon qui, suite à la cessation d'activités de l'entreprise ATN, porte le projet depuis janvier 2008.

Depuis sa création en 2002, la plate-forme MobiSim a 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 DRAST³ (Ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement durable et de l'Aménagement du territoire) 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

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 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

3 La DRAST (Direction de la Recherche et de l'Animation Scientifique et Technique) 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.

thématiques qu'elles questionnent quotidiennement, les agences d'urbanisme (notamment celle de Rennes, de Brest, et dans une moindre mesure celle de Lyon, ...) 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'ils ont pu initier, que par les données qu'ils 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 chantiers de recherche.

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 système multi-agent, couplé à un automate cellulaire et à un modèle 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 dans une même routine, ce que d'autant associeraient à des carottes et des pommes de terre ?). 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 jalons 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'ils 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 UrbanSim⁴ et Miro⁵, ou encore le projet européen Propolis⁶ qui s'en rapproche sur plusieurs points) connaissent un succès relatif, dans la mesure où la représentation 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 mobilité, des facteurs clés des comportements des individus, considérés au niveau élémentaire de la personne ou du ménage. En particulier, la modélisation basée sur les systèmes multi-agents 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 MobSim est indissociable du projet ANR Ecdesup⁷, 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 conceptuels consolidées et validées dans plusieurs disciplines au projet MobiSim, ce dernier en apparaît comme l'un des aboutissements, offrant une plate- forme de simulation et de tests de scénarios.

Les choix spatiaux figurent ainsi au cœur de la modélisation urbaine. Ils agissent

4 UrbanSim est un programme de simulation implémentant un modèle 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

5 Le projet Miro (Modélisation Intra-urbaine des Rythmes quOtidieus) a fait l'objet d'un Predit (Programme National de Recherche et d'Innovation dans les Transports Terrestres) de 2004 à 2007.

6 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.

7 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.

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 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.) interviennent avec des forces inégales et difficiles à quantifier. Dans tous les cas, les résultats des choix individuels répondant à ces critères, qui mènent aux migrations

résidentielles, 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 décennie 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. 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 à la fois de réduire le budget consacré aux déplacements, et d'améliorer la qualité de la vie des ménages en substituant certains de 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 partages 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'accordent sur une définition de l'espace sur lequel il travaille 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 que la compatibilité des différentes simulations, possiblement mises en oeuvre par différents modèles, soit respectée, afin que les résultats des premiers puissent enrichir les données de seconds et que l'ensemble des recherches qui naissent souvent de champs disciplinaires différents, trouvent *in fine* leur complémentarité autour de questions concrètes. Or, si le principe peut paraître trivial, sa mise en oeuvre n'est pas simple car, d'une part, les processus simulés n'interviennent pas tous à la même échelle (la politique de la ville n'est pas celle du 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 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, i.e 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 IRIS⁸ 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 géographiques⁹) correspond enfin au découpage géographique le plus fin du territoire et contiennent 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 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 maille afin, entre autres, d'évaluer combien sont exposés directement à la pollution automobile, par exemple, ou combien se localise à proximité d'un parc leur procurant un cadre de vie spécifique. L'objectif de l'introduction d'un maillage cellulaire fin est triple : 1. 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) ; 2. Estimer l'offre de logements au niveau de la zone en fonction de l'occupation du sol définie dans chaque maille ; 3. 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

8 Les Îlots regroupés pour l'information statistique (IRIS) correspondent à un découpage géographique défini par l'INSEE. Chaque IRIS correspond ainsi à une « brique de base en matière de diffusion de données locales ».

9 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.

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).

2. Un couplage de modèle

L'originalité du projet MobiSim ne réside pas uniquement dans la considération multiscalair (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.

2.1. Activités des ménages : les systèmes multi-agents

Premièrement, la description des comportements (choix et décision) de localisation et de déplacement des ménages (et éventuellement des entreprises) qui peuplent l'aire urbaine étudiée est centrale au sein des processus modélisés dans MobiSim (cf. 1.3). Les systèmes multi-agents (SMA) apparaissent dès lors comme des outils de modélisation adaptés pour tenir compte de la dynamique de ces différents acteurs au coeur des processus liés à la mobilités 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 au 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 et apportent ainsi 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. Appliquée à la problématique de la mobilité urbaine, la formalisation multi-agent permet ainsi de couvrir plusieurs domaines et champs d'application possibles, parmi lesquelles 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 (localisations 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 SMA apparaît quant à elle 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.

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

Deuxièmement, 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),...) 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 et le transport de marchandises en ville générés par les activités économiques. Le calcul des déplacements s'effectue selon un modèle à quatre étapes, relativement classique dans les études de déplacement (Le Nir, 1991). Ce type de modèle propose en effet de simuler le trafic généré dans une agglomération en le partageant entre les différents modes de transports (VP, TC,...) disponibles, et en affectant chacun des flux sur les différents réseaux associés. Le modèle à quatre étapes est en fait « une succession de modèles dont l'interaction n'est que minimale. 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, 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 « génération des boucles de déplacements individuels » (Ben Akira, 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 émis et reçus par chacun des quartiers (niveau zonal) de l'aire urbaine étudiée¹⁰.
3. La troisième étape est dite du « choix modal » (Cantillo *et al.*, 2006) ; elle consiste à répartir le trafic en fonction des différents mode de transport disponibles sur l'aire d'étude. A l'heure actuelle, seuls trois modes de transport sont pris en compte dans MobiSim : la voiture particulière, les transports en commun et le mode « piétion ». Toutefois, le programme devrait rapidement évoluer pour considérer d'autres modes doux (notamment la bicyclette), et prendre en compte des possibilités de déplacements multi-modaux.
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 origines-destinations 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 dans des matrices Origine-Destination¹¹. A partir de cette modélisation des déplacements, le modèle peut alors calculer les émissions générées (gaz à effet de serre, polluants, bruits) sur la base du modèle Copert¹², par exemple.

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

Enfin, un automate cellulaire, 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

10 Cette étape peut faire appel à l'ensemble des méthodologies d'analyse des facteurs à l'origine des déplacements : les modèles gravitaires, des facteurs de croissance ou d'opportunité fournissent des solutions potentielles de modélisation de la génération de trafic. 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.

11 Ces calculs prennent en compte la congestion en utilisant des courbes débit/vitesse pour chaque tronçon. Les matrices ainsi obtenues sont utilisées au pas de temps suivant pour déterminer le choix modal des différents usagers.

12 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/>.

étapes précédentes. La dynamique de l'occupation du sol 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). L'objectif de la modélisation est alors triple : 1. Simuler la dynamique de l'occupation du sol (dans le but notamment de tester l'impact des mobilités sur le développement urbain) ; 2. Estimer l'offre de logements au niveau de chaque zone (niveau 2) en fonction de l'occupation du sol définie dans chaque maille ; 3. Estimer les impacts sociaux et environnementaux de la mobilité urbaine à l'échelle de l'aire urbaine (niveau 1).

La cohérence entre les trois modèles 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 simples¹³. Sur le plan économique d'abord, MobiSim devrait ainsi offrir un certain nombre d'indicateurs décrivant le niveau de satisfaction des 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). 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.

Conclusion

Le champ de la modélisation en sciences sociales, particulièrement en géographie, en aménagement de l'espace et en urbanisme, a connu une émergence importante depuis le

13 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.

milieu des années 1990, et il s'est aujourd'hui constitué un *background* scientifique remarquable, au sein duquel figurent de nombreuses bases de connaissance désormais validées. C'est à partir de ces bases théoriques que MobiSim se construit aujourd'hui, associant des démarches, des modèles et des méthodologies dont les implications à la fois conceptuelles et techniques ont été validées par ailleurs.

Toutefois, au regard de ces objectifs, le projet peut paraître ambitieux. L'approche individuelle, 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 exponentiel¹⁴. 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, i.e. 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*, n°347, 19 p.

Antoni J.P., Tannier C., 2006, Evaluation des simulations spatiales, Sageo 06 - Colloque International de Géomatique et d'Analyse Spatiale, Strasbourg, 11-13 septembre 2006, 4 p.

Ascher F., 2001, *Les nouveaux principes de l'urbanisme*, Ed. de l'Aube, 84 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

14 Ce « détail » technique, qui à longterm a 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.

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. In *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, Cambridge, 390 p.

Bonnell P. (1995) An application of activity-based travel analysis to simulation of change in behaviour. In *Transportation*, vol. 22, n° 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. In *Transportation Research, part B: Methodological*, vol. 40, Issue 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, 26/04/2006.

Dubois-Fresney L., 2006, *Atlas des Français aujourd'hui. Dynamiques, modes de vie et valeurs*, Ed. Autrement, 184 pages.

Dubois-Taine G., Chalas Y. (eds.), 1997. *La ville émergente*. Paris.

Ferber J., 1995, 2007, *Les systèmes multi-agents : vers une intelligence collective*, Dunod, 522 pages.

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, 251-271

Frankhauser P., Moine A., Bruch H., Tannier C., Josselin D., 1998, Simulating settlement dynamics by modelling subjective attractiveness evaluation of agents, *Actes du colloque de la Western Regional Science Association*, Monterey (USA)

Frankhauser, P., 2000. La fragmentation des espaces urbains et périurbains – une approche fractale. In: P. H. Derycke *Structures des villes, entreprise et marchés urbains*. L’Harmattan, collection *Emploi, Industrie et Territoire*. Paris, 25-54.

Gilbert N., Troitzsch K.G., 1999, 2005, *Simulation for the social scientist*, Open University Press, 295 pages

Giuliano G. and Small K.A. 1999. 'The determinants of growth of employment subcenters', *Journal of Transport Geography* 7: 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. In : *Applied Geography*, 26, pp. 323-345.

Humpert, K., Brenner, K. & H. Bohm, 1991. Großstädtische Agglomerationen – ein globales Problem. In: Sonderforschungsbereich 230 „Natürliche Konstruktionen“ (edt) *Natural structures – principles, strategies and models in architecture and nature*, vol. 1, Stuttgart, 39-50.

Le Nir M. (1991) Les modèles de prévision de déplacements urbains. Thèse de doctorat, Université Lyon II, 313 p.

Ligtenberg A., Bregt A.K., Lammeren (van) R., 2001, Multi-actor based land use modelling: spatial planning using agents. In : *Landscape and Urban Planning*, 56, pp. 21-33.

Markse A., Havlin S., Stanley H.E. 1995, "Modelling urban growth pattern", *Nature*, 377.

Morin E., 1990, *Introduction à la pensée complexe*, Editions sociales françaises, 158 pages.

Pumain, D., Sanders, L., Mathian, H., Guerin-Pace, F., Bura, S., 1995. In: Fisher, M.M., Sikos, T.T., Bassa, L. (Eds.), *Simpop, a Multi-Agent Model for Urban Transition*. Geomarket Co.,Budapest, 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: 304–333.

Small K.A. (1982) The Scheduling of Consumer Activities: Work Trips. In *American Economic Review*, n° 3, pp. 467 - 479.

Swait J. (2001) Choice set generation within the generalized extreme value family of discrete choice models. In *Transportation Research Part B*, vol. 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, XLIIème Colloque de l'ASRDLF - XIIème Colloque du GRERBAM, Sfax, 4-6 Septembre 2006, 29 p.

Vancheri A., Giordano P., Andrey D. and Albeverio S, 2004, "A Model for Urban Growth Processes with Continuum State Cellular Automata and Related Differential Equations" (July 2004).

White R., Engelen G., 1994, "Urban Systems Dynamics and Cellular Automata: Fractal Structures between Order and Chaos", *Chaos, Solitons and Fractals*, 4, 4, 563-583.